

2 LA CAPA FÍSICA

Autor: Rogelio Montañana

2	LA CAPA FÍSICA	2-1
2.1	INTRODUCCIÓN	2-2
2.2	TRANSMISIÓN DE DATOS: BASES TEÓRICAS	2-2
2.2.1	Módems y códecs	2-2
2.2.2	Teorema de Nyquist	2-2
2.2.3	Ley de Shannon-Hartley	2-4
2.3	MEDIOS DE TRANSMISIÓN	2-5
2.3.1	Cables metálicos	2-5
2.3.1.1	Problemas de los cables metálicos	2-5
2.3.1.2	Cable de pares	2-7
2.3.1.3	Cable coaxial	2-9
2.3.2	Fibra óptica	2-9
2.3.3	Comparación de fibra óptica y cable metálico	2-13
2.3.4	Transmisión inalámbrica	2-14
2.3.4.1	El espectro electromagnético	2-14
2.4	EL SISTEMA TELEFÓNICO CLÁSICO	2-16
2.4.1	Estructura del sistema telefónico	2-16
2.4.2	Módems	2-18
2.4.3	Enlaces troncales y multiplexación	2-20
2.4.3.1	Multiplexación por división de frecuencias	2-20
2.4.3.2	Multiplexación por división de tiempos PDH	2-20
2.4.3.3	Multiplexación SONET/SDH	2-22
2.4.4	Conmutación	2-27
2.4.4.1	Tipos de conmutadores	2-27
2.5	RDSI DE BANDA ESTRECHA	2-28
2.6	RDSI DE BANDA ANCHA Y ATM	2-31
2.6.1	Conmutadores ATM	2-33
2.7	XDSL	2-34
2.7.1	ADSL	2-34
2.7.1.1	ADSL G.Lite	2-36
2.7.1.2	RADSL	2-36
2.7.1.3	ADSL en España	2-37
2.7.2	VDSL	2-37
2.7.3	HDSL	2-38
2.8	TELEFONÍA CELULAR DIGITAL. GSM	2-38
2.9	SATÉLITES DE COMUNICACIONES	2-40
2.9.1	Satélites geoestacionarios	2-40
2.9.2	Satélites de órbita baja	2-42
2.10	EJERCICIOS	2-43
2.11	SOLUCIONES	2-46

2.1 INTRODUCCIÓN

La primera capa dentro de cualquier modelo de red está formada por el medio físico. Aquí más que en ninguna otra capa es necesaria la compatibilidad entre los equipos para que sea posible la comunicación. Por ejemplo, al solicitar a un operador una línea dedicada la interfaz física que se nos suministre deberá coincidir con la de nuestros equipos; de lo contrario será preciso utilizar conversores de interfaz; en función de la transformación a realizar dicho equipo será un simple cable adaptador, un adaptador pasivo no alimentado o bien un equipo con alimentación eléctrica relativamente complejo. La casuística aquí es tan diversa que nos llevaría demasiado tiempo comentar todas las posibilidades, y la mayoría de esta información resulta innecesaria en un curso de introducción a las redes de computadores.

Al hablar del nivel físico nos centraremos fundamentalmente en dos aspectos: por un lado la descripción de los medios físicos utilizados para transmitir los datos, fundamentalmente en forma de ondas electromagnéticas. Por otro lado describiremos los principios de funcionamiento del sistema telefónico destacando los aspectos que tienen interés desde el punto de vista de su utilización para el establecimiento de redes de ordenadores.

Los aspectos del nivel físico relacionados específicamente con las redes locales los trataremos al hablar de éstas en el capítulo 4.

2.2 TRANSMISIÓN DE DATOS: BASES TEÓRICAS

2.2.1 Módems y códecs

Cuando se envían datos por un canal de transmisión analógico (por ejemplo una línea telefónica de RTB) es preciso *modular* la señal en origen y *demodularla* en el destino; el aparato que realiza esta función se llama **módem**. Inversamente, cuando enviamos una señal analógica por un canal de transmisión digital tenemos que *codificarla* en origen y *decodificarla* en destino, para lo cual se utiliza un aparato denominado **códec**; por ejemplo un teléfono RDSI es un códec, ya que convierte una señal analógica (la voz humana) en digital, y viceversa; un sistema de videoconferencia digital (que es el caso de la mayoría de los sistemas de videoconferencia actuales) es un códec puesto que convierte una señal analógica (la imagen en movimiento captada por la cámara) en una señal digital (la secuencia de bits transmitida por RDSI u otro medio); también hay un códec presente en cualquier sistema de grabación digital de sonido (CD, Minidisc, dcc, DAT). Es frecuente referirse a los códecs como conversores analógico-digital o conversores A/D, aunque en telecomunicaciones suele preferirse la denominación códec.

Para digitalizar la señal el códec debe *muestrear* periódicamente la onda y convertir su amplitud en una magnitud numérica. Por ejemplo los sistemas de grabación digital del sonido en CD muestrean la señal de audio 44 100 veces por segundo (44,1 KHz) y generan para cada muestra un número entero de 16 bits que representa la amplitud de la onda. El número de bits elegido limita el número de valores de amplitud posibles, por lo que se ha de utilizar el más próximo (por ejemplo con 16 bits hay $2^{16}=65536$ posibles valores de amplitud); esto introduce una distorsión en la onda digitalizada que se conoce como error de cuantización.

2.2.2 Teorema de Nyquist

Cualquier canal de transmisión tiene un ancho de banda limitado. A continuación damos algunos ejemplos:

Canal de transmisión	Ancho de banda (KHz)
Línea telefónica	3,1
Emisión de radio de onda media (AM)	4,5
Emisión de radio de FM	75
Emisión de televisión PAL	8 000
Red local Ethernet 10 Mb/s	10 000
Emisión de televisión de alta definición	30 000

Tabla 2.1.- Ancho de banda de algunos medios de transmisión habituales.

Los bits se transmiten por un canal realizando modificaciones en la onda portadora; por ejemplo en una línea telefónica podríamos utilizar una frecuencia de 1 KHz para representar el 0 y una de 2 KHz para el 1, esto se conoce como modulación de frecuencia; si sincronizamos dos equipos para que puedan cambiar la frecuencia de la portadora cada 3,333 milisegundos podremos transmitir datos a 300 bits por segundo, (si dos bits consecutivos son iguales en realidad no hay tal cambio); decimos entonces que transmitimos 300 **símbolos** por segundo, o simplemente 300 **baudios** (pero no 300 baudios *por segundo*, al decir baudios ya se sobreentiende que es por segundo). Si en vez de dos frecuencias utilizamos cuatro, por ejemplo 0,5, 1, 1,5 y 2 KHz, podremos transmitir dos bits por símbolo, al disponer de cuatro estados o niveles posibles; así manteniendo el caudal de 300 símbolos por segundo transmitimos 600 bits por segundo; análogamente si utilizamos ocho estados podremos transmitir 900 bits por segundo (tres bits por símbolo), y así sucesivamente; ganamos en velocidad, pero a cambio tenemos que ser más precisos en la frecuencia ya que aumenta el número de valores posibles. Además de la frecuencia es posible modular la amplitud y la fase de la onda portadora; en la práctica los módems modernos modulan una compleja combinación de amplitud y fase para extraer el máximo provecho posible de las líneas telefónicas, es decir el máximo número de símbolos por segundo y el máximo número de bits por símbolo.

A pesar de la mejora en eficiencia conseguida con la sofisticación técnica los canales de transmisión tienen un límite. Ya en 1924 Nyquist observó la existencia de un límite fundamental en las transmisiones digitales sobre canales analógicos, que se conoce como **teorema de Nyquist**, y que establece que *el número máximo de baudios que puede transmitirse por un canal no puede ser superior al doble de su ancho de banda*. Así en el caso de la transmisión de datos por una línea telefónica, con un ancho de banda de 3,1 KHz, el máximo número de baudios que puede transmitirse es de 6.200.

Para comprender intuitivamente el Teorema de Nyquist imaginemos que codifica una información representando un bit por símbolo; para ello se elige un valor de amplitud de +1,0 V para representar el 1 y -1,0 V para el 0. La secuencia de bits a transmitir, que en principio es aleatoria, puede fluctuar entre dos situaciones extremas: transmitir siempre el mismo valor (11111... ó 00000...) o transmitir una secuencia alterna (010101...); la primera posibilidad genera una corriente continua de frecuencia 0 hertzios, mientras que la segunda produce una onda cuadrada de frecuencia igual a la mitad del número de bits transmitidos (ya que una onda completa estaría formada por dos bits, una cresta y un valle); la gama de frecuencias va pues de cero a la mitad del número de bits, con lo que la anchura de banda es igual a la mitad del número de bits transmitidos. Podríamos repetir el mismo razonamiento para el caso en que se transmita más de un bit por símbolo, es decir que haya más de dos posibles voltajes y veríamos como el ancho de banda correspondería a la mitad del número de símbolos por segundo.

El teorema de Nyquist no establece el número de bits por símbolo, que depende del número de estados que se utilicen.

Podemos expresar el teorema de Nyquist en forma de ecuación relacionándolo con el caudal máximo de información transmitida: si H es el ancho de banda y V el número de niveles o estados posibles, entonces el caudal máximo en bits por segundo C viene dado por:

$$C = 2 H \log_2 V$$

Por ejemplo, un canal telefónico ($H=3,1$ KHz) con tres bits por baudio (ocho estados, $V=8$) tiene un caudal máximo de 18,6 Kb/s.

Podemos calcular también la eficiencia de un canal de comunicación, E , que es la relación entre el caudal máximo y el ancho de banda:

$$E = C/H$$

Así en nuestro ejemplo anterior la eficiencia era de 6 bits/Hz.

Combinando las dos fórmulas anteriores podemos expresar de otra forma el Teorema de Nyquist:

$$E = 2 \log_2 V$$

Dicho de otro modo, la eficiencia máxima de un canal está fijada por el número de estados diferentes de la señal, o sea por la forma como se codifica ésta.

Debido a la relación directa que el teorema de Nyquist establece entre ancho de banda y capacidad de un canal es frecuente en telemática considerar ambas expresiones como sinónimos; así decimos por ejemplo que la transmisión de vídeo digital requiere un elevado ancho de banda queriendo decir que requiere una elevada capacidad de transmisión digital de información.

El teorema de Nyquist es bidireccional, es decir, también se aplica cuando se trata de una conversión analógico→digital. En este sentido establece que el muestreo de la señal analógica debe hacerse al menos con una frecuencia doble que la máxima frecuencia que se quiera captar. Por ejemplo, para que el códec de un teléfono RDSI pueda capturar la señal de audio sin mermar la calidad respecto a una línea analógica la frecuencia de muestreo deberá ser como mínimo de 6 KHz. En la práctica los teléfonos digitales muestrean a 8 KHz para disponer de un cierto margen de seguridad. Otro ejemplo lo constituyen los sistemas de grabación digital de alta fidelidad, que muestrean a 44,1 KHz, con lo que son capaces de captar sonidos de hasta 22 KHz lo cual excede la capacidad del oído humano (en la práctica suelen filtrarse todas las frecuencias superiores a 20 KHz). Cuando el teorema de Nyquist se aplica en este sentido se le suele denominar *teorema de muestreo de Nyquist*.

2.2.3 Ley de Shannon-Hartley

El Teorema de Nyquist fija un máximo en el número de símbolos por segundo, pero dado que no dice nada respecto al número de bits por símbolo la capacidad del canal en bits por segundo podría ser arbitrariamente grande utilizando una modulación capaz de transmitir un número lo bastante grande de bits por símbolo.

Sin embargo, a medida que aumenta el número de bits por símbolo se incrementa el número de estados diferentes que el receptor ha de poder discernir, y se reduce la distancia entre éstos. En canales muy ruidosos puede llegar a ser difícil distinguir dos estados muy próximos. Como cabría esperar, el número máximo de estados que el receptor pueda distinguir depende de la calidad del canal de transmisión, es decir de su relación señal/ruido. Ya en 1948 Shannon dedujo una expresión que cuantificaba la capacidad máxima de un canal analógico en función de su ancho de banda y su relación señal/ruido.

El valor de la relación señal/ruido se suele indicar en decibelios (dB), que equivalen a $10 \log_{10} S/N$ (así 10 dB equivalen a una relación S/R de 10, 20 dB a una relación de 100 y 30 dB a una de 1000). Dado que la percepción de la intensidad del sonido por el oído humano sigue una escala logarítmica la medida en decibelios da una idea más exacta de la impresión que producirá un nivel de ruido determinado (este parámetro es uno de los que se utilizan para medir la calidad de los componentes de un equipo de reproducción musical de alta fidelidad). En 1948 Shannon y Hartley generalizaron el teorema de Nyquist al caso de un canal de comunicación con ruido aleatorio, derivando lo que se conoce como la **ley de Shannon-Hartley**, que está expresada en la siguiente ecuación:

$$C = H \log_2 (1 + S/N)$$

De nuevo aquí H representa el ancho de banda y C el caudal de transmisión de la información. Por ejemplo, con un ancho de banda de 3,1 KHz y una relación señal-ruido de 36 dB obtenemos un caudal máximo de 37,1 Kb/s; 36 dB equivale a una relación señal /ruido de 4000 y es el valor máximo que puede obtenerse en una comunicación telefónica, ya que esta es la cantidad de ruido que introduce el proceso de digitalización de un canal telefónico que se utiliza actualmente en la mayoría de las redes telefónicas del mundo. Si la relación señal-ruido desciende a 20 dB (cosa bastante normal) la velocidad máxima baja a 20,6 Kb/s.

Si lo expresamos en términos de eficiencia obtendremos:

$$E = \log_2 (1 + S/N)$$

Vista de este modo la Ley de Shannon-Hartley establece una eficiencia máxima en función de la relación señal-ruido, independientemente del ancho de banda asignado al canal. Así por ejemplo, para una relación señal-ruido de 40 dB la eficiencia máxima teórica es de 13,3 bps/Hz.

Conviene destacar que tanto el teorema de Nyquist como la Ley de Shannon-Hartley han sido derivados en base a planteamientos puramente teóricos y no son fruto de experimentos; además de eso han sido verificados reiteradamente en la vida real. Por tanto su validez puede considerarse universal y los contraejemplos deberían tratarse con el mismo escepticismo que las máquinas de movimiento perpetuo. Haciendo un cierto paralelismo con la Termodinámica se podría decir que el Teorema de Nyquist equivale al primer principio de la Termodinámica (que postula la ley de conservación de la energía) y la Ley de Shannon-Hartley equivale al segundo principio, que establece que no es posible convertir totalmente en trabajo la energía térmica, o dicho de otro modo, que un motor nunca puede funcionar al 100% de eficiencia.

2.3 MEDIOS DE TRANSMISIÓN

El medio de transmisión es probablemente la parte más perdurable del diseño de una red. Esto unido a la existencia de múltiples opciones hace especialmente importante la acertada elección del medio de transmisión en el diseño de una red. Afortunadamente existen estándares de cableado que reducen a un pequeño número las posibilidades que merece la pena considerar. Como en cualquier diseño equilibrado de ingeniería para tomar una decisión acertada es necesario hacer una estimación objetiva de las necesidades actuales y futuras, y una valoración adecuada de las tecnologías disponibles tomando en cuenta su relación costo/prestaciones.

Ahora profundizaremos en los diversos medios de transmisión utilizados actualmente. El alumno debe tener en cuenta que éste es un campo muy dinámico en el que continuamente surgen nuevos productos y sistemas. Afortunadamente existen multitud de revistas que tratan con más o menos detalle las novedades que se producen en cuanto a medios de transmisión; los fabricantes de equipos suelen estar también bien informados de estos temas, y su literatura es una buena fuente de información. También puede encontrarse mucha información sobre este tema en Internet.

2.3.1 Cables metálicos

El cable metálico es el medio de transmisión más utilizado cuando se trata de cubrir distancias no muy grandes y/o se necesitan capacidades no demasiado elevadas. La información se transmite a través del cable en forma de ondas electromagnéticas, o sea corrientes eléctricas alternas de alta frecuencia. A los efectos que ahora nos ocupan la situación es prácticamente la misma tanto si los bits se transmiten de forma digital o analógica (es decir modulados en una señal portadora). El metal utilizado casi siempre es el cobre ya que combina una buena conductividad con un coste razonable.

2.3.1.1 Problemas de los cables metálicos

Como ya hemos visto por el Teorema de Nyquist cuando se quiere transmitir un caudal elevado de información es necesario en general utilizar un gran ancho de banda, lo cual conlleva el uso de frecuencias elevadas. Los principales problemas que se presentan al transmitir señales de elevada frecuencia en un cable de cobre son la atenuación, el desfase y la interferencia electromagnética. A continuación comentaremos cada uno de ellos en detalle.

Atenuación

Cualquier señal al propagarse por un medio de transmisión pierde potencia, es decir se atenúa con la distancia. En el caso del cable de cobre dicha atenuación se debe fundamentalmente a dos factores:

- **Resistencia del cable:** esto provoca la pérdida en forma de calor de parte de la energía de la señal original. Aunque afortunadamente la cantidad de energía perdida por este motivo no plantea problemas de calentamiento en las instalaciones, supone una parte importante de la atenuación introducida. Dado que la resistencia disminuye con el aumento de sección del cable la atenuación debida a esta causa es menor cuanto mayor es el grosor de éste. Las frecuencias elevadas se transmiten utilizando únicamente la superficie del cable, cuanto mayor es la frecuencia mas superficial es la propagación (este fenómeno se denomina a veces ‘efecto piel’); por tanto las frecuencias elevadas aprovechan peor la sección del cable y se atenúan mas rápido.
- **Emisión electromagnética al ambiente:** el cable por el que se propaga la onda electromagnética actúa como una antena emisora, por lo que parte de la energía se pierde en forma de emisión electromagnética al ambiente. Además de la atenuación que introduce esto impone un límite máximo en la potencia del emisor, puesto que es preciso respetar las limitaciones impuestas por las normativas en cuanto a emisión electromagnética al ambiente. La emisión electromagnética es también mayor cuanto mayor es la frecuencia de la señal. Los cables apantallados, en especial los coaxiales, producen una menor emisión electromagnética por lo que en general tiene una menor atenuación que los no apantallados. Además la atenuación será tanto menor cuanto mayor sea el grado de apantallamiento.

Como hemos visto, tanto por lo que se refiere a la resistencia como a la emisión electromagnética al ambiente la atenuación aumenta con la frecuencia. Como regla aproximada podemos decir que la atenuación para un cable dado es proporcional a la raíz cuadrada de la frecuencia de la señal transmitida.

Desfase

Cuando se propaga la onda electromagnética a través del medio la velocidad de propagación no es exactamente la misma a todas las frecuencias. El desfase es proporcional a la distancia recorrida; por otro lado el receptor será tanto más sensible al desfase cuanto mayor sea la velocidad con que se transmite la información. Por tanto el problema del desfase es mayor cuando se utiliza un canal con un gran ancho de banda para transmitir información a una gran velocidad y distancia. En muchos casos es posible transmitir a mayor distancia si se está dispuesto a reducir velocidad, e inversamente transmitir a mayor velocidad si se utiliza una distancia menor; por eso en algunos casos la capacidad de un medio de transmisión se expresa en términos de Mb/s * Km.

Interferencia Electromagnética

Además de emitir ondas electromagnéticas al ambiente el cable de cobre es también susceptible de recibir interferencias electromagnéticas del ambiente. Esto puede alterar la señal correspondiente a los datos transmitidos hasta un punto que la haga irreconocible. Este problema es menos grave en el caso del cable apantallado y raramente ocurre cuando se trata de cable coaxial. Para disminuir su efecto existe una serie de normativas y recomendaciones por ejemplo en cuanto a las distancias mínimas que debe haber entre el cableado de datos y el cableado de suministro de energía eléctrica.

Un tipo de interferencia electromagnética más difícil de evitar es el denominado crosstalk, que es la interferencia se produce entre señales que discurren simultáneamente por cables paralelos. El crosstalk es un problema sobre todo en cables de pares, por ejemplo entre las señales de ida y vuelta en un enlace Ethernet, o entre las señales de diferentes abonados en un mazo de cables telefónicos (bucles de abonado). El crosstalk es el fenómeno conocido como ‘cruce de líneas’ que a veces se da en la red telefónica, produciendo que oigamos una segunda conversación a lo lejos mientras mantenemos una comunicación telefónica. Un cierto grado de crosstalk es normal e inevitable en cualquier instalación y suele estar previsto en el diseño de los equipos; sin embargo en algunos casos se produce un crosstalk superior al máximo admisible, normalmente por defectos en el cableado. Los equipos de medida normalmente utilizados para verificar cableados permiten diagnosticar este tipo de problemas, llegando algunos incluso a indicar el punto o puntos del cable donde se encuentra el defecto.

2.3.1.2 Cable de pares

Este es el tipo de cable utilizado en la mayoría de las redes locales actuales y en el bucle de abonado del sistema telefónico. Consiste en un par de hilos de cobre aislados de alrededor de medio milímetro de diámetro. En las redes locales se utiliza casi siempre cable de cuatro pares. En el caso del sistema telefónico se pueden utilizar cables de hasta varios cientos de pares, en función del número de abonados a los que haya que atender. Los pares están trenzados entre sí formando una doble hélice, como una molécula de ADN, por lo que se le suele denominar cable de pares trenzados o TP (Twisted Pair). De esta forma se reduce la interferencia eléctrica que reciben de fuentes próximas (por ejemplo de los pares vecinos) y la que pueden emitir al exterior. Generalmente se utiliza el cable UTP (Unshielded Twisted Pair) que no está apantallado; más raramente se emplea cable apantallado, que se denomina STP (Shielded Twisted Pair); este cable es bastante voluminoso debido a la pantalla, lo cual encarece su precio y costo de instalación, por lo que existe una variante más barata en la que la pantalla está formada por papel de aluminio en vez de por malla de cobre; así se consigue reducir considerablemente el precio y el diámetro del cable (parámetro que determina en buena medida el costo de instalación); a este cable se le conoce como FTP (Foil Twisted Pair) o también ScTP (Screened Twisted Pair). Por último, en algunos cables se utiliza una pantalla global y otra individual para cada par. Generalmente la atenuación disminuye (y el precio aumenta) a medida que mejora el apantallamiento del cable.

La frecuencia y el caudal máximos que se pueden transmitir por cable de pares depende de múltiples factores: el grosor del cable, la distancia, el tipo de aislamiento, la densidad de vueltas de trenzado, etc. Como ejemplos de su utilización podemos mencionar Gigabit Ethernet, que transmite 1 Gb/s por cuatro pares (250 Mb/s por cada par) a distancias de hasta 100 m y ADSL que transmite 2 Mb/s por un solo par a distancias de hasta 5 Km.

Para edificios de oficinas existen unas normas que establecen la forma de hacer el cableado. El cableado realizado según esas normas se denomina cableado estructurado, y permite integrar voz (telefonía) y datos (red local). Esas normas son la EIA/TIA 568-A (que se sigue en Estados Unidos principalmente) y la ISO/IEC 11801 en Europa. Cuando se diseña un cableado es conveniente cumplir ambas normativas simultáneamente, ya que de esta forma se asegura una máxima compatibilidad con todos los fabricantes. La ventaja de seguir estas normas es que la mayoría de las tecnologías de red local funcionan sobre cableado estructurado, con lo que se evita el problema de tener que cambiar el cableado si se decide cambiar la tecnología utilizada en la red local. Una característica común a todos los sistemas de cableado estructurado es que la longitud máxima del enlace cuando se utiliza cable de pares es de 100m.

Las normativas de cableado estructurado clasifican los diferentes tipos de cable de pares trenzados en categorías de acuerdo con sus características para la transmisión de datos¹, las cuales vienen fijadas fundamentalmente por la densidad de trenzado del cable (número de vueltas por metro) y los materiales utilizados en el recubrimiento aislante. Conforme sube la categoría aumenta la densidad de vueltas y mejora la propagación de señales eléctricas de alta frecuencia (la atenuación disminuye). Por otro lado cuanto mayor es la frecuencia de la señal mayor es la atenuación y peor la propagación en un determinado cable. Por esta razón los estándares especifican valores límite de atenuación y varios otros parámetros para diversas frecuencias hasta una considerada la máxima admisible para cada categoría. En la tabla 2.2 aparecen las categorías actualmente definidas o en curso de definición, y las frecuencias máximas correspondientes.

¹ Las dos normativas (EIA/TIA 568-A e ISO/IEC 11801) coinciden bastante en la clasificación de las diversas categorías de cableado.

Categoría	Frecuencia máxima (MHz)	Vueltas/metro	Tipo cable	Tipo conector	Uso Ethernet (Mb/s)
1	No se especifica	0	UTP	RJ45	No se utiliza
2	1	0	UTP	RJ45	1
3	16	10-16	UTP	RJ45	10-100
4	20	16-26	UTP	RJ45	10-100
5	100	26-33	UTP	RJ45	100-1000
6	250 ⁽¹⁾		UTP	RJ45	¿4000?
7 (en desarrollo)	600		STP	Por decidir	¿10000?

⁽¹⁾La categoría 6 inicialmente estaba prevista hasta 200 MHz, pero se amplió hasta 250 MHz a petición del IEEE

Tabla 2.2.- Categorías de los cables de pares trenzados

Las categorías 1 y 2 no forman parte de las normativas de cableado estructurado y no se utilizan (de hecho no son UTP en sentido estricto, ya que carecen de trenzado). Para cableado estructurado actualmente están definidas las categorías 3, 4 y 5. El cable mas utilizado hoy en día es el de categoría 5, ya que su costo es solo un poco superior al de las categorías 3 y 4 y tiene unas prestaciones muy superiores.

La categoría 6 se encontraba en estado de ‘Committee draft’ en septiembre del 2000, por lo que su aprobación como ‘International Standard se producirá con toda probabilidad durante el 2001. La categoría 7 se encuentra actualmente en fase de discusión. La categoría 6 ha llevado ya prácticamente al límite de sus posibilidades al cableado UTP, por lo que será necesario utilizar cable STP para la categoría 7. Mientras que el cable categoría 6 es solo un poco más caro que el de categoría 5, el elevado costo del cable STP y de su instalación, comparable al de la fibra óptica, lo hace poco atractivo para el usuario final, por lo que es de esperar que cuando se aprueben las nuevas categorías el cable predominante en nuevas instalaciones sea el categoría 6.

La clasificación en categorías, además de aplicarse a un cable aislado se aplica a instalaciones ya hechas; a menudo sucede que una instalación hecha con cable categoría 5 no puede funcionar a 100 MHz debido a que el operario no ha puesto suficiente cuidado en la instalación: errores comunes son por ejemplo destrenzar una longitud excesiva en los conectores, apretar demasiado las bridas o doblar excesivamente el cable. A veces una instalación hecha con cable categoría 5 es utilizada inicialmente con redes de 10 Mb/s y funciona perfectamente, pero deja de funcionar cuando más tarde se utiliza el mismo cableado para montar una red de 100 Mb/s, que explota realmente al límite las posibilidades del cableado instalado.

La característica principal de un cable desde el punto de vista de transmisión de datos es su atenuación. A medida que aumenta la categoría del cable UTP disminuye la atenuación, ya que el mayor número de vueltas le da un mayor apantallamiento. La siguiente tabla muestra a título de ejemplo la atenuación de varios tipos de cable a diferentes frecuencias:

Frecuencia (MHz)	UTP Categoría 3	UTP Categoría 5	STP
1	2,6	2,0	1,1
4	5,6	4,1	2,2
16	13,1	8,2	4,4
25		10,4	6,2
100		22,0	12,3
300			21,4

Tabla 2.3.- Atenuación (en dB/100m) de distintos tipos de cable a diferentes frecuencias

2.3.1.3 Cable coaxial

El cable coaxial es otro medio de transmisión común. Su mejor apantallamiento le da una menor atenuación e inmunidad electromagnética, por lo que es más adecuado para grandes distancias y/o capacidades.

El cable coaxial esta formado por un núcleo de cobre rodeado de un material aislante; el aislante está cubierto por una pantalla de material conductor, que según el tipo de cable y su calidad puede estar formada por una o dos mallas de cobre, un papel de aluminio, o ambos. Este material de pantalla está recubierto a su vez por otra capa de material aislante. El cable coaxial debe manipularse con cuidado ya que por ejemplo un golpe o doblez excesivo pueden producir una deformación en la malla que reduzca el alcance del cable.

El cable coaxial más utilizado en la actualidad es el de 75Ω de impedancia también llamado *cable coaxial de banda ancha*, que no es ni más ni menos que el cable coaxial de antena de televisión. Se emplea en comunicaciones telefónicas como nivel intermedio entre el cable de pares y la fibra óptica. También es la base de las redes de televisión por cable. En redes locales se utiliza en algunos casos cuando se quiere tener gran capacidad sin recurrir al uso de fibra óptica.

En redes Ethernet antiguas se utiliza cable coaxial de 50Ω de impedancia denominado también cable coaxial de banda base puesto que la información digital se transmite directamente por el cable sin emplear una señal portadora. Salvo esta aplicación hoy en desuso este cable carece de interés.

Por su construcción el cable coaxial tiene una alta inmunidad frente al ruido, y puede llegar a tener unos anchos de banda considerables. En distancias de hasta 1 Km es factible llegar a anchos de banda de 1 GHz y capacidades de hasta 5 Gb/s.

2.3.2 Fibra óptica

Si hubiera que mencionar un factor como el principal causante del elevado desarrollo que han tenido las comunicaciones en los años recientes, ese sería seguramente la fibra óptica.

Recordemos que tanto el teorema de Nyquist como la ley de Shannon-Hartley establecen que la capacidad de un canal viene limitada por su ancho de banda, que a su vez está limitada por la frecuencia de la señal portadora. Así pues, si queremos aumentar la capacidad deberemos subir la frecuencia portadora; siguiendo por este camino llegamos a la luz visible. Para transmitir información mediante luz sólo necesitamos tres elementos: un emisor, un medio de transmisión, y un detector o receptor. El medio de transmisión es una fibra de vidrio ultrafina de unas pocas micras de diámetro. La transmisión por una fibra óptica normalmente es simplex; para conseguir comunicación full-duplex es necesario instalar dos fibras, una para cada sentido. Aunque la información se transmite en forma de pulsos luminosos los chips dentro de los conmutadores, routers, etc. siguen funcionando con corrientes eléctricas, por lo que los dispositivos emisor y detector han de convertir la información de un formato a otro; por este motivo se utiliza en ocasiones la denominación *optoelectrónica* para referirse a dichos dispositivos.

Para conseguir que la luz que sale del emisor sea 'capturada' por la fibra hasta su destino y no se pierda por difusión hacia el exterior se aprovecha una propiedad de las ondas conocida como *reflexión*, consistente en que cuando una onda pasa de un medio a otro es parcialmente reflejada hacia el primero, como si la superficie que separa ambos medios actuara como un espejo; la proporción en que la onda se refleja depende de los índices de refracción de ambos medios (una propiedad física característica de cada material relacionada con la velocidad de la luz en ese medio) y del ángulo de incidencia, a mayor ángulo mayor reflexión (el ángulo se mide referido a una línea perpendicular a la superficie de separación de ambos medios); cuando la luz pasa de un medio con mayor índice de refracción a uno con menor índice existe un ángulo de incidencia, conocido como *ángulo límite*, por encima del cual la luz se refleja totalmente. El fenómeno de reflexión es el mismo que provoca que un cristal actúe parcialmente como un espejo al reflejar una parte de la luz que recibe; todos hemos observado alguna vez como al mirar a través de un cristal de forma muy oblicua es imposible ver a través de él ya que el cristal refleja totalmente la luz que recibe; esto se debe a que se ha superado el ángulo límite. En el caso de la fibra óptica si el rayo de luz incide de forma suficientemente longitudinal como para no superar el ángulo límite 'rebotará' y

quedará 'atrapado' en la fibra, pudiendo así viajar grandes distancias sin apenas pérdidas. Si la fibra fuera un simple hilo de vidrio la superficie exterior podría actuar como superficie de reflexión, aprovechando que el aire tiene un menor índice de refracción que el vidrio, pero esto requeriría mantener una capa de aire en torno a la fibra, lo cual es mucho más complejo que simplemente rodearla de un vidrio de menor densidad (e índice de refracción menor); el vidrio interior con un índice de refracción mayor transporta el haz luminoso y el exterior actúa como 'jaula' para evitar que ésta escape.

Existen básicamente dos sistemas de transmisión de datos por fibras ópticas: los que utilizan LEDs (Light-Emitting Diode) y los que utilizan diodos láser. En los sistemas que utilizan LEDs la transmisión del pulso de luz (equivalente a un bit) genera múltiples rayos de luz al viajar por la fibra, pues se trata de luz normal no coherente; se dice que cada uno de estos rayos tiene un *modo* y la fibra que se utiliza para transmitir luz de emisores LED (luz no coherente) se denomina **fibra multimodo**. Por el contrario los diodos láser emiten luz coherente, generan un único rayo de luz y la fibra se comporta como un guía-ondas; la luz se propaga a través de la fibra en un solo modo, sin dispersión; por este motivo la fibra utilizada para luz láser se llama **fibra monomodo**. Las fibras monomodo se utilizan para transmitir a grandes velocidades y/o a grandes distancias.

Podemos comprender la diferencia en la propagación de la luz normal y la luz láser comparando el haz de luz generado por una linterna y el generado por un puntero láser; en la linterna el haz se abre en un cono más o menos ancho, mientras que en el puntero láser la apertura es prácticamente nula, es decir el haz mantiene la misma anchura independientemente de la distancia a la que se proyecte la luz. Este diferente comportamiento es el que produce múltiples haces (o modos) en un caso y solo uno en el otro.

Las fibras se especifican indicando el diámetro de la fibra interior o núcleo (la que transporta la luz) y el de la exterior o cubierta (la que actúa de barrera); las fibras multimodo típicas son de 50/125µm (núcleo de 50 µm y cubierta de 125 µm) y 62,5/125µm; a título comparativo diremos que un cabello humano tiene un diámetro de 80 a 100 µm. Las fibras monomodo suelen ser de 9/125 µm, es decir el núcleo es mucho más estrecho puesto que el haz no se dispersa (de hecho es del mismo orden de magnitud que la longitud de onda de la luz que transmite); la cubierta es de 125 µm como en una fibra multimodo.

El vidrio no absorbe igual todas las longitudes de onda, es decir no es igual de 'transparente' a todos los colores. Cuando se utilizan fibras ópticas para transmitir información se intenta utilizar las longitudes de onda para las que presentan una menor absorción, ya que la menor absorción supone una menor atenuación y por tanto un mayor alcance. En particular las longitudes de onda de menor atenuación se encuentran situadas alrededor de los 850, 1310 y 1550 nm y se conocen como primera, segunda y tercera ventana, respectivamente. Todas las ventanas se encuentran en la zona infrarroja del espectro (la parte visible se encuentra entre 400 y 760 nm). Como podemos ver en la figura 2.1 y en la tabla 2.4 las ventanas que se encuentran a mayores longitudes de onda tienen menor atenuación; sin embargo la menor atenuación va acompañada de un mayor costo de la optoelectrónica necesaria.

Los picos de atenuación que aparecen a 0,9, 1,2 y 1,4 micras se deben a la absorción producida por el ión hidroxilo, consecuencia de cantidades residuales de agua en el proceso de fabricación del vidrio. La mejora en las técnicas de producción de fibras ópticas está ampliando continuamente estas ventanas. La segunda ventana tiene una anchura de 18 THz (THz = 1 TeraHertzio = 1000 GHz = 10¹² Hz), y la tercera una anchura de 12,5 THz. Suponiendo una eficiencia de 1 bps/Hz la segunda y tercera ventanas suministrarían un ancho de banda de 30 Tbps.

A modo de ejemplo damos a continuación la atenuación típica de los tipos de fibra más comunes:

Tipo de fibra	Diámetro del núcleo (µm)	Diámetro de la funda (µm)	Atenuación (dB/Km)		
			850 nm	1300 nm	1500 nm
Monomodo	5,0	85 o 125	2,3		
Monomodo	8,1	125		0,5	0,25
Multimodo	50	125	2,4	0,6	0,5
Multimodo	62,5	125	3,0	0,7	0,3
Multimodo	100	140	3,5	1,5	0,9

Tabla 2.4.- Atenuación de diferentes tipos de fibra en las diversas ventanas

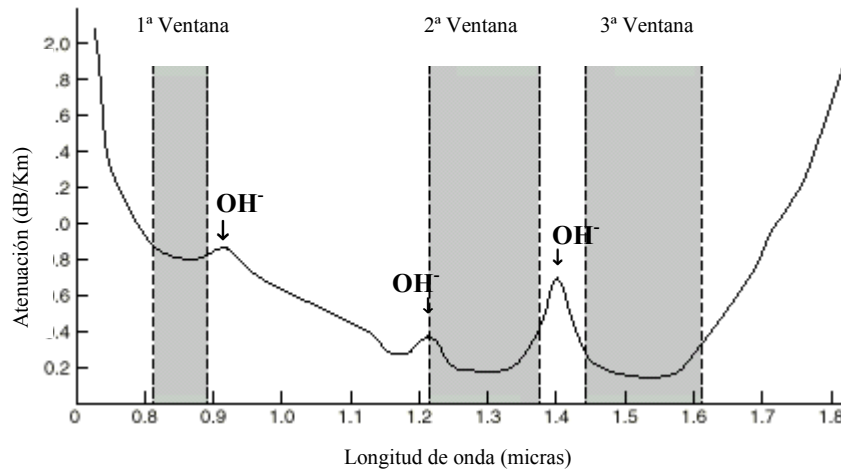


Figura 2.1.- Atenuación de la fibra de vidrio en función de la longitud de onda

La fibra óptica es un medio de transmisión extremadamente eficiente. En el caso de tercera ventana (atenuación de 0,25 dB/Km) se produce una atenuación de 2,5 dB en 10 Km, lo cual equivale a reducir la señal original aproximadamente a la mitad de su potencia. En comparación un cable UTP-5 transmitiendo una señal de 62,5 MHz (la frecuencia utilizada por 100BASE-TX) tiene una atenuación de 17 dB en 100m, es decir que pierde el 98% de la potencia en un trayecto cien veces menor.

Cuando se interconectan equipos mediante fibras ópticas multimodo, si utilizan luz normal (no láser) en primera ventana es posible averiguar cual es el lado transmisor simplemente mirando el extremo de ambas fibras y viendo cual de ellas emite luz. **Esto nunca debe hacerse cuando el emisor es láser (como es siempre el caso cuando se trata de fibras monomodo) ya que la luz láser es perjudicial para la vista,** y además al tratarse de una emisión infrarroja en una banda muy estrecha el ojo no aprecia luz alguna, con lo que el daño puede ser aún mayor.

Normalmente en redes locales, con distancias no superiores a 2 Km, se utilizan fibras multimodo con emisores LED no láser de primera o segunda ventana. Estos equipos son más baratos que los láser, tienen una vida más larga, son menos sensibles a los cambios de temperatura y más seguros. A muy altas velocidades (por encima de 400-600 Mb/s) es necesario utilizar emisores láser, ya que los emisores de luz normal no pueden reaccionar con la rapidez suficiente. Por eso en algunas redes locales (Gigabit Ethernet, Fibre Channel y ATM) se utilizan emisores láser de primera ventana cuando se quiere gran velocidad pero no se requiere gran alcance. Dado que los cableados de red local no disponen normalmente de fibra monomodo se ha extendido en los últimos años el uso de emisores láser en fibra multimodo, principalmente para Fibre Channel y Gigabit Ethernet. Este, que podemos considerar un uso atípico, lo comentaremos en más detalle al hablar de redes locales.

En redes de área extensa siempre se utiliza fibra monomodo y emisores láser. Actualmente en segunda ventana se puede llegar a distancias de 40 Km y en tercera hasta 160 Km sin amplificadores intermedios. El mayor costo de los emisores se ve en este caso sobradamente compensado por la reducción en equipos intermedios (amplificadores y regeneradores de la señal).

Las tecnologías de red local llegan a velocidades de transferencia de hasta 1 Gb/s sobre fibra óptica (Gigabit Ethernet por ejemplo). En redes de área extensa el mayor costo de la fibra estimula su mejor aprovechamiento, por lo que se llega actualmente a velocidades de 2,5 y 10 Gb/s.

Para mejor aprovechar las fibras ópticas de largo alcance en años recientes se ha extendido una nueva técnica consistente en utilizar varias longitudes de onda por fibra en una misma ventana (normalmente la tercera) mediante lo que se conoce como multiplexación por división en longitud de onda (WDM, Wavelength Division Multiplexing). En una experiencia hecha en 1996 Fujitsu consiguió transmitir 55 canales independientes (a diferentes longitudes de onda) por una fibra monomodo utilizando tercera ventana; cada canal tenía una anchura de 0,6 nm y transportaba una señal de 20 Gb/s, con lo que la

capacidad total de la fibra era de 1,1 Tb/s. Actualmente ya hay sistemas que permiten enviar 32 haces de 10 Gb/s cada uno por una misma fibra, dando un rendimiento total de 320 Gb/s. Para poder utilizar WDM el emisor debe ajustarse con mucha precisión, los amplificadores han de actuar sobre todo el rango de longitudes de onda de la manera más lineal posible, y en el lado receptor se ha de descomponer la señal en los canales originales, también de forma muy precisa.

Para la interconexión de fibras ópticas se utilizan tres sistemas: conectores, empalmes y soldaduras. Los conectores ofrecen máxima versatilidad pues pueden ser manipulados a voluntad por cualquier persona; sin embargo introducen una pérdida de la señal de 0,5 dB aproximadamente (un 10%). El empalme consiste en unir y alinear los extremos con cuidado; pierde 0,2 dB (un 5%) y lo puede realizar en unos cinco minutos una persona entrenada. La soldadura o fusión tiene una pérdida de señal muy pequeña, pero ha de llevarla a cabo un técnico especializado con equipo altamente sofisticado.

En una comunicación por fibra óptica el emisor transmite con una potencia determinada; por otro lado la sensibilidad del receptor fija la potencia mínima con que debe llegar la señal para que la información se pueda interpretar de manera fiable. Tanto la potencia como la sensibilidad suelen indicarse en una unidad llamada dBm (decibelios-milivatios), que se calcula de la siguiente manera:

$$\text{potencia (dBm)} = 10 \log (P)$$

donde P es la potencia en milivatios. Por ejemplo un emisor con una potencia de 1 milivatio equivale a 0 dBm y un receptor con una sensibilidad de un microvatio equivale a -30 dBm.

Un emisor LED tiene una potencia típica de entre -10 y -25 dBm, y uno láser entre 0 y -13 dBm. La sensibilidad es de -20 a -35 dBm en detectores LEDs y de -20 a -45 dBm en láser.

A menudo los fabricantes dan cifras orientativas del alcance de sus equipos, como por ejemplo que la distancia máxima en fibra multimodo es de 2 Km o en monomodo de 15 a 30 Km. Estos valores suelen ser muy conservadores y no dar problemas, pero si hay muchos conectores o empalmes en el trayecto, o si se quieren superar las distancias especificadas por el fabricante, es importante realizar cálculos detallados que nos permitan predecir si el enlace funcionará o no. Para realizar dichos cálculos es necesario conocer la potencia del emisor, la sensibilidad del receptor, y la atenuación debida al trayecto, la cual a su vez depende de la distancia, de la atenuación característica de la fibra y del número de empalmes y conectores del trayecto; una vez sabidos todos estos datos es posible realizar cálculos de lo que se conoce como el 'power budget' o balance de potencia, que nos permitirá determinar si el enlace es o no posible. A la atenuación del trayecto se le suma además 1,5 dB para compensar otros factores que no detallaremos

Por ejemplo supongamos que en una instalación utilizamos fibra multimodo, emisores LED de -15 dBm de potencia, receptores de -25 dBm de sensibilidad y tenemos dos parejas de conectores en el trayecto, y queremos saber cual es la distancia máxima a la que funcionará el enlace; como tenemos una diferencia de 10 dB entre el emisor y el receptor, y perdemos 2,5 dB (0,5 dB por cada par de conectores más 1,5 de otros factores) podremos resistir una pérdida de 7,5 dB en la fibra, equivalente a una distancia de 7,5 Km. Esta sería la distancia máxima teórica; en la práctica se suele añadir un factor de seguridad a estos cálculos reduciendo los valores al menos en un 30% para tomar en cuenta los efectos de cambios de temperatura, envejecimiento del material, defectos en la instalación mecánica, etc.

Cuando se transmite un pulso por una fibra multimodo los rayos se reflejan múltiples veces antes de llegar a su destino, con ángulos diversos (todos por encima del ángulo límite, pues de lo contrario se perderían) lo cual hace que la longitud del trayecto seguido por los rayos que forman el pulso no sea exactamente igual para todos ellos; esto produce un *ensanchamiento* del pulso recibido, conocido como **dispersión**, que limita la velocidad de transferencia, ya que el emisor no puede enviar los pulsos con la rapidez que en principio podría; la dispersión es función de dos factores: la frecuencia (que normalmente podemos considerar similar al caudal) y la longitud de la fibra, y se calcula como el producto de ambas magnitudes, así por ejemplo una fibra de 2 Km que transmita a 155 Mb/s (equivalente a 155 MHz) tendrá una dispersión de 310 MHz*Km. Con las fibras, emisores y receptores actuales la dispersión máxima tolerable es de 500 MHz*Km; por ejemplo, si se transmite con fibras multimodo a 622 Mb/s (que es la velocidad máxima que suele utilizarse con este tipo de fibras) la distancia máxima que puede utilizarse está limitada a 800 metros por el efecto de dispersión ($500\text{MHz}\cdot\text{Km}/622\text{MHz} = 0,8\text{Km}$). A 155 Mb/s esta distancia es de 3,2 Km, y a 100 Mb/s de 5 Km. La dispersión explica porqué en distancias grandes se utiliza siempre fibra monomodo. En ocasiones se habla con cierta ligereza de la capacidad 'casi ilimitada'

de las fibras ópticas; conviene destacar que dicha capacidad solo es posible, al menos hoy en día, con fibras monomodo. Actualmente se esta trabajando en el desarrollo de pulsos con una forma especial de manera que los efectos de dispersión se cancelen mutuamente. Estos pulsos se llaman *solitones* y son un campo muy activo de investigación.

2.3.3 Comparación de fibra óptica y cable metálico

A menudo en el diseño del cableado de una red local es necesario elegir entre fibra óptica o cable de cobre, ya que la mayoría de los sistemas de red local admiten el uso de ambos medios. En la mayoría de los casos las únicas opciones que vale la pena considerar son el cableado de cobre UTP categoría 5 y la fibra óptica multimodo 62,5/125 (salvo que por distancia tuviéramos que usar fibra monomodo); el cable UTP-5 permite llegar hasta 100-150m dependiendo de la velocidad y la fibra multimodo hasta 0,5-2 Km también en función de la velocidad. Aparte de las consideraciones de distancia se recomienda utilizar fibra cuando se da alguna de las siguientes circunstancias:

- El cableado une edificios diferentes; en este caso el uso de cable de cobre podría causar problemas debido a posibles diferencias de potencial entre las tierras de los edificios que podrían provocar corrientes inducidas en el cable. Además se podría ver muy afectado por fenómenos atmosféricos.
- Se desea máxima seguridad en la red (el cobre es más fácil de interceptar que la fibra).
- Se atraviesan atmósferas que pueden resultar corrosivos para los metales
- Se sospecha que puede haber problemas de interferencia eléctrica por proximidad de motores, luces fluorescentes, equipos de alta tensión, etc.

Para evaluar la necesidad o no de instalar fibra para evitar las interferencias producidas por la red eléctrica existe una serie de recomendaciones sobre la distancia mínima a mantener en el caso del cableado UTP que hemos recopilado en la Tabla 2.5.

	Potencia (en KVA)		
	Menos de 2	Entre 2 y 5	Mas de 5
Líneas de corriente o equipos eléctricos no apantallados	13 cm	30 cm	60 cm
Líneas de corriente o equipos no apantallados próximos a cables de tierra	6 cm	15 cm	30 cm
Líneas apantalladas (p. Ej. dentro de tubo metálico con toma de tierra)	0 cm	15 cm	30 cm
Transformadores y motores eléctricos	1 m	1 m	1 m
Tubos fluorescentes	30 cm	30 cm	30 cm

Tabla 2.5.- Separación mínima recomendada entre líneas de alimentación eléctrica y cables de datos UTP. Se supone que la tensión en las líneas eléctricas es menor de 480 voltios.

Cuando no se dé alguna de las razones que aconsejan utilizar fibra es recomendable utilizar cobre, ya que es más barato el material, la instalación y las interfaces de conexión de los equipos; además es más fácil realizar modificaciones en los paneles de conexión, empalmes, etc. A título ilustrativo damos en la tabla 2.6 algunos precios de instalación de cableado de diversos tipos.

	UTP categoría 5	FTP categoría 5	STP categoría 5	Fibra
Costo material	118 Pts/m	139 Pts/m	226 Pts/m	251 Pts/m
Mano de obra	94 Pts/m	98 Pts/m	104 Pts/m	105 Pts/m
Total cableado	212 Pts/m	237 Pts/m	330 Pts/m	356 Pts/m
Interfaz ⁽¹⁾	102000 Pts	102000 Pts	102000 Pts	134000 Pts multimodo 561000 Pts monomodo

⁽¹⁾Representa el costo típico de una interfaz de ese tipo en un conmutador ATM.

Tabla 2.6.- Coste aproximado de cableados UTP, FTP, STP y de fibra óptica

No obstante al diseñar una nueva instalación es importante tomar en consideración todos los factores, incluidas las futuras modificaciones o ampliaciones que se puedan producir y que requieran el uso de un cableado diferente.

En general en una instalación grande se utiliza fibra para los tendidos principales (uniones entre edificios y cableado vertical para distribución por plantas dentro del edificio) y cobre para el cableado horizontal (distribución de red a los despachos) y quizá también para el cableado vertical (junto con la fibra) si las distancias entre los armarios así lo aconsejan.

Un aspecto importante a tener en cuenta en un diseño de cableado es que suele ser más eficiente desde el punto de vista del mantenimiento posterior y más barato en la instalación inicial poner pocos armarios de cableado grandes que muchos pequeños. Esto aconseja diseñar el reparto de los armarios de un edificio como una serie de esferas con radio de 100 metros, colocando en el centro de cada esfera un armario; el conjunto de todas las esferas debe abarcar todo el edificio, es decir no debe quedar ningún punto del mismo a más de 100 m de algún armario. El diseño óptimo de cableado es aquel que cumpliendo la condición anterior consigue minimizar el número de armarios.

2.3.4 Transmisión inalámbrica

Hasta aquí hemos visto como las ondas eléctricas transmitidas por hilos de cobre, o las ondas luminosas transmitidas por fibras ópticas, nos permitían transportar bits. En realidad las ondas eléctricas y luminosas son dos tipos de ondas electromagnéticas. Ahora vamos a ver como se utilizan esas mismas ondas electromagnéticas para transmitir bits cuando se propagan por el aire y no las mantenemos cautivas en un hilo de cobre o de vidrio. Este tipo de enlaces tiene interés cuando se trata de establecer una conexión con un ordenador en movimiento, o cuando se quiere realizar una conexión entre ordenadores sin tender cableado, bien por razones de rapidez, provisionalidad, estética o imposibilidad física.

2.3.4.1 El espectro electromagnético

La zona del espectro electromagnético que tiene interés para la transmisión de datos incluye las partes denominadas radiofrecuencia (10 KHz a 300 MHz), microondas (300 MHz a 300 GHz), e infrarroja (300 GHz a 400 THz). Cuando se trata de radiofrecuencia o microondas es normal referirse a las ondas por su frecuencia, en cambio cuando se habla del infrarrojo se suele utilizar la longitud de onda. Recordemos que ambas magnitudes están relacionadas entre sí por la fórmula:

$$\lambda f = c$$

donde λ es la longitud de onda, f la frecuencia y c la velocidad de la luz en el vacío. Así por ejemplo, una onda de 30 GHz, que corresponde a la zona de microondas, tiene una longitud de onda de 1 cm.

Las características de transmisión de las ondas en el aire dependen en gran medida de la frecuencia de la onda que se transmite. En la zona de radiofrecuencias el comportamiento es poco direccional y las ondas pueden atravesar obstáculos de cierto tamaño sin dificultad. Por ello se utiliza esta parte del espectro para emisiones de radio principalmente. Conforme nos acercamos a las microondas la transmisión es cada vez mas direccional y sensible a los obstáculos; a partir de 100 MHz la transmisión se hace en línea recta y los obstáculos (un edificio o una montaña) impiden la comunicación; a partir de unos 10 GHz incluso la

lluvia absorbe parte de la potencia, reduciendo la señal recibida (este es justamente el principio de funcionamiento de los hornos de microondas). Por último en el infrarrojo (a partir de unos 500 GHz) el comportamiento es completamente direccional y la absorción por fenómenos meteorológicos como la niebla o la contaminación es notable, por lo que sólo pueden realizarse transmisiones a corta distancia y con buenas condiciones meteorológicas.

En la práctica el rango de frecuencias más utilizado para la transmisión de datos es el de las microondas porque permite elevadas velocidades de transmisión dado su ancho de banda, tienen un alcance razonable y está relativamente exento de interferencias de los fenómenos más comunes. La elevada direccionalidad impone la condición de visión directa, lo cual obliga a instalar repetidores cuando se cubren grandes distancias, pero es también una ventaja ya que permite disponer de la misma frecuencia en haces próximos sin interferencia, y concentrar la potencia de emisión en un solo sentido. Antes de la aparición de las fibras ópticas las microondas eran el sistema preferido por las compañías telefónicas para cubrir grandes distancias con anchos de banda elevados; aún hoy en día se basa en este sistema buena parte de la infraestructura, ya que es barato y efectivo. Es bastante típico utilizar radioenlaces de 2, 34 y 140 Mb/s. Por ejemplo la red de Retevisión en España (utilizada para las señales de televisión) está formada por un total de 47.000 Km de circuitos digitales de radioenlaces de microondas de 140 Mb/s.

A frecuencias más bajas se realizan comunicaciones de baja velocidad; equipos conocidos como radio-módems permiten realizar una conexión de 9,6 Kb/s por un canal de radio. Los radioaficionados utilizan sus sistemas de transmisión para transmitir paquetes IP constituyendo actualmente una parte importante de la Internet; sin embargo, debido a la poca anchura de las bandas asignadas a estos fines, a la poca potencia de los emisores y a la gran cantidad de interferencia las velocidades que se obtienen son muy bajas; además su uso con fines comerciales está prohibido.

Para evitar el caos en las emisiones de radio la asignación de frecuencias está sujeta a unas normas internacionales dictadas por la ITU-R, y en cada país existe un organismo encargado de asignar las frecuencias que pueden utilizarse (esto sólo rige para la radiofrecuencia y las microondas, la luz infrarroja no lo requiere debido a su elevada direccionalidad y corto alcance). En España el organismo encargado de la asignación de frecuencias era hasta 1997 la hoy extinta DGTEL (Dirección General de Telecomunicaciones). Generalmente se aplica una política altamente restrictiva en la asignación de frecuencias ya que se las considera un bien escaso, por lo que sólo se conceden a empresas portadoras (Telefónica, Airtel, Retevisión, etc.) y a servicios públicos y de emergencia (Correos y Telégrafos y Protección Civil por ejemplo). Como excepción a lo anterior se puede utilizar sin autorización la banda comprendida en el rango de 2,400 a 2,484 GHz, denominada banda Industrial/Científica/Médica, cuando se utilizan emisores homologados cuya potencia no supere los 100 mW; existen en el mercado equipos de estas características que con una antena yagui altamente direccional (parecida a las antenas de recepción de televisión) permiten establecer enlaces de 2 Mb/s a distancias de hasta 4 a 6 Km. La Universidad de Valencia tiene una pareja de estos equipos enlazando dos edificios en el campus de Blasco Ibáñez. Esta banda es utilizada también por algunas LANs inalámbricas; en estos casos si se quiere tener movilidad se utilizan antenas omnidireccionales (aunque es preciso mantener la visión directa con el emisor, o de lo contrario el alcance se reduce bastante). Estos equipos de transmisión de datos por radio incorporan sofisticados sistemas y protocolos propios de bajo nivel que aseguran una transmisión fiable de la información aun en ambientes ruidosos desde el punto de vista radioeléctrico.

La radiación infrarroja también puede utilizarse para transmitir datos a través del aire, igual que se utiliza el mando a distancia para transmitir órdenes al televisor. La direccionalidad es casi absoluta, como cabría esperar de una onda luminosa; también es muy buena la relación señal-ruido; el único inconveniente es que el alcance es relativamente pequeño, lo cual la convierte en un buen sistema para una LAN inalámbrica. Los sistemas de transmisión por luz infrarroja también pueden enlazar edificios separados por distancias cortas (máximo 1 Km) con velocidades que pueden llegar a los 155 Mb/s. La Universidad de Valencia tuvo durante bastante tiempo uno de estos enlaces uniendo dos edificios situados a ambos lados de la Avenida de Blasco Ibáñez; podemos considerar el equipo de transmisión en este caso como una fibra óptica 'virtual' que une ambos edificios por arriba.

2.4 EL SISTEMA TELEFÓNICO CLÁSICO

Actualmente existen en el mundo aproximadamente mil millones de teléfonos. No es extraño pues que ya en las primeras redes de ordenadores se intentara utilizar este medio de transmisión, dada su ubicuidad. Prácticamente todas las tecnologías de redes de área extensa se basan en el sistema telefónico. La red telefónica está optimizada para la transmisión de la voz humana, ya que hasta fechas recientes éste constituía la mayor parte del tráfico (este es el caso todavía en muchas partes del mundo, aunque en los países más avanzados el tráfico de datos comienza a ser mayoritario). En este apartado veremos los principios básicos de diseño y las características principales del sistema telefónico para mejor comprender su utilización como medio para la interconexión de ordenadores. Aparte del interés que tiene el sistema telefónico desde el punto de vista estrictamente telemático es también interesante su conocimiento ya que generalmente en las empresas de pequeño y mediano tamaño la persona que se ocupa de la red de datos también tiene responsabilidades en la red telefónica. Por otro lado cada vez se difumina más la barrera entre ambos tipos de redes, como es el caso por ejemplo cuando se utiliza una red ATM o una red IP (Voz sobre IP) para interconectar centrales telefónicas.

2.4.1 Estructura del sistema telefónico

Desde hace más de un siglo el sistema telefónico se basa en el uso de centrales que conmutan las llamadas entre diversos abonados, y pares de hilos de cobre (también llamados bucles de abonado) que unen a cada abonado con la central. Las centrales se organizan en niveles jerárquicos; dos abonados de un mismo barrio probablemente estén conectados a la misma central; si son de barrios diferentes de la misma ciudad estarán conectados en centrales distintas, que estarán conectadas directamente entre sí o bien a través de una tercera de rango superior a la que ambas están conectadas. Pueden llegar a existir hasta cinco niveles en esta jerarquía. El sistema de numeración telefónico refleja en cierta medida esta estructura, todos hemos observado como cuanto más próximos están dos abonados más parecidos son sus números). Este tipo de organización permite la comunicación entre cualquier par de abonados con un número razonable de saltos y de interconexiones; la complejidad de la red crece de forma casi lineal con el número de abonados; si cada abonado tuviera que tener una conexión directa con cualquier otro abonado la complejidad de la red crecería de forma factorial y se haría inmanejable con tan solo unas pocas decenas de abonados.

Las conexiones de los abonados con su central se hacen por un único par de hilos de cobre, pero no se tiende un nuevo par cada vez que un usuario se abona al servicio; en su lugar se tienden mangueras con muchos pares desde la central por todas las manzanas y calles a las que dará servicio, en previsión de que más tarde haya viviendas que soliciten darse de alta; cuando un usuario quiere darse de alta y se encuentra en una zona que se ha quedado sin pares libres su conexión tarda bastante más de lo normal ya que la compañía telefónica ha de tender mangueras nuevas para cubrir esa zona. Si se produce una avería el usuario afectado queda sin servicio hasta que el par se repara o se sustituye por otro (si es que quedan pares libres en la manguera correspondiente). Las conexiones entre centrales, al ser menores en número y más críticas, se suelen hacer redundantes, conectando por ejemplo una central a otras dos de forma que si falla una conexión el tráfico pueda reencaminarse por la otra. Las conexiones entre centrales pueden hacerse por cable de pares, cable coaxial, fibra óptica, microondas o enlaces vía satélite, dependiendo de los medios disponibles, la distancia y el número de conversaciones simultáneas que se quiera mantener entre ambas centrales.

El bucle de abonado suele tener una longitud de 1 a 10 Km, según se trate de área urbana o rural. El principal activo que tienen las compañías telefónicas en todo el mundo es el cobre que tienen en sus bucles de abonado; en una ocasión se calculó el valor del cobre de AT&T y se estimó que sumaba el 80% del valor total de la compañía. Si todo el hilo de cobre existente en bucles de abonado en el mundo se pusiera junto se podría ir y venir a la luna mil veces.

Cuando un abonado llama por teléfono a alguien que depende de su misma central se interconectan ambos bucles de abonado y el circuito permanece establecido hasta que cuelgan. Dado que la conexión se realiza en la misma central la cantidad de recursos empujados en la comunicación es pequeña. Cuando el destinatario de la llamada está en otra central se sigue un proceso más complejo, ya que la central ha de conectar con la otra a través de una *línea troncal*; normalmente las líneas troncales no están saturadas, pero en situaciones excepcionales (por ejemplo cuando ocurre alguna catástrofe) pueden estarlo, con lo

que las llamadas excedentes han de esperar. Cuanto más lejana es la comunicación más líneas troncales se atraviesan, mayor es la probabilidad de encontrar alguna saturada y mayor es el consumo de recursos producido por la comunicación.

Las frecuencias transmitidas en una conversación telefónica se encuentran entre 300 y 3.400 Hz aproximadamente, por lo que su ancho de banda es de 3,1 KHz². Esta ha sido probablemente la decisión más trascendental de la Telemática, ya que como veremos ha marcado todas las decisiones clave tomadas posteriormente. Se eligió un ancho de banda reducido porque se pensó únicamente en transmitir la voz humana, con un planteamiento minimalista. Analizando la distribución espectral de la energía de la voz humana típica se consideró que este ancho de banda era el mínimo necesario para que la voz fuera inteligible en el extremo remoto. Con canales estrechos es posible multiplexar más conversaciones en un ancho de banda determinado, lo cual supone un ahorro de recursos y es especialmente interesante en largas distancias; además del ahorro que en sí mismo supone el canal estrecho el oído humano es entonces más tolerante a las distorsiones que cuando se utiliza un canal mas ancho, como puede verse en la tabla 2.7.

Ancho de banda (KHz)	Distorsión perceptible (%)	Distorsión molesta (%)
3	> 1,4	> 18-20
5	> 1,2	> 8,0
10	> 1,0	> 4,0
15	> 0,7	> 2,6

Tabla 2.7: Sensibilidad del oído humano a la distorsión en función del ancho de banda

Antiguamente las conversaciones se transmitían por la red telefónica de manera totalmente analógica extremo a extremo. A menudo era necesario atravesar múltiples centrales, y cuando las distancias entre éstas eran grandes había que poner amplificadores intermedios para regenerar la señal. En una conversación a larga distancia se atravesaban multitud de equipos, cada uno de los cuales añadía un poco de distorsión y ruido. Otro problema de la comunicación analógica era que en largas distancias, en que se solían multiplexar muchas conversaciones sobre un mismo cable, cada vez que se quería extraer una de ellas era necesario desmultiplexarlas todas, extraer la que interesaba y multiplexar el resto hasta el nuevo destino; esto añadía una considerable complejidad y coste a los equipos y reducía aun mas la calidad de la señal.

Hacia finales de los años cincuenta estaba bastante claro que la solución a todos estos problemas estaba en la transmisión digital de la señal. Como llegar de forma digital hasta el abonado era bastante costoso, pues requería entre otras cosas cambiar el teléfono por uno considerablemente más complejo y caro, se optó a partir de los años sesenta por introducir la tecnología digital primero en las centrales principales de las que dependían los enlaces troncales de larga distancia en los que el beneficio era mayor; gradualmente la transmisión digital se fue propagando hacia las centrales de niveles inferiores, hasta llegar a la situación actual en la que normalmente solo el bucle de abonado es analógico (RDSI no es mas que el paso siguiente, lógico por otra parte, en esta evolución, al utilizar la transmisión digital incluso en el bucle de abonado).. La digitalización completa de la red telefónica entre centrales permite hoy en día ofrecer al usuario de teléfono analógico servicios propios de redes digitales, tales como identificación del número llamante.

Como ya hemos dicho al hablar del Teorema de Nyquist la digitalización del teléfono se realiza muestreando la señal con una frecuencia de 8 KHz; de esta forma es posible captar un ancho de banda de 4 KHz, que corresponde a los 3,1 KHz del canal telefónico mas una banda de seguridad de 450 Hz a cada lado que lo separa de los canales contiguos. Cada muestra es digitalizada en un valor de 8 bits (en algunos casos en América se utilizan 7 bits); dado que el muestreo genera 8 bits 8.000 veces por segundo una conversación digital ocupa 64 Kb/s (56 Kb/s en el caso de utilizar 7 bits por muestra). Todos los equipos telefónicos digitales del mundo trabajan con una frecuencia base de 8 KHz, es decir, todos los eventos ocurren cada 125 µs, tanto si se trata de una línea de 64 Kb/s como si es una de 10 Gb/s. Este es

² Estas son las características del canal telefónico en la mayoría de los países, pero hay algunas excepciones. Por ejemplo en Estados Unidos la frecuencia máxima es de 3.300 Hz., y en algunos casos la frecuencia máxima es incluso de 3.200 Hz (la frecuencia mínima se mantiene siempre en 300 Hz).

probablemente el único parámetro en telefonía en que hay acuerdo en todo el mundo, aparte del ancho de banda de 3,1 KHz del canal de voz, del cual los 8 KHz son una simple consecuencia como ya hemos visto. Merece la pena destacar que en Telemática 64 Kb/s significa 64.000 bits por segundo, no 65.536 ($64 \cdot 1024$) como sería normal en informática; esto es consecuencia a su vez del hecho de que la frecuencia de muestreo sea 8 KHz, no 8,192 KHz; también de aquí se deriva el que siempre que se especifiquen caudales o velocidades los prefijos Kilo, Mega, Giga, etc. tengan el significado métrico (10^3 , 10^6 , 10^9 , etc.) y no el informático (2^{10} , 2^{20} , 2^{30} , etc.).

2.4.2 Módems

A pesar de que en muchas comunicaciones la mayor parte del trayecto se hace de manera digital, el bucle de abonado casi siempre es analógico. Esto lleva a la curiosa situación de que para comunicar dos ordenadores normalmente es preciso colocar módems en casa del abonado que conviertan la señal digital en analógica, mientras que en las centrales habrá códecs que se ocuparán de convertir la señal analógica en digital.

Resulta sorprendente la tecnología tan sofisticada que se utiliza en los modernos módems V.34 (28,8 y 33,6 Kb/s). Como ya hemos visto al hablar de la ley de Shannon su rendimiento se encuentra increíblemente cerca del límite teórico. En parte por este motivo es muy difícil conseguir en la práctica una comunicación de 33,6 Kb/s, cualquier pequeño defecto en la calidad de la línea provoca la negociación de una velocidad más baja. Un dato importante a recordar en el caso de las comunicaciones vía módem es que la comunicación se realiza de forma simultánea en ambos sentidos, es decir es una comunicación full dúplex; esto se realiza empleando todo el ancho de banda del canal (3,1 KHz) en cada sentido.

Dado que el bucle de abonado utiliza un solo par de hilos de cobre los módems utilizan un solo par para la comunicación en ambos sentidos. La separación entre los datos transmitidos y los recibidos se realiza en el módem por medio de unos dispositivos denominados circuitos híbridos.

En realidad la comunicación por módem es en cierto modo similar a una conversación telefónica: el teléfono tiene la capacidad de funcionar en modo full dúplex, aunque normalmente en una conversación no hablan las dos personas a la vez. Además ambos interlocutores utilizan el mismo rango de frecuencias (de 300 a 3.400 Hz) y todo esto ocurre a través de un solo par de hilos.

La comunicaciones por líneas telefónicas están sujetas a los problemas propios de la transmisión por cable de pares que ya hemos comentado. Especial relevancia tiene en este caso el crosstalk, ya que normalmente los pares se encuentran agrupados en mazos de forma que es muy fácil que se produzca interferencia entre diferentes abonados. Además el crosstalk entre las señales en sentidos opuestos de una misma comunicación se acentúa por el hecho de que ambas viajan por el mismo par de hilos y utilizan la misma banda de frecuencias.

En ocasiones las comunicaciones mediante módems presentan problemas adicionales debido a la presencia de unos dispositivos denominados supresores de eco. Siempre que una señal eléctrica se transmite por una unión (empalme, conector, etc.) una parte de la señal original es reflejada hacia atrás (de forma similar a lo que ocurre cuando enfocamos el haz de una linterna hacia el cristal de una ventana); esta pequeña señal de rebote es recogida por los amplificadores y retornada hasta su origen, donde puede llegar a ser audible. Si la distancia entre el emisor de la señal y el punto de rebote es tal que la señal reflejada llega a éste con un retraso mayor de 60 ms (equivalente a 6.000 Km de distancia) el rebote se percibe como un eco claramente diferenciado de la señal original; cuando el retardo está entre 20 y 60 ms (2.000-6.000 Km) el eco no llega a distinguirse claramente pero se produce un efecto que confunde a la persona que habla; por último si es menor de 20 ms el eco pasa desapercibido. Para evitar el problema del eco se han desarrollado unos dispositivos denominados supresores de eco que se utilizan en comunicaciones a larga distancia (más de 2.000 Km) y que actúan a modo de válvulas activadas por la voz, forzando una comunicación half dúplex por la línea; los supresores de eco son capaces de invertir su sentido de funcionamiento en unos 2 a 5 milisegundos cuando cambia la persona que habla, y resultan útiles en conversaciones entre personas, pero resultan nefastos para los módems ya que impiden la comunicación full dúplex y además introducen un retardo a veces apreciable en el cambio de sentido de la comunicación. Se han adoptado dos medidas para resolver este problema: una ha sido convenir el uso de una señal concreta (normalmente un tono de 2.100 Hz) al establecer la comunicación para indicar que se

trata de una comunicación de datos, con lo que los supresores de eco se inhabilitan. La otra medida, mas conveniente, es la de sustituir los supresores de eco por canceladores de eco, dispositivos que en vez de actuar cerrando la comunicación en el sentido opuesto lo que hacen es generar una onda en la señal de retorno que exactamente opuesta a la onda generada por el eco; de esta forma se suprime el eco sin bloquear la comunicación en el sentido de vuelta. El mecanismo y el principio de funcionamiento de los canceladores de eco es similar al utilizado por algunos auriculares que permiten oír música en ambientes ruidosos a base de generar en el oído una onda acústica exactamente opuesta al ruido que se quiere suprimir; de esta forma es posible oír música en un avión o mientras se está aspirando la casa. El problema del eco sólo es importante en comunicaciones a larga distancia o en países grandes como Estados Unidos. En Europa ningún país tiene distancias de 2.000 Km, por lo que no se utilizan normalmente supresores o canceladores de eco.

Los módems modulan la onda portadora en amplitud y fase, para intentar 'meter' en cada baudio la mayor cantidad posible de bits. La tabla 2.8 resume los estándares más habituales.

Estándar ITU-T	Velocidad máx. desc./asc. (Kb/s)	Baudios	bps/baudio	Fecha aprobación
V.21	0,3 / 0,3	300	1	
V.22	1,2 / 1,2	1.200/600	1	
V.22 bis	2,4 / 2,4	2.400/1.200	1	1984
V.32	9,6 / 9,6	2.400	4/2	1984
V.32 bis	14,4 / 14,4	2.400	6/5/4/3/2	1991
V.34	28,8 / 28,8	3.429	9,9 (8,4 efectivos) a 28,8 Kb/s	1994
V.34+	33,6 / 33,6	3.429	10,7 (9,8 efectivos) a 33,6 Kb/s	1995
V.90	56 / 33,6			1998
V.92/V.44	56 / 48			2000

Tabla 2.8.- Principales estándares de módems para transmisión por líneas conmutadas.

El número de bits que se transmite por baudio está fijado por el número de estados; cada estado es una combinación diferente de la amplitud y fase de la onda portadora. El conjunto de todas las combinaciones posibles se denomina la 'constelación' del módem. Hasta la norma V.32bis el número de símbolos era una potencia entera de 2 (64 en la V.32bis); en la norma V.34 funcionando a 33,6 Kb/s hay 1664 símbolos que se manejan como si fueran 891, ya que hay casos en que varios posibles estados representan la misma secuencia de bits y se utiliza uno u otro dependiendo de las condiciones de la línea.

Es curioso observar como justo a partir de 1991, fecha en que empieza a aparecer la RDSI que permiten transmitir datos a 64 Kb/s, se producen considerables avances en las técnicas de transmisión por red analógica después de haber estado estancadas durante bastantes años.

Las velocidades de 28,8 Kb/s y superiores son difíciles de conseguir en la práctica, ya que el más mínimo defecto en la línea impide su funcionamiento. Por esto el estándar V.34 prevé tantas velocidades; de esa manera los módems pueden establecer en cada caso la velocidad máxima posible de acuerdo con las condiciones de la línea. Puede ocurrir además que la calidad no sea igual en ambos sentidos, en cuyo caso los módems podrán establecer velocidades asimétricas, cada una ajustada lo mejor posible a la calidad del canal; por ejemplo una comunicación puede conseguir 33,6 Kb/s en un sentido y sólo 26,4 Kb/s en el sentido contrario. Incluso durante una sesión los módems monitorizan la tasa de errores, y puede haber un cambio de velocidad 'sobre la marcha' hacia arriba o hacia abajo si la situación lo requiere (fenómeno conocido como 'retraining').

La mayoría de los módems actuales incluyen compresión y corrección de errores, lo cual es muy interesante pues evita que el software de comunicaciones tenga que incorporar estas funciones, lo cual sería más lento. Los protocolos estándar para esto son el V.42 (corrección de errores) y el V.42bis (compresión), y se utilizan siempre conjuntamente. El V.42bis utiliza el algoritmo de compresión conocido como Lempel-Ziv (nombre que proviene de sus inventores) que se emplea también en muchos programas de compresión. Es bastante eficiente y consigue ratios de compresión máximos de 4:1. Existen

otros protocolos no estándar de compresión y corrección de errores bastante extendidos, como la serie de protocolos MNP (Microcom Networking Protocol).

El estándar V.90 permite conexiones asimétricas de 56/33,6 Kb/s (56 en sentido descendente proveedor → usuario y 33,6 en sentido ascendente usuario → proveedor). Parece que la velocidad de 56 Kb/s infrinja la ley de Shannon, ya que según lo que hemos dicho esta capacidad no sería posible en un canal telefónico. Pero hay que indicar que la velocidad de 56 Kb/s solo puede obtenerse cuando la conexión se realiza desde un acceso RDSI hacia uno analógico. Además es preciso que no se produzca ninguna conversión digital → analógica en el camino. Si se cumplen estas condiciones los módems V.90 pueden aprovecharla para conseguir mayor rendimiento. Al no tratarse de una comunicación por un canal analógico la ley de Shannon no es aplicable a este caso.

En Julio del 2000 se aprobaron dos nuevos estándares para módems, el V.92 y el V.44, orientados específicamente a la comunicación asimétrica usuario-proveedor para el acceso a Internet. El V.92 incorpora una mejora en la modulación del canal ascendente respecto al estándar V.34+ con lo que consigue una velocidad máxima de 48 Kb/s en el sentido ascendente (el sentido descendente permanece en 56 Kb/s como en la norma V.90). Además el V.92 incorpora un mecanismo que permite cortar la comunicación a nivel físico durante un cierto tiempo sin perder la sesión con el proveedor; esto permite por ejemplo suspender la conexión para atender una llamada entrante sin tener que repetir el proceso de autenticación para reanudarla a continuación. Por otro lado el estándar V.44 incorpora unos algoritmos de compresión más orientados a gráficos que V.42bis, con lo que los ratios de compresión pueden llegar a ser de 1:6.

2.4.3 Enlaces troncales y multiplexación

Como ya hemos comentado, uno de los principales objetivos de todas las compañías telefónicas es agrupar o multiplexar el mayor número posible de conversaciones telefónicas en las líneas troncales. Existen básicamente dos técnicas para ello, la multiplexación por división de frecuencias o FDM (Frequency Division Multiplexing) y la multiplexación por división del tiempo o TDM (Time Division Multiplexing). Se hace multiplexación por división de frecuencias por ejemplo en las emisiones de radiodifusión o de televisión, en que cada emisora ocupa un canal o rango de frecuencias diferente. Un mismo canal puede ser compartido por varias emisoras asignándole a cada una unas determinadas horas al día o ciertos días de la semana (cosa que se hace a veces); en este caso estamos haciendo además multiplexación por división del tiempo.

2.4.3.1 Multiplexación por división de frecuencias

En telefonía la multiplexación por división de frecuencias se hace asignando a cada canal telefónico un ancho de banda de 4 KHz, para tener un margen de seguridad que lo separe de los canales contiguos. Es habitual multiplexar los canales en conjuntos de doce formando lo que se conoce como un *grupo*, que ocupa 48 KHz y que se suele transmitir en la banda de 60 a 108 KHz; a veces se transmite otro grupo entre 12 y 60 KHz. Algunas compañías telefónicas ofrecen servicios de 48 a 56 Kb/s utilizando las bandas de estos grupos. Cinco grupos (60 canales) pueden unirse para formar un *supergrupo* (con un ancho de banda de 240 KHz) y a su vez cinco supergrupos pueden unirse para formar un *grupo maestro* (1,2 MHz). Existen estándares que llegan a agrupar hasta 230.000 canales (920 MHz).

2.4.3.2 Multiplexación por división de tiempos PDH

La multiplexación por división de frecuencias se hace normalmente cuando las señales son analógicas. Sin embargo como ya hemos visto las compañías telefónicas transmiten generalmente la voz de forma digital; una de las razones que motivó la digitalización de la voz fue su mejor adecuación a la multiplexación por división del tiempo.

De la misma forma que ocurre con la FDM en TDM se definen diversos niveles jerárquicos de multiplexación. El primer nivel TDM utilizado en todo el mundo excepto América del Norte y Japón agrupa 30 canales y se denomina E1; cada canal representa un byte cada 125 μ s (o sea 64 Kb/s); a estos 30 bytes se añaden otros dos para sincronización y entramado de la información de los diversos canales,

por lo que una línea E1 emite una trama de 32 bytes (256 bits) cada 125 μ s, o sea 8.000 veces por segundo. Esto equivale a un caudal de $256 \cdot 8.000 = 2.048$ Kb/s (o también $64 \text{ Kb/s} \cdot 32 = 2.048$ Kb/s). Cuando una línea E1 se utiliza para transportar voz se pueden multiplexar 30 conversaciones, equivalentes a $30 \cdot 64 \text{ Kb/s} = 1.920$ Kb/s de tráfico, quedando reservados los 128 Kb/s restantes para sincronización y entramado; esto es lo que se conoce como un enlace E1 estructurado y es bastante habitual para la interconexión de centralitas telefónica dentro de una gran empresa, por ejemplo. Es posible y relativamente frecuente utilizar un enlace completo E1 para conectar dos ordenadores o dos routers; en este caso el enlace no se estructura en canales y no es necesario reservar los dos bytes de sincronización y entramado; por tanto cuando un enlace E1 se utiliza para transportar datos los 2.048 Kb/s están disponibles para el router.

El primer nivel jerárquico del sistema TDM empleado en América y Japón, denominado T1 o también DS1, es distinto. Agrupa 24 conversaciones en vez de 30, y utiliza un bit adicional para entramado. Así pues una trama T1 tiene $24 \cdot 8 + 1 = 193$ bits, que emitidos 8.000 veces por segundo dan $193 \cdot 8.000 = 1.544$ Kb/s.

Del mismo modo que en FDM existían grupos de jerarquía superior (supergrupos y grupos maestros) en TDM también existen niveles superiores. Dado que el nivel básico (E1 o T1) difiere según los continentes, todos los niveles superiores, que se construyen a partir de éste son también diferentes. Por ejemplo en el sistema utilizado en Europa cuatro líneas E1 se agrupan para formar una E2; dicha agrupación tiene un caudal de 8,448 Mb/s, ligeramente superior al que correspondería por la simple suma de los cuatro E1 ($2,048 \text{ Mb/s} \cdot 4 = 8,192 \text{ Mb/s}$) debido nuevamente a la información de entramado y sincronización. A su vez cuatro líneas E2 forman una E3 (34,368 Mb/s), y así sucesivamente. En la tabla 2.9 se muestran todos los niveles estandarizados que se utilizan en los diversos continentes; como puede verse existen pequeñas diferencias en los niveles superiores entre Norteamérica y Japón.

Conocida el caudal de una línea es posible calcular su tamaño de trama dividiéndola por 8.000 (recordemos que la frecuencia de muestreo en *todo* el mundo es de 8 KHz); por ejemplo, una trama E2 tiene un tamaño de 1.056 bits.

La trama correspondiente a cada nivel se construye multiplexando tramas del nivel anterior; así por ejemplo una trama E2 (120 canales) esta formada por cuatro E1 (30 canales). Cada nivel añade bits de sincronismo adicionales al construir su trama, por ejemplo, una trama E2 está formada por cuatro tramas E1 de 256 bits cada una más 32 bits adicionales.

Cuando se multiplexan varias tramas de un determinado nivel (por ejemplo cuatro E1) cada una lleva su propio sincronismo que no tiene por que coincidir con el de las demás; para sincronizarlas se añade una serie de bits de relleno a cada una de las tramas que se multiplexan. Esto explica en parte la necesidad de que por ejemplo una trama E2 sea algo mayor que cuatro tramas E1; los 32 bits adicionales permiten aplicar el relleno cuando sea necesario. Debido a la forma como se consigue el sincronismo a estas jerarquías se las denomina genéricamente **Jerarquía Digital Plesiócrona o PDH (Plesiochronous Digital Hierarchy)**; *plesio* es un prefijo que en griego significa próximo. Las velocidades estandarizadas en el sistema PDH en todo el mundo se muestran en la tabla 2.9.

Nivel jerárquico	Número de canales	Nombre Circuito	Velocidad (Mb/s)		
			Norteamérica	Japón	Resto del Mundo
0	1	DS0 o E0	0,064	0,064	0,064
1	24	T1 o DS1	1,544	1,544	
1	30	E1			2,048
2	96	T2 o DS2	6,312 (4*T1)	6,312 (4*T1))	
2	120	E2			8,448 (4*E1)
3	480	E3		32,064 (5*T2)	34,368 (4*E2)
3	672	T3 o DS3	44,736 (7*T2))		
3	1440	J3		97,728 (3*E3)	
4	1920	E4			139,264 (4*E3)
4	2016	T4 o DS4	139,264 (3*T3)		

Tabla 2.9.- Niveles y caudales de la jerarquía PDH. Los caudales que aparecen en negrita son los que se utilizan comúnmente en la transmisión de datos.

Las velocidades PDH son las que normalmente ofrecen las compañías telefónicas para la transmisión de datos, ya que son las que de forma natural soportan sus equipos; esto simplifica la constitución de los enlaces y optimiza el uso de recursos. Sin embargo para datos no suelen emplearse todas las velocidades PDH, ya que los fabricantes de equipos de comunicaciones no suelen suministrar interfaces para todas las velocidades estandarizadas. Las que se suelen utilizar son los niveles 0, 1 y 3 de la jerarquía, es decir 64 Kb/s, 2,048 Mb/s y 34,368 Mb/s en todo el mundo, salvo en Norteamérica donde se emplea 64 Kb/s, 1,544 Mb/s y 44,736 Mb/s y en Japón donde se utiliza 64 Kb/s y 1,544 Mb/s. Dado que hay un salto considerable entre 64 Kb/s y T1 o E1, y una demanda grande de velocidades intermedias, muchas compañías telefónicas ofrecen enlaces de velocidades intermedias, denominados $n \times 64$ (donde típicamente $n = 2, 3, 4, 6$ u 8); sin embargo los precios de estos enlaces son en proporción bastante más caros que un enlace E1. Para el salto entre E1 y E3 no se ofrecen capacidades intermedias, por lo en estos casos lo que se hace a menudo es contratar varias líneas E1 y agregar su capacidad a nivel del router o del equipo de comunicaciones, es decir repartir el tráfico entre las diversas líneas para conseguir así la capacidad deseada.

2.4.3.3 Multiplexación SONET/SDH

El sistema de multiplexación PDH que acabamos de ver fue desarrollado por AT&T en Estados Unidos a principios de los años sesenta, ya que por aquel entonces ya se empezaba a utilizar la transmisión digital de la voz entre centrales. Un poco más tarde en Europa la ITU-T (entonces CCITT) diseñó otro sistema pero tomando decisiones diferentes como hemos visto en cuanto a la forma de multiplexar los canales, lo cual produjo un sistema incompatible con el americano, tanto en las velocidades de la jerarquía como en la estructura de las tramas. Por su parte Japón decidió seguir la versión americana de PDH hasta el nivel 2 de la jerarquía (6,312 Mb/s) pero creó la suya propia para el nivel 3; hay por tanto tres sistemas incompatibles de PDH. Como consecuencia de ello los enlaces telefónicos transoceánicos necesitan el uso de costosas y caras cajas negras que conviertan de sistema a otro. Dicho en pocas palabras, el sistema telefónico digital mundial basado en PDH es un desastre.

La incompatibilidad intercontinental es el problema más grave que presenta el sistema PDH, pero no es el único. Además se dan los siguientes inconvenientes importantes:

- Fue diseñado pensando en sistemas de transmisión de cable coaxial y microondas, y no en fibra óptica (entonces inexistente); por consiguiente la PDH no utiliza la fibra óptica eficientemente.
- No dispone de un sistema de gestión y redundancia apropiados. Por ejemplo se puede crear una red en forma de anillo para conseguir una mayor fiabilidad, pero en ese caso los enlaces PDH han de ser reconfigurados a mano; no está previsto en la tecnología PDH estándar un mecanismo que permita la conmutación automática de circuitos por un camino alternativo.

- El hecho de ser una transmisión plesiócrona (los bits de relleno utilizados para forzar el sincronismo) impide extraer directamente canales de voz cuando se encuentran en tramas de jerarquía superior a T1 o E1. Por ejemplo para extraer (o sustituir) un canal de 64 Kb/s de una línea E3 es necesario desmultiplexar el E3 en sus cuatro E2, y el E2 correspondiente en sus cuatro E1 para entonces acceder al canal deseado en el E1 correspondiente. Esto requiere instalar equipos más costosos en todas las centrales.

Este último punto requiere una explicación más detallada. En PDH la multiplexación de tramas se lleva a cabo en base a la posición. Supongamos que en una trama E1 estamos interesados en desmultiplexar el segundo de los 30 canales que viajan en ella. Para esto deberemos extraer los bits 8 al 15 (ambos inclusive) de cada trama. Podemos imaginar la trama E1 como provista de un reloj especial que marca un 'tick' cada vez que pasan ocho bits, es decir un tick que identifica la frontera de byte, o sea cada vez que empieza un nuevo canal; dicho reloj deberá pues marcar 32 ticks cada 125 μ seg, o sea un tick exactamente cada 3,90625 μ seg (125/32). Obsérvese que este tick debe ser muy preciso, pues un desplazamiento de solo la mitad de un bit, equivalente a 0,24414 μ s (3,90625/16) podría provocar la desmultiplexación errónea del canal.

Supongamos ahora que en algún momento dicha trama E1 se multiplexa junto con otras tres en una trama E2; al tratarse de cuatro tramas en principio independientes el tick (o reloj) de cada una no tiene por que coincidir, pero al multiplexarlas es preciso 'alinearse' a frontera de byte o sincronizarlas, es decir asignarles un reloj común; pero esto ha de hacerse de forma que al desmultiplexarlas sea posible restaurar cada trama con su reloj original. La solución que PDH adopta en este caso es añadir bits de relleno al principio de cada trama E1, en cantidad suficiente para forzar el alineamiento en frontera de byte, con lo que se consigue la sincronización con el resto de tramas E1 (lógicamente nunca harán falta más de 7 bits de relleno). El proceso se repite de la misma forma cuando cuatro tramas E2 se multiplexan para dar una trama E3, y así sucesivamente. Aparte de su complejidad la utilización de bits de relleno para sincronizar las tramas tiene la desafortunada consecuencia que ya hemos comentado, de que para extraer un canal de una trama E2 es necesario proceder previamente a desmultiplexarla en las correspondientes tramas E1, ya que solo así podremos saber los bits de relleno que contiene, información que es necesaria para poder proceder a la desmultiplexación.

Para resolver estos tres problemas de la PDH los ingenieros de Bellcore (laboratorio de investigación de AT&T en Estados Unidos) empezaron a trabajar en 1985 en un estándar que denominaron **SONET** (Synchronous Optical Network); en SONET la técnica de bits de relleno se sustituye por la utilización de punteros que indican exactamente en que bit empieza cada una de las tramas multiplexadas; de esta forma se puede acceder directamente a una trama de un nivel cualesquiera y extraerla sin tener que desmultiplexar previamente todos los niveles intermedios.

SONET pretendía ser una jerarquía síncrona que sustituyera a la PDH americana por encima del nivel T3 (que era el más utilizado); para encapsular eficientemente una trama T3 se consideró que haría falta una trama SONET de 49,9 Mb/s (se necesitaban 5 Mb/s adicionales para la información de control y gestión del sistema, que era uno de los tres problemas a resolver. Por tanto la velocidad básica de SONET sería 49,9 Mb/s y a partir de ella se construirían todas las demás como simples múltiplos de la velocidad fundamental.

Dado que la conectividad intercontinental era uno de los principales problemas, Bellcore propuso a la CCITT en 1987 la adopción de SONET como estándar internacional. La propuesta no fue bien recibida en Europa, ya que las dos jerarquías más utilizadas aquí (E3 y E4) encajaban mal en los valores elegidos por los americanos: encapsular una E3 en 49,9 Mb/s suponía un excesivo desperdicio de capacidad, mientras que en el caso de E4 no cabía en tres tramas SONET básicas (149,7 Mb/s) y resultaba de nuevo excesivo desperdicio utilizar cuatro tramas básicas (199,6 Mb/s) para encapsular una E4. La jerarquía utilizada en Japón por su parte tampoco se acoplaba bien al sistema propuesto por los americanos. La solución de compromiso adoptada finalmente fue retocar ligeramente la velocidad y definir dos estándares, uno americano (SONET) y otro internacional (SDH), de forma que ambos fueran compatibles.

SONET es un estándar ANSI y tiene la velocidad fundamental de 51,84 Mb/s. Todas las velocidades superiores son múltiplos de esta velocidad, que se denomina OC-1 (Optical Carrier 1) cuando se trata de la interfaz óptica y STS-1 (Synchronous Transfer Signal 1) cuando es la interfaz eléctrica. Los múltiplos se denominan OC-n o STS-n donde n indica el múltiplo utilizado.

La CCITT (ITU-T) aprobó un nuevo estándar denominado **SDH** (Synchronous Digital Hierarchy) que se basa en los mismos principios de funcionamiento que SONET y que utiliza como velocidad fundamental el triple de la velocidad fundamental de SONET, es decir OC-3 (155,52 Mb/s); esta velocidad se denomina STM-1 (Synchronous Transfer Module 1). Todos los valores superiores son múltiplos de esta y se denominan STM-n, donde *n* indica el múltiplo utilizado.

De esta forma el problema de transportar tramas PDH dentro de tramas SONET/SDH se resuelve en el caso americano metiendo un T3 en un OC-1 y en el europeo metiendo un E4 en un STM-1.

La compatibilidad de SONET y SDH está garantizada siempre y cuando las velocidades de SONET sean siempre múltiplo de 3. Hasta tal punto son compatibles entre sí los dos estándares que a menudo se hace referencia a ellos conjuntamente con la denominación SONET/SDH. La tabla 2.10 resume las velocidades más utilizadas. Conviene destacar que las comunicaciones SONET/SDH siempre son simétricas full dúplex.

SONET		SDH	Velocidad
Eléctrico	Óptico	Óptico	(Mb/s)
STS-1	OC-1	STM-0	51,84
STS-3	OC-3	STM-1	155,52
STS-12	OC-12	STM-4	622,08
STS-48	OC-48	STM-16	2.488,32
STS-192	OC-192	STM-64	9.953,28

Tabla 2.10.- Velocidades SONET/SDH más habituales

Una red SONET/SDH está formado por un conjunto de conmutadores, multiplexores y repetidores, todos interconectados por fibra óptica. Una configuración típica es la de un anillo formado por una serie de multiplexores SDH llamados ADM (Add-Drop multiplexor). Un anillo podría funcionar por ejemplo como STM-16 (2,5 Gb/s) con lo que sería posible definir hasta 16 circuitos STM-1 entre dos ADM cualesquiera del anillo, o hasta cuatro STM-4, o cualquier otra combinación intermedia que sume STM-16. Según la distancia que separe los ADMs puede ser necesario en algún caso utilizar repetidores. En un anillo basta una fibra para conseguir comunicación full-dúplex, ya que los datos viajan por un lado del anillo en un sentido y por el lado contrario en el sentido opuesto; sin embargo en este caso la comunicación se interrumpe en caso de corte del anillo en un punto. Utilizando un doble anillo, es decir dos fibras, es posible en caso de corte en un punto restablecer la comunicación cerrando el anillo en el ADM anterior y posterior al corte, tal como se muestra en la Fig. 2.2; de esta forma la comunicación se restablece utilizando el anillo de reserva. Gracias a las funciones de gestión y monitorización que incorpora el protocolo SONET/SDH esta conmutación se realiza en 50 ms, mientras que en PDH la conmutación tenía que hacerse manualmente.

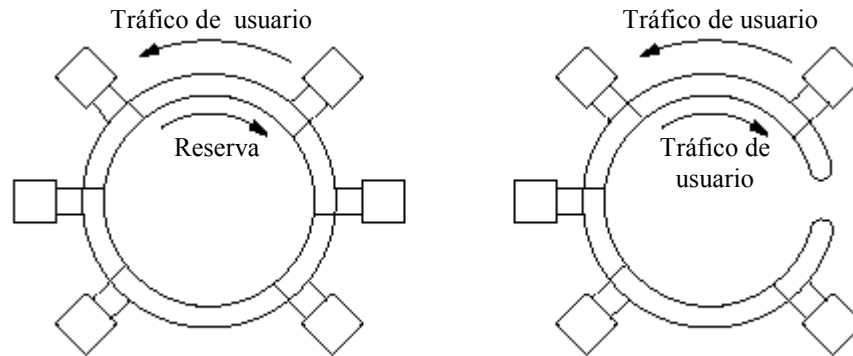


Figura 2.2.- Funcionamiento de un doble anillo en caso de avería. En el caso de la izquierda, en que el anillo está completo, se utiliza sólo una fibra para tráfico de usuario, la otra está de reserva. En el caso de la derecha, en que se ha producido un corte en el anillo, las dos fibras se emplean para tráfico de usuario.

Además de anillos es posible en SONET/SDH hacer topologías más complejas, por ejemplo interconectando anillos entre sí; para esto se utilizan conmutadores llamados cross-connect que son dispositivos con múltiples conexiones capaces de establecer circuitos entre ellas.

La fibra que une directamente dos equipos SONET/SDH cualesquiera (ADMs, cross-connect o repetidores) se denomina **sección**; a la unión entre dos ADMs contiguos (posiblemente a través de repetidores) se la conoce como **línea**; por último la definición de un circuito completo para la interconexión de dos equipos finales (por ejemplo dos conmutadores ATM) que puede atravesar varios repetidores, ADMs y cross-connect se llama **ruta**.

La tecnología SONET/SDH se enmarca dentro de la capa física del modelo OSI. Sin embargo en SONET/SDH esta capa se divide en cuatro subcapas. La más baja se denomina subcapa fotónica y especifica las características físicas de la luz y la fibra utilizadas, que siempre trabaja en segunda o tercera ventana. Las tres capas siguientes corresponden a la sección, línea y ruta que ya hemos descrito. La subcapa de sección se ocupa de los enlaces punto a punto entre elementos contiguos cualesquiera (repetidores, ADMs o cross-connect); la subcapa de línea se encarga de la multiplexación y demultiplexación de circuitos entre dos multiplexores contiguos. La subcapa de ruta se ocupa de los problemas relacionados con la comunicación extremo a extremo.

Veamos ahora que estructura tiene una trama SONET. El eslabón básico lo constituye la trama OC-1 (O sts-1), que está formada por una matriz de 9 filas por 90 columnas, o sea 810 bytes equivalentes a 6.480 bits que se emite 8.000 veces por segundo, lo cual da $6.480 \times 8.000 = 51,84$ Mb/s. Pero no toda la trama está disponible para información de usuario, puesto que las funciones de monitorización y control emplean parte de esta capacidad. Concretamente se utiliza una columna para información de ruta y tres para información de línea y sección; esto deja 86 columnas disponibles para información de usuario, o sea $86 \times 9 = 774$ bytes = 6.192 bits que supone un caudal útil de $6.192 \times 8.000 = 49,536$ Mb/s. Todas las tramas SONET son múltiplos de esta estructura, por lo que la proporción de información útil es la misma en todas ellas, $86/90 = 0,9556$.

Para comprender mejor la estructura de las tramas SONET haremos una analogía. Imaginemos que una trama OC-1 es un vagón de ferrocarril que tiene 90 filas de asientos y 9 asientos en cada fila; de la estación sale un tren formado por un solo vagón cada 125 μ s. Cada asiento del vagón representa un byte, es decir una conversación telefónica. Pero no todos los asientos del tren son ocupados por pasajeros que pagan billete; en este tren se reserva toda la primera fila (9 asientos) para los conductores y las tres filas siguientes para personal de servicio del tren (azafatas, cobradores, etc.); por tanto nos quedan $86 \times 9 = 774$ pasajeros que pagan billete. Merece la pena destacar también que, de acuerdo con el horario previsto, partirá un tren cada 125 μ s independientemente del número de billetes que se hayan vendido, es decir si el número de conversaciones activas no es suficiente para 'llenar' todos los asientos el tren realizará el trayecto parcialmente vacío, aunque siempre llevará ocupadas como mínimo las cuatro primeras filas que corresponden a los conductores y al personal de servicio.

En el caso de SDH la situación es ligeramente distinta. La trama básica está formada por tres matrices SONET encadenadas, o sea $3 \times 90 \times 9 = 2.430$ bytes = 19.440 bits que por 8.000 (veces por segundo) da los 155,52 Mb/s del nivel físico. En cada una de estas tres matrices hay que reservar tres columnas para la información de sección y de línea como en el caso de SONET; sin embargo la información de ruta sólo hay que reservarla una vez, ya que la ruta es la misma para las tres matrices pues en SDH son inseparables. Hay por tanto un total de 10 columnas de overhead (3+3+3+1), quedando 260 disponibles para información de usuario. Esto da $260 \times 9 = 2.340$ bytes = 18.720 bits, o sea 149,76 Mb/s (18.720×8.000) de información útil. Todas las tramas SDH son múltiplos de esta estructura, por lo que la proporción de información útil es en todas ellas $260/270 = 0,9630$.

Como hemos visto la eficiencia de SDH es ligeramente mayor que la de SONET, ya que la cantidad de información de ruta es menor. Sin embargo con una estructura de trama diferente la compatibilidad entre ambos sistemas, que fue como hemos visto uno de los objetivos del diseño, no sería posible. Para ello se ha definido en SONET una trama denominada OC-3c (o también STS-3c) que es idéntica a la STM-1, es decir utiliza una sola columna para la información de ruta. La c, que significa 'catenated', pretende indicar que en este caso la trama OC-3c no puede descomponerse en tramas OC-1. Usando como base la trama OC-3c es posible construir tramas superiores: OC-6c, OC-9c, etc.; la estructura y la eficiencia de las tramas OC-nc es en todos los casos idéntica a la de las tramas SDH correspondientes, como se muestra en la tabla 2.11. Como es lógico no existe una trama OC-1c pues no tendría sentido.

SONET		SDH	Velocidad (Mb/s)	
Eléctrico	Óptico	Óptico	Total	Útil
STS-1	OC-1		51,84	49,536
STS-3c	OC-3c	STM-1	155,52	149,76
STS-12c	OC-12c	STM-4	622,08	599,04
STS-48c	OC-48c	STM-16	2.488,32	2.396,16
STS-192c	OC-192c	STM-64	9.953,28	9.584,64

Tabla 2.11.- Velocidades útiles SONET/SDH

Siguiendo con la analogía del ferrocarril podemos explicar la trama STM-1 u OC-3c de la siguiente forma: supongamos que un aumento en el número de pasajeros nos obliga a aumentar las plazas que ofrecemos; dado que no podemos aumentar la frecuencia de nuestros trenes (pues siguen saliendo a razón de uno cada 125 μ s) decidimos aumentar su capacidad enganchando en cada tren tres vagones de 90×9 asientos cada uno. Pero dado que los vagones van enganchados ahora solo necesitamos reservar la fila de conductores en el primero, aunque seguiremos necesitando las tres filas reservadas para el personal de servicio en los tres vagones. Por tanto el número de filas para las que podremos vender billete será de $270 - (3+3+3+1) = 260$.

Siempre que se utiliza un circuito SONET/SDH para transportar datos el caudal realmente utilizable por éstos es el que corresponde a lo que aquí hemos denominado tráfico útil o de usuario. Por ejemplo, si conectamos dos conmutadores ATM mediante un circuito OC-3c (155,52 Mb/s) el máximo caudal que podremos aprovechar para enviar celdas será de 149,76 Mb/s.

SONET/SDH se utiliza normalmente para transportar múltiples canales de datos, voz, etc. Estos pueden ser canales SDH de velocidad inferior, por ejemplo un STM-4 transportando cuatro STM-1, o canales PDH, o combinaciones de ambos (por ejemplo un STM-4 transportando dos STM-1, un E4, dos E3 y 21 E1).

Los sistemas de transmisión basados en SONET/SDH son la base de las modernas infraestructuras de telecomunicaciones. Para la transmisión de datos SONET/SDH suministra un transporte extremadamente fiable, tanto por la baja tasa de errores de la fibra óptica y el sistema de transmisión síncrono, como por la posibilidad de disponer de caminos físicos redundantes con conmutación automática en caso de avería. Algunas compañías telefónicas están poniendo a disposición de sus grandes clientes sus infraestructuras SONET/SDH, especialmente para la constitución de redes privadas virtuales, es decir redes integradas de voz y datos de alta capacidad. La Generalitat Valenciana dispone en la actualidad de una red de este tipo, formada por siete anillos dobles (cinco STM-4 en Valencia, un STM-1 en Alicante y uno en Castellón)

con más de cuarenta ADMs y diversos cross-connect. Los tres enlaces de 155 Mb/s que interconectan los diversos campus de la Universitat de Valencia utilizan también una infraestructura SDH.

2.4.4 Conmutación

En el capítulo 1 hemos visto las diferencias entre conmutación de circuitos y conmutación de paquetes. Recordemos que la conmutación de circuitos, que podemos considerar como menos sofisticada, tiene la ventaja de asegurar la comunicación por el circuito establecido una vez éste está disponible; además dicha comunicación tiene una velocidad de transmisión garantizada y no está sujeta a posibles congestiones de la red. En el lado negativo se encuentra el hecho de que la red ha de sobredimensionarse, o correr el riesgo de no encontrar canal disponible en el momento que el usuario necesite establecer la comunicación; en cualquier caso la conmutación de circuitos supone un desperdicio de recursos, ya que la capacidad reservada esta disponible para el usuario todo el tiempo que está establecido el circuito, tanto si lo utiliza como si no.

Por el contrario la conmutación de paquetes permite intercalar en un mismo canal físico tráfico de diversos usuarios, con la esperanza de que la infraestructura se aproveche al máximo, al haber muchos usuarios utilizándolo simultáneamente. Como inconveniente se tiene el que no se puede garantizar una capacidad al usuario, y que en momentos de mucho tráfico la red puede congestionarse degradándose entonces el tiempo de respuesta.

Al tener que recibir el paquete en su totalidad para enviarlo después, los routers de una red de conmutación de paquetes pueden ofrecer facilidades interesantes; por ejemplo adaptar medios de transmisión de distinta capacidad, encriptar información, hacer conversiones de código o realizar corrección de errores. Para que esto sea posible los ordenadores que se comunican a través de la red deben utilizar un protocolo y una estructura de paquete que sea compatible con el tipo de red que atraviesan; no podrían por ejemplo comunicar a través de una red X.25 dos equipos que utilizaran tramas frame relay. En algunos tipos de redes de conmutación de paquetes (las no orientadas a conexión como IP) el orden de llegada de los paquetes puede no coincidir con el de salida.

En cambio, en conmutación de circuitos una vez establecida la comunicación entre los extremos (es decir una vez efectuada la llamada, o terminado el proceso de señalización) el comportamiento es completamente equivalente a una línea dedicada. Los equipos de transmisión intermedios (si existen) son totalmente transparentes al equipo de usuario, que puede utilizar cualquier protocolo y estructura de trama que desee; la velocidad ha de coincidir en ambos extremos. El circuito transmite la información en forma de secuencia de bits, sin importarle la forma como estos se organizan en el nivel de enlace. Por supuesto los bits siempre llegan en el mismo orden en que han salido.

2.4.4.1 Tipos de conmutadores

Vamos a describir ahora brevemente los tipos de conmutadores mas utilizados en las centrales telefónicas. Esto tiene interés para nosotros porque sus arquitecturas son la base sobre la que se realizan muchos sistemas de conmutación en redes de ordenadores.

El tipo de conmutador más sencillo es el **crossbar**, también llamado *crosspoint*. Consiste sencillamente en una matriz con n líneas de entrada y n líneas de salida, que mediante las órdenes apropiadas es capaz de conmutar cualquier entrada con cualquier salida. Así por ejemplo, para conmutar 10 líneas entre sí podríamos construir un crossbar con 100 puntos de interconexión posibles. Este tipo de conmutador sólo es factible cuando el número de líneas a conectar es reducido, ya que su complejidad es proporcional al cuadrado del número de líneas; por ejemplo un conmutador crossbar capaz de manejar 1000 líneas habría de tener 1.000.000 de puntos de interconexión posibles. A cambio de este inconveniente el conmutador crossbar tiene la ventaja de que es no bloqueante, es decir una solicitud de establecimiento de un circuito sólo se rechazará cuando el destinatario tenga ya otro circuito establecido.

Cuando el número de líneas a conectar es elevado se suele utilizar, en vez de un gran crossbar varios conmutadores crossbar más pequeños organizados en etapas, de forma que la complejidad no crezca con el cuadrado del número de líneas. Por ejemplo, supongamos que queremos interconectar 100 líneas y disponemos de tantos conmutadores crossbar de 10 x 10 líneas como queramos; podemos construir una

etapa de entrada con diez conmutadores a los que conectaremos las 100 líneas de entrada, y otra etapa de salida con otros diez a la que conectaremos las 100 líneas de salida; ahora bien, cada uno de los diez conmutadores de la etapa de entrada dispone de diez líneas de salida, y cada uno de los conmutadores de salida dispone de diez líneas de entrada; podemos pues interconectar una salida de cada conmutador de entrada a una entrada de cada conmutador de salida, con lo que será posible establecer un circuito entre cualquier entrada y cualquier salida, habiendo utilizado 20 conmutadores con 100 puntos de interconexión cada uno; la complejidad total de la electrónica necesaria para esto ($20 \times 100 = 2.000$ puntos) es cinco veces menor que si hubiéramos utilizado un solo crossbar de 100 líneas ($100 \times 100 = 10.000$). Este es un ejemplo de lo que se denomina un conmutador **multietapa**. Es posible construir conmutadores con etapas intermedias para reducir aún más la complejidad. A diferencia de lo que ocurría en el caso del conmutador crossbar único, en el multietapa se pueden dar situaciones de bloqueo donde no pueda establecerse un circuito; por ejemplo en nuestro caso en cada grupo de diez líneas de entrada sólo puede haber una conectando a la vez con un determinado grupo de diez líneas de salida.

Los conmutadores crossbar o multietapa se suelen denominar conmutadores por **división espacial**, ya que actúan conmutando puertas físicas en uno o varios circuitos, y podemos representarlos como una matriz de conmutación en el espacio. Otro tipo de conmutador es el de **división de tiempo**, que basa su funcionamiento en la multiplexación por división de tiempos; por ejemplo en el caso de una línea E1 los primeros 30 bytes de la trama son la información proveniente de los 30 canales que multiplexa (los dos últimos son información de control); por tanto podemos realizar cualquier conmutación de los canales sin más que permutar en la trama de salida los bytes que correspondan a los canales que se quieren conmutar. Por ejemplo, para conmutar el circuito 3 con el 7 deberemos permutar el byte tercero y séptimo de la trama. La permutación de canales en una trama E1 es pues equivalente a un conmutador crossbar de 30 x 30 líneas.

2.5 RDSI DE BANDA ESTRECHA

La RDSI (Red Digital de Servicios Integrados) o ISDN (Integrated Services Digital Network) consiste en extender hasta el mismo bucle de abonado la red digital; esta es la culminación lógica del proceso iniciado en los años sesenta de digitalización de los enlaces troncales de la red telefónica. Con la aparición de ATM, también llamada RDSI de banda ancha, se sintió la necesidad de añadirle un adjetivo a la antigua RDSI, por lo que a veces se la denomina también RDSI de banda estrecha, narrowband-ISDN o N-ISDN. Cuando se utiliza la denominación RDSI sin más generalmente se está haciendo referencia a la RDSI de banda estrecha.

Dado que la transmisión de la señal se hace de forma digital en todo el trayecto, en RDSI el teléfono actúa de códec digitalizando 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 necesitamos utilizar módem (pero sí un adaptador) y podremos transmitir datos a la velocidad nominal del canal, es decir a 64 Kb/s. A diferencia de lo que ocurre con las conexiones analógicas aquí los 64 Kb/s full dúplex están asegurados, sin ruidos ni interferencias, y no hay necesidad de negociar la velocidad en función de la calidad de la línea.

Además de esta la RDSI tiene otra serie de ventajas respecto a la red analógica, entre las que cabe destacar por su relevancia de cara a la transmisión de datos las siguientes:

- La llamada y el establecimiento de la conexión se realiza en un tiempo muy corto, de 0,5 a 2 segundos frente a los 5 a 20 segundos que requiere una llamada analógica. Esto permite configurar los equipos para que la llamada se realice de manera automática cuando la aplicación del usuario necesita enviar tráfico por el circuito; en la red analógica esto no es normalmente posible pues el retardo que aprecia el usuario es excesivo.
- El número llamante se identifica, por lo que es posible establecer mecanismos de seguridad basados en la comprobación del número llamante (en el caso de telefónica la identificación no siempre es posible por la limitación de sus centrales RDSI). Esta función empieza a estar disponible en la actualidad también para líneas analógicas.

En RDSI existen dos tipos de canales, los denominados canales B o Bearer (portador en inglés) y los canales D (Data). Estas denominaciones se comprenden mejor si pensamos en RDSI como una red para la voz; en ese sentido el canal B es el que transporta la voz digitalizada mientras que los 'datos' (el canal D) son la información de control, por ejemplo del protocolo de señalización utilizado para realizar la llamada. En condiciones normales los canales B se activan sólo cuando existen llamadas establecidas, y conectan dos usuarios de la red RDSI entre sí; en cambio el canal D está siempre activo entre el usuario RDSI y la central correspondiente. Gran parte de las ventajas de RDSI frente a la telefonía convencional (como la rapidez de marcación) se deben precisamente a la existencia de ese canal D de señalización fuera de banda permanentemente establecido.

Cuando utilizamos RDSI para transportar datos lo hacemos a través de los canales B, ya que el canal D sigue desarrollando las labores de señalización y control, a pesar de su nombre.

El estándar RDSI contempla dos tipos de acceso al servicio:

- El acceso **básico** o **BRI (Basic Rate Interface)** contiene dos canales B y un D (acceso 2B+D). Los canales B son de 64 Kb/s mientras que el canal D tiene una capacidad de 16 Kb/s. Este acceso puede funcionar sobre el mismo par de hilos de cobre de un teléfono analógico, siempre y cuando la distancia entre el usuario y la central no sea superior a unos 5,5 Km. Está orientado a usuarios domésticos y pequeñas oficinas
- El acceso **primario** o **PRI (Primary Rate Interface)** está formado en Europa por 30 canales B y uno D (30B + D) y en Norteamérica y Japón por 23B + D. En este caso tanto los canales B como el D son de 64 Kb/s. La diferencia se debe a que en Europa un PRI utiliza a nivel físico una línea E1 mientras que en Norteamérica y Japón utiliza una T1. El acceso primario está pensado para grandes oficinas o centros proveedores de servicios.

En el caso de un acceso primario en Europa no se utiliza toda la capacidad de la línea E1 en los 31 canales ($31 \times 64 = 1.984$ Kb/s); los 64 Kb/s restantes se emplean en sincronización de las tramas. En el sistema americano (T1 = 1.544 Kb/s) los 24 canales utilizan $24 \times 64 = 1536$ Kb/s y el sincronismo se hace utilizando únicamente los 8 Kb/s restantes, es decir un bit por trama. En el caso de un acceso básico el caudal a nivel físico es de 160 Kb/s, de los cuales 144 Kb/s se utilizan en los canales B y D y el resto (16 Kb/s) se emplean para sincronismo.

Físicamente un acceso básico está formado por un dispositivo denominado NT1 (Network Terminating device 1) que dispone de un conector RJ45 similar al conector telefónico normal (RJ11) pero con cuatro pares de hilos en vez de dos, donde el usuario conecta su terminal RDSI (teléfono, fax, alarma, ordenador, etc.) . De los cuatro pares dos se utilizan para la transmisión de datos en sentido de ida y vuelta y un tercero sirve para dar alimentación eléctrica al equipo desde el NT1. Mientras que entre el NT1 y el ordenador o dispositivo de usuario se utiliza un par diferente para cada sentido, entre el NT1 y la central ambos van por el mismo par; para separar las dos señales el NT1 dispone de un circuito híbrido, similar al utilizado en los módems. Salvo los teléfonos simples la mayoría de los dispositivos RDSI requieren alimentación propia y no aprovechan la corriente que suministra el NT1; en estos casos no es necesario conectar el NT1 a la red eléctrica.

Un acceso primario en Europa está formado por una interfaz G.703 (dos cables coaxiales para transmisión y recepción de 75 ohmios); se trata exactamente del mismo interfaz físico que se suministra para una línea E1. En cambio en el sistema americano la interfaz es un conector RJ45, igual que para un acceso básico.

Independientemente de la interfaz utilizada los canales B de RDSI son todos compatibles entre sí, es decir un usuario desde un básico puede establecer un circuito con otro básico o con un primario en Norteamérica o en Europa indistintamente.

Cuando se utiliza RDSI para transmitir datos lo normal es establecer circuitos bajo demanda, es decir a medida que el flujo de datos lo requiera. Generalmente cuando hay tráfico los equipos (routers) establecen la comunicación utilizando inicialmente un solo canal B, y cuando el tráfico supera un determinado valor umbral prefijado durante un tiempo superior al establecido (por ejemplo tráfico superior a 48 Kb/s durante más de 20 segundos) se efectúa una segunda llamada para conectar por otro canal B (si éste está disponible en ambos lados de la comunicación) disponiendo así de 128 Kb/s; a todos los efectos esta comunicación se comporta como si se tratara de dos líneas punto a punto de 64 Kb/s. Este

proceso de agregación puede seguir hasta agotar los canales B libres en alguno de los dos puntos que se conectan (por ejemplo si uno de ellos es un BRI no podrá agregar más de dos canales); tanto el número máximo de canales a utilizar como las condiciones en las que se establecerán canales adicionales son configurables por el usuario. Cuando se quieren más de dos canales B pero no se requiere la capacidad de un acceso primario es posible contratar varios accesos básicos solicitando al operador que los configure de forma que respondan todos al mismo número de teléfono, con lo que pueden ser utilizados de manera conjunta.

Evidentemente también es posible utilizar los diversos canales B para establecer comunicaciones con diferentes destinos. Por ejemplo un router conectado por un acceso básico puede establecer comunicación simultáneamente con otros dos routers ubicados en sitios diferentes, si utiliza un canal B para comunicar con cada uno. También podría utilizarse el mismo acceso básico simultáneamente para comunicar dos routers entre sí por un canal B mientras que el otro se emplea para hablar por teléfono o para enviar un fax.

Un detalle importante en RDSI es que el costo de un circuito corre por cuenta del extremo que realiza la llamada (de la misma forma que ocurre con el teléfono convencional), y esta regla se aplica de forma independiente para cada canal B; así pues el servicio se facturará al extremo del router que decide establecer el circuito. Esto plantea algunos problemas, por ejemplo en el caso de empresas que tienen un servidor web conectado a Internet a través de un ISP (Internet Service Provider); aquí el ISP se ve obligado a asumir el costo de las conexiones producidas por usuarios de Internet que desean acceder al servidor de la empresa. Existen básicamente dos soluciones a este problema:

- Los equipos se configuran de forma que cuando se produce una petición del exterior el router del ISP llame al de la empresa y cuelgue a continuación; el router de la empresa ya sabe que cuando esto ocurre debe hacer una llamada al ISP porque hay tráfico esperando para ser transmitido; de esta forma el ISP solo asume el costo de una llamada de corta duración de vez en cuando.
- El router del ISP transmite por el canal D un mensaje al router de la empresa solicitándole que llame porque tiene tráfico para él. En este caso el ISP no tiene ningún costo de llamada. Sin embargo la funcionalidad necesaria para realizar esta operación no está disponible en todos los equipos.

Normalmente el servicio RDSI se tarifica por tiempo de utilización de cada conexión, de la misma forma que las comunicaciones por teléfono analógico y con los mismos ámbitos (metropolitano, provincial, nacional e internacional). El RDSI resulta una alternativa a menudo más barata que las líneas dedicadas de 64 Kb/s incluso para conexiones permanentes, especialmente en ámbito metropolitano; en estos casos debe estudiarse y valorarse el costo de ambas alternativas. Además actualmente es posible contratar con telefónica tarifa plana dentro del servicio denominado Novacom Multiplan que es aún más interesante que el RDSI normal en conexiones de larga duración. El servicio Novacom tiene dos modalidades, conmutada y permanente; la permanente establece como su nombre indica una conexión permanente entre los dos teléfonos designados, mientras que la conmutada requiere que se efectúe la llamada; la conmutada es más barata y además permite utilizar el acceso RDSI para llamar a otros destinos cuando se desee, cosa que no es posible en la modalidad permanente. Su menor precio se debe a que al no estar permanentemente establecido el circuito el consumo de recursos en la red telefónica es menor; por otro lado en una conexión conmutada siempre se pueden configurar los routers con unos parámetros de conexión tales que la llamada esté siempre establecida, con lo que se emula el comportamiento de una conexión permanente. La tarifa plana se aplica independientemente para cada canal B, es decir si se establece tarifa plana para un circuito entre dos accesos básicos se establecerá un canal B, pero si el tráfico demanda establecer el segundo canal entre ambos el uso que se haga de este segundo canal se tarificará de la manera habitual, salvo que se contraten dos conexiones de tarifa plana entre ambos.

La posibilidad de utilizar RDSI cuando hay picos de tráfico da una gran flexibilidad. También es interesante el uso de RDSI como servicio de desbordamiento; por ejemplo, una oficina podría tener una línea dedicada de 64 Kb/s y un acceso básico RDSI para disponer en horas punta de un ancho de banda adicional de hasta 128 Kb/s (los 64 Kb/s de la línea dedicada más los 128 Kb/s de los dos canales B). Otro uso de la RDSI es como conexión de emergencia o backup: dos oficinas unidas por una línea dedicada pueden en caso de avería conectar por RDSI en cuestión de segundos, de forma automática y transparente a los usuarios; según el tráfico entre las oficinas la conexión RDSI de reserva podrá ser un

acceso básico, varios acceso básico o un primario, con el que la capacidad podrá llegar a 1.920 Kb/s (30 canales B).

Los ISPs normalmente utilizan accesos primarios RDSI en sus 'puntos de presencia' o POPs (Point Of Presence) para las conexiones de sus usuarios, los cuales podrán emplear accesos RDSI básicos o bien accesos analógicos para acceder al servicio. De esta forma el ISP se evita tener que contratar multitud de conexiones físicas para dar servicio a sus usuarios (a pesar de eso los grandes ISPs tienen multitud de accesos primarios en sus instalaciones). Cada acceso primario permite atender hasta 30 usuarios simultáneamente (o quizá algunos menos si se permite que los usuarios con accesos básicos puedan establecer los dos circuitos simultáneamente).

Una aplicación para la que se utiliza RDSI desde hace bastante tiempo es la videoconferencia. Existen en el mercado equipos que por un precio muy razonable permiten convertir un PC en una estación de videoconferencia; la señal de vídeo es captada por una cámara, enviada al PC para su digitalización y compresión, y enviada después a la estación remota, donde sufre el proceso inverso. En el estado actual de las técnicas de compresión de audio y vídeo es posible efectuar una videoconferencia de calidad aceptable con un acceso básico (2B, 128 Kb/s). Los sistemas de videoconferencia de mayor calidad utilizan tres accesos básicos (6B, 384 Kb/s).

2.6 RDSI DE BANDA ANCHA Y ATM

Para cuando RDSI apareció en el mercado la ITU-T ya estaba trabajando en un nuevo estándar de red digital para servicios avanzados. Dado que se pretendía que la nueva red fuera de elevadas prestaciones, con posibilidad de transmisión de vídeo en alta resolución y servicios similares, se la denominó RDSI de banda ancha, RDSI-BA o B-ISDN (Broadband ISDN). Para no repetir el 'fracaso' que supuso la tardía aparición del estándar RDSI, la ITU-T decidió utilizar esta vez una tecnología realmente novedosa, en la que hacía tiempo pensaban algunos ingenieros pero que suponía un cambio radical de filosofía; la nueva tecnología se denominaba ATM (Asynchronous Transfer Mode). Los primeros estándares B-ISDN/ATM se publicaron en 1988; en ese mismo año la ITU-T adoptó un nuevo proceso más ágil de creación de estándares. A pesar de estas innovaciones, la industria consideró que la ITU-T no era suficientemente ágil en relación con los estándares ATM y en 1991 se creó el ATM forum, que en 1994 reunía ya a más de 150 miembros principales (fabricantes de ordenadores y equipos de comunicaciones, así como compañías telefónicas).

Ya hemos visto la ventaja que suponen las redes de conmutación de paquetes en lo que a aprovechamiento del ancho de banda se refiere; los momentos de inactividad de un usuario son aprovechados por otro; esto es especialmente útiles cuando el tráfico se genera a ráfagas, cosa habitual en los datos. Pero la irregularidad no es una característica exclusiva de los datos, por ejemplo:

- Una conversación telefónica es silencio en su mayor parte; a lo sumo se utiliza al 50% de su capacidad, ya que el canal de comunicación que se establece es full dúplex y normalmente está hablando una persona como mucho.
- El ancho de banda ocupado por el vídeo digital es muy irregular, ya que los modernos sistemas de alta compresión aprovechan la redundancia de información que normalmente hay entre fotogramas sucesivos de una película, lo cual hace que se transmita mucha más información cuando se trata de una escena cambiante que cuando se trata de una imagen estática.

Desgraciadamente las redes de conmutación de paquetes existentes hasta entonces (X.25, Frame Relay e IP) no son adecuadas para voz y vídeo en tiempo real, ya que la ausencia de mecanismos que permitan asegurar calidad de servicio hace que el retardo sea impredecible y que el servicio se degrade con rapidez cuando la red está cargada.

La idea fundamental de ATM consiste en aplicar la filosofía de la conmutación de paquetes a todos los tipos de tráfico de que hemos hablado (voz, vídeo y datos), pudiendo coexistir todos ellos sin problemas en la misma red y discurrir por los mismos medios de transmisión. Para evitar los problemas de retardo y saturación se contemplan varias medidas, entre las que podemos destacar las dos siguientes:

- Un tamaño de paquete fijo de 48 bytes, más 5 de cabecera; el tamaño fijo simplifica el proceso de los paquetes, algo crucial en redes de alta velocidad. Al ser pequeños se asegura que los paquetes con alta prioridad no se verán retrasados de forma importante por esperar a que termine de enviarse el paquete en curso.
- Una amplia diversidad de mecanismos para el control y clasificación del tráfico. El usuario puede elegir el tipo más adecuado a sus necesidades según los requerimientos de la aplicación.

Hasta la aparición de ATM una conversación telefónica digitalizada ocupaba siempre un canal de 64 Kb/s. En ATM, cuando se activa la función conocida como 'supresión de silencios' el caudal generado por una conversación variará con el tiempo en función de lo que hablen los dos interlocutores; los silencios serán aprovechados para acomodar más conversaciones sobre el mismo ancho de banda. Esto supone un cambio radical en un planteamiento que había permanecido inalterado desde que Alexander Graham Bell inventara el teléfono hace más de cien años.

En lo que a medios físicos se refiere, en la tabla 2.12 aparecen los que se han estandarizado en ATM. No todas las interfaces estandarizadas se utilizan en la práctica, las que aparecen en negrita son las más habituales, sobre todo la SONET/SDH de 155,52 Mb/s. Las velocidades bajas (T1 y E1) se usan muy raramente ya que la funcionalidad ATM es poco aprovechable a estas velocidades y el costo que supone la información de cabecera resulta elevado. El estándar especifica de que forma se han de acomodar las celdas en la trama correspondiente a cada interfaz (esto es lo que se conoce como 'mapping ATM'). Todos los medios de transmisión ATM son full dúplex y en todos la transmisión y la recepción utilizan medios físicos independientes.

Velocidad (Mb/s)	Tipo de conexión	Interfaz
1,544	T1 (PDH)	eléctrica (cable coaxial)
2,048	E1 (PDH)	eléctrica (cable coaxial)
6,312	T2 (PDH)	eléctrica (cable coaxial)
25,6	LAN	eléctrica (cable categoría 3)
34,368	E3 (PDH)	eléctrica (cable coaxial)
44,736	T3 (PDH)	eléctrica (cable coaxial)
51,84	STS-1 (SONET)	óptica (fibra monomodo)
100	FDDI (LAN)	óptica (fibra multimodo)
139,264	E4 (PDH)	eléctrica (cable coaxial)
155,52	Fiber Channel	óptica (fibra multimodo)
155,52		eléctrica (cable categoría 5)
155,52	STS-3c/STM-1 (SONET/SDH)	óptica (multimodo y monomodo)
622,08	STS-12c/STM-4(SONET/SDH)	óptica (multimodo y monomodo)
2.488,32	STS-48c/STM-16 (SONET/SDH)	óptica (monomodo)

Tabla 2.12.- Interfaces estándar ATM. Las que aparecen en negrita son las más utilizadas

ATM fue estandarizado por la ITU-T poco después de SDH y ambas tecnologías han sido desarrolladas básicamente para su uso en redes de área extensa. No es de extrañar pues que SDH sea el medio físico preferido por las redes ATM.

En cierto modo ATM es la evolución natural de X.25 y Frame Relay, y como descendiente de ellos comparte algunas de sus características, principios de funcionamiento y nomenclatura. Una red ATM se constituye por medio de un conjunto de conmutadores ATM interconectados. Es un servicio orientado a conexión pudiendo establecerse circuitos virtuales permanentes o conmutados. Los circuitos permanentes (PVC) se definen en la configuración de los equipos y se constituyen automáticamente cada vez que se encienden éstos mientras no se altere dicha configuración; son lo más parecido a líneas dedicadas 'virtuales'. Por el contrario, los circuitos conmutados (SVC) son establecidos por el software cuando se solicitan y terminan cuando el usuario así lo requiere; su establecimiento no está garantizado, ya que depende de que haya recursos disponibles.

Al ser ATM un protocolo orientado a conexión se garantiza que todas las celdas llegan a su destino en el mismo orden en que han salido; sin embargo no se garantiza que lleguen todas las celdas, en situaciones de severa congestión se considera aceptable que haya una pérdida muy reducida (por ejemplo una en 10^{12}).

2.6.1 Conmutadores ATM

Un conmutador ATM típico es un equipo modular formado por un chasis con un procesador central que controla sus funciones y en el que puede instalarse un número variable de interfaces de varios tipos, también llamadas *ports*, *puertos* o *puertas*. Un conmutador pequeño puede tener por ejemplo 16 puertas de 155,52 Mb/s, mientras que uno grande puede tener 64 o más. La capacidad de un conmutador ATM suele medirse por la suma de velocidades de todas sus puertas; así por ejemplo un conmutador con 16 puertas de 155,52 Mb/s tendrá una capacidad total de 2.488 Mb/s. Los conmutadores ATM suelen distinguirse claramente en dos tipos: los pequeños, también llamados de campus, con capacidades de hasta 10 Gb/s y los grandes, generalmente con capacidades a partir de 10 Gb/s, pensados para centrales telefónicas.

Imaginemos ahora un conmutador con 16 puertas de 155,52 Mb/s. Recordemos en primer lugar que cada puerta es full dúplex, por lo que tiene una capacidad de 155,52 Mb/s en entrada y 155,52 Mb/s en salida. Podemos por tanto imaginar este conmutador como formado por 16 puertas de entrada y 16 de salida. A 155,52 Mb/s el conmutador recibe por cada una de sus puertas una celda cada $2,726 \mu\text{s}$ ($53 \times 8 / 155.520.000 = 2,726 \times 10^{-6}$ seg). Vamos a suponer que el conmutador funciona de forma síncrona con un ciclo básico de funcionamiento de $2,726 \mu\text{s}$ por lo que en cada ciclo entra una celda por cada una de sus interfaces. El proceso de cada celda requiere normalmente varios ciclos, pero afortunadamente el conmutador puede funcionar en modo pipeline, es decir, una vez llena la 'cadena de montaje' se empieza a emitir una celda por ciclo. El conmutador ha de redirigir cada celda a la puerta correspondiente, para lo cual dispone en su memoria de una tabla que le indica en función de la puerta de entrada y la cabecera de la celda cual debe ser la puerta de salida. Normalmente los circuitos virtuales son full dúplex, por lo que la tabla será simétrica, es decir si un determinado circuito entra por la puerta 3 y sale por la 7 habrá otro que entre por la puerta 7 y salga por la 3. En este proceso el conmutador ha de procurar descartar el mínimo posible de celdas y no alterar nunca el orden dentro de un mismo circuito.

Dos circuitos virtuales diferentes pueden tener tengan distintas puertas de entrada pero la misma puerta de salida. En este caso si en el mismo ciclo llega una celda por cada circuito se encontrarán que desean salir ambas por la misma puerta a la vez. El conmutador no puede descartar ninguna de ambas, ya que esto produciría una pérdida inaceptable de celdas. Algunos conmutadores optan en estos casos por retener una de las dos celdas en un buffer en el puerto de entrada, hasta el ciclo siguiente en que puede ser procesada hacia su destino. Esto tiene el inconveniente de retener entretanto el tráfico entrante en esa línea dirigido a otros circuitos virtuales que podrían tener despejado el resto de su camino, produciendo una disminución en el rendimiento en situaciones de elevado tráfico; este fenómeno se conoce como *bloqueo en la cabecera de la línea (head-of-line blocking)* y era frecuente observarlo en conmutadores ATM de primera generación.

Una solución más eficiente es poner la celda en un buffer de espera en el puerto de salida, de forma que la celda pueda ser enviada en el ciclo siguiente. De esta forma se evita bloquear la línea de entrada.

En cualquiera de ambos casos es necesario disponer de buffers generosos para poder almacenar las celdas en tránsito. Un conmutador ATM tiene normalmente capacidad para almacenar varias decenas de miles de celdas. Algunos conmutadores tienen buffers asignados estáticamente por interfaz, mientras que otros disponen de una zona común que se va distribuyendo según lo requieren las necesidades. Tampoco es una buena solución dotar al conmutador de buffers enormes, ya que podrían llegar a producirse retardos inaceptables en la conmutación de celdas de algunos circuitos. Evidentemente ningún conmutador ATM será capaz de resistir indefinidamente la entrada de dos flujos de 155,52 Mb/s que intenten salir por una misma puerta de 155,52 Mb/s; en estos casos es preciso que haya retención en el tráfico por parte del emisor, o habrá necesariamente descarte de celdas.

2.7 XDSL

En los últimos años los usuarios particulares o residenciales demandan accesos a Internet de alta velocidad, cosa que las empresas de redes de televisión por cable están ofreciendo desde hace bastante tiempo y que las compañías telefónicas no pueden ofrecer con su red tradicional.

Aparte de la limitación en velocidad el uso de la red telefónica plantea a las operadoras otro problema, el de la saturación de la red debido a que los usuarios que navegan por Internet tienden a mantener establecida la conexión durante un tiempo mucho mayor que los que hacen una llamada convencional.

La limitación en velocidad que impone la red telefónica (33,6, 56 o 64 Kb/s según los casos) se debe fundamentalmente a la ‘tiranía’ de los 3,1 KHz, es decir a la escasa anchura del canal telefónico. En principio el par de cobre del bucle de abonado sería capaz de anchos de banda mucho mayores. Se han ideado varios sistemas que utilizan el bucle de abonado para conectar a éste con la central telefónica, pero a partir de aquí emplean una red de datos paralela con lo cual evitan por completo utilizar la red telefónica. Esto tiene una doble ventaja: por un lado se evita la limitación de capacidad debida a la escasa anchura del canal telefónico y por otro se evita ocupar la red telefónica con conexiones de datos, reduciendo así el problema de saturación que antes comentábamos debido a la larga duración de este tipo de conexiones. Los sistemas que emplean esta arquitectura se conocen genéricamente como DSL (Digital Subscriber Loop) y serán los que describiremos a continuación.

2.7.1 ADSL

ADSL (Asymmetric Digital Subscriber Loop) es la tecnología DSL más conocida. Nació con la finalidad de competir con las redes de televisión por cable, es decir ofrecer al usuario un servicio de transmisión de datos de alta velocidad a un precio asequible. La principal ventaja de ADSL es que utiliza el mismo cable de pares que el teléfono, lo cual lo sitúa en una posición altamente ventajosa frente a las redes de televisión por cable; mientras que el número de viviendas accesibles por cable telefónico es de unos mil millones se estima que solo 12 millones de viviendas en todo el mundo tienen acceso al servicio de red de televisión por cable bidireccional, que es el que resulta apropiado para transmisión de datos. Además ADSL es compatible con el teléfono analógico, es decir el usuario puede utilizar simultáneamente su teléfono y la conexión de datos de alta velocidad que suministra ADSL, aunque ambos servicios utilicen el mismo par de cobre. La compatibilidad normalmente solo es posible con telefonía analógica, no con accesos RDSI.

Como su nombre indica ADSL es un servicio asimétrico, es decir se obtiene un caudal superior en un sentido que en el contrario. En el denominado sentido ‘descendente’, del proveedor al usuario, se consiguen caudales de 2 a 8 Mb/s; en sentido ascendente (del usuario al proveedor) el caudal puede oscilar entre 200 Kb/s y 1 Mb/s. La capacidad máxima de ADSL depende de la distancia y de la calidad del cable utilizado en el bucle de abonado (grosor y número de empalmes fundamentalmente), como puede verse en la tabla 2.13. El alcance máximo es de 5,5 Km, similar al caso de RDSI.

Caudal Desc. (Mb/s)	Grosor (mm)	Alcance (Km)
2	0,5	5,5
2	0,4	4,6
6,1	0,5	3,7
6,1	0,4	2,7

Tabla 2.13.- Relación entre caudal, grosor y alcance en ADSL

La asimetría de ADSL resulta muy adecuada en el caso de un usuario residencial cuya principal finalidad es navegar por Internet, ya que en sentido descendente se transmite mucha más información que en ascendente (páginas web e imágenes frente a algunos comandos y clicks del ratón); pero la asimetría es perjudicial cuando se quiere hacer videoconferencia (que genera caudales simétricos) o si el usuario quiere montar un servidor que sea accesible desde la Internet, lo cual genera más tráfico ascendente que descendente.

Para transmitir los datos ADSL utiliza frecuencias en el rango de 30 KHz a 1100 KHz, aproximadamente. Las frecuencias inferiores a 30 KHz no se utilizan para evitar interferir con el teléfono analógico, que utiliza frecuencias hasta 4 KHz. Para evitar los problemas producidos por ecos y reducir el crosstalk se utiliza un rango de frecuencias diferente para el sentido ascendente y descendente.

Crear un canal con un ancho de banda tan grande como el de ADSL no es fácil, ya que el comportamiento del cable de pares es poco lineal, por ejemplo la atenuación es mucho mayor a 1100 KHz que a 30 KHz. Además si se produce una interferencia a una frecuencia determinada perjudica la calidad de todo el canal. Para evitar estos problemas se ha desarrollado una técnica conocida como **DMT** (Discrete Multi Tone) que consiste en dividir la gama de frecuencias en 256 subcanales denominados bins, que ADSL maneja de forma independiente. Los bins tienen todos una anchura de 4,3125 KHz y se numeran de 0 a 255. Los bins 0 a 5 (0-26 KHz) se reservan para el teléfono analógico, del 6 al 32 (26-142 KHz) se utilizan para el sentido ascendente y del 39 al 255 (168-1104 KHz) para el tráfico descendente. Los bins 33 a 38 (142-168 KHz) se pueden asignar tanto al sentido ascendente como al descendente. La asignación de un rango mayor en descendente conlleva la asimetría característica de ADSL, sin embargo la asimetría no es solo consecuencia de la distribución de frecuencias; el crosstalk es mayor en el sentido ascendente que en el descendente y es mayor cuanto mayor es la frecuencia; por este motivo sería técnicamente más difícil desarrollar un ADSL simétrico o con la asimetría inversa (es decir un caudal mayor en ascendente que en descendente).

En cierto modo podemos imaginar una conexión entre dos módems ADSL como formada por una gran batería de módems convencionales transmitiendo en paralelo sobre líneas físicas diferentes. La cantidad de tareas que han de desempeñar los módems ADSL requieren procesadores muy potentes que hasta hace relativamente poco tiempo no era posible integrar en un solo chip, lo cual los hacía muy costosos. El hecho de que los bins sean estrechos asegura un comportamiento lineal, en atenuación y desfase por ejemplo, dentro de cada bin y además permite optimizar la transmisión utilizando en cada bin la técnica de modulación que mejor se adapta a su relación señal/ruido, cuanto mayor sea ésta más eficiente será la modulación que se utilice y se transmitirán más bits por símbolo; por cada bin se transmiten 4.000 símbolos por segundo. Si se produce una fuerte interferencia a una determinada frecuencia el bin correspondiente puede llegar a anularse, pero el problema no repercute en los demás bins. En ADSL son relativamente normales las interferencias debidas a problemas en el bucle de abonado, por ejemplo antiguas derivaciones que no han sido suprimidas; también puede haber interferencias externas causadas por ejemplo por una emisora de radio cercana, ya que la onda media utiliza el mismo rango de frecuencias que ADSL y el cable que se utiliza no es apantallado.

A las frecuencias que utiliza ADSL la atenuación, en los casos de longitudes máximas, puede llegar a ser de 90 dB, es decir la potencia recibida en el destino puede ser una milmillonésima parte de la potencia emitida; además el emisor no puede utilizar una potencia demasiado elevada ya que el bucle de abonado viaja la mayor parte del trayecto en una manguera de cables que lleva multitud de cables pertenecientes a diferentes abonados y si la potencia fuera excesiva el crosstalk entre pares diferentes sería inaceptable. Resulta increíble que ADSL funcione en un medio tan hostil.

DMT es la técnica de modulación más extendida en ADSL pero no es la única. Otra técnica conocida como CAP (Carrierless Amplitude Phase) realiza un reparto similar del rango de frecuencias pero sin dividir el canal ascendente y descendente en bins. Al manejar un canal muy ancho de forma global el rendimiento que se obtiene es menor que con DMT, y hay que aplicar técnicas de ecualización adaptativa muy complejas para intentar corregir los problemas debidos a defectos en el bucle de abonado. En conjunto CAP es una técnica más sencilla y fácil de implementar que DMT, pero menos robusta y eficiente. Además CAP no está estandarizada mientras que DMT es un estándar ITU-T. En algunas de las primeras implementaciones de ADSL se utilizaba CAP, pero la tendencia actual es hacia el uso generalizado de DMT.

Uno de los principales problemas que presenta ADSL es la incertidumbre de accesibilidad del servicio. De entrada el usuario que se encuentra a una distancia mayor de 5,5 Km de su central no puede acceder al servicio (se calcula que un 10% de los abonados se encuentra en esta situación) pero aún en el caso de que se encuentre a una distancia menor no es posible garantizar a priori la viabilidad del servicio sin antes hacer medidas y pruebas, ya que el estado del bucle de abonado, número de empalmes y derivaciones que tenga, etc., son circunstancias que influyen de forma decisiva en su calidad para la transmisión de señales de alta frecuencia. Estas características suelen estar poco o nada documentadas en las compañías

telefónicas, por lo que la única forma de saber si un determinado bucle estará capacitado para ADSL es probándolo; en caso de que el resultado sea negativo se puede intentar reacondicionar el bucle o cambiar a ese abonado a otro par para intentar suministrarle el servicio. En cualquier caso se estima que solo el 5% de los bucles de abonado requiere este tipo de actuaciones.

Los módems ADSL pueden ser internos (conectados al bus PCI) o externos. En este último caso pueden conectarse al ordenador por Ethernet 10BASE-T, por ATM a 25 Mb/s o al puerto USB. También existen routers ADSL/Ethernet y conmutadores ADSL/ATM.

Independientemente de cómo sea la conexión entre el módem y el ordenador el tráfico en la parte ADSL de la red siempre se realiza por celdas ATM. En el caso de que el ordenador disponga de una tarjeta ADSL conectada al bus PCI o una interfaz ATM podrá acceder a las funcionalidades propias de ATM desde su ordenador

2.7.1.1 ADSL G.Lite

Los teléfonos no están preparados para recibir las frecuencias de hasta 1 MHz con que trabaja ADSL. Inversamente los módems ADSL no soportan muy bien las señales de baja frecuencia características del teléfono analógico. Para reducir la interferencia mutua entre el teléfono y el módem ADSL se instala un divisor de frecuencias o 'splitter' en ambos extremos del bucle de abonado, es decir en la central telefónica y en la vivienda. El divisor de frecuencias está formado por dos filtros, uno para las altas frecuencias y uno para las bajas, a los que se conecta respectivamente el teléfono y el módem ADSL. En la central telefónica la instalación del splitter no plantea problemas, pero en la vivienda su instalación aumenta de forma considerable los costos de instalación de un acceso ADSL. Por esta razón se ha desarrollado una versión de ADSL denominada ADSL G.Lite³ que funciona sin necesidad del splitter en el lado de la vivienda; el del lado de la central telefónica se mantiene ya que su instalación no requiere el desplazamiento del técnico. Para reducir la interferencia producida entre el teléfono y el módem ADSL como consecuencia de la supresión del splitter se adoptan las siguientes medidas:

- Se reduce la frecuencia máxima del canal descendente; por ejemplo cuando se utiliza modulación DMT en ADSL G.Lite el número total de bins se reduce a la mitad, con lo que la frecuencia máxima es de 552 KHz. Esto reduce la interferencia producida en el teléfono a costa de reducir la capacidad en el canal descendente.
- Se reduce en 6 dB la potencia emitida por el módem ADSL situado en la vivienda, que es el que más puede afectar el funcionamiento del teléfono. Esto equivale a reducir la potencia a la cuarta parte. A cambio la relación señal/ruido disminuye en 6 dB, lo cual conlleva una reducción en la capacidad (o el alcance) del canal ascendente.
- Se integra en el módem ADSL un filtro de bajas frecuencias para evitar que el módem ADSL sufra las interferencias producidas por el teléfono; dicho de otro modo, desde el punto de vista del módem ADSL el comportamiento es equivalente a cuando había un splitter.
- Se utilizan modulaciones menos eficientes, para compensar por la mayor cantidad de ruido. Mientras que en ADSL normal (con splitter) pueden llegar a transmitirse 16 bits por símbolo, en ADSL G.Lite el máximo que se utiliza es de 8 bits por símbolo.

En conjunto ADSL G.Lite consigue unos rendimientos típicos máximos de 1,5 Mb/s en sentido descendente y de 200 Kb/s en ascendente. Aunque inferior al de ADSL normal es suficiente para muchas aplicaciones y a cambio simplifica y abarata considerablemente el costo de instalación. Existen equipos ADSL de central telefónica que pueden interoperar indistintamente con usuarios ADSL y ADSL G.Lite

2.7.1.2 RADSL

Otra variante de ADSL bastante extendida es la denominada RADSL (Rate adaptative ADSL). La idea de RADSL es la misma que el 'retraining' que ya hemos comentado al hablar de los módems V.34 de red conmutada, es decir dar la posibilidad de que los módems además de negociar la velocidad inicial de

³También llamada ADSL Universal o ADSL 'Splitterless'.

conexión en función de la calidad de la línea la revisen regularmente y ajusten la velocidad en mas o en menos de acuerdo con la calidad de ésta. Un equipo RADSL puede interoperar con uno no RADSL, si bien en este caso no se produce retraining a no ser que el usuario inicialice su módem. Hoy en día hay bastantes equipos en el mercado que son RADSL.

2.7.1.3 ADSL en España

Desde el 15 de septiembre de 1999 Teleline, la filial de Telefónica para acceso a Internet, ofrece el servicio GigADSL de conexión a Internet a través de ADSL. Se trata de un servicio con splitter que admite tres modalidades, Básica, Class y Premium, con caudales descendente/ascendente de 256/128, 512/256 y 2000/300 Kb/s, respectivamente. Las cuotas mensuales son de 8.017, 13.966 y 27.328 ptas. respectivamente. Para poder contratar el servicio es preciso encontrarse en una zona con cobertura, cosa que puede averiguarse fácilmente en www.sgc.mfom.es/legisla/tarifas/rdley16_99.htm.

2.7.2 VDSL

Al hablar de ADSL hemos visto como la capacidad aumentaba a medida que se reducía la distancia. El diseño de ADSL prevé una capacidad máxima de unos 8 Mb/s para una distancia de unos 2-3 Km. Aunque técnicamente sería posible conseguir una capacidad mayor a distancias menores ADSL no contempla velocidades mayores y por tanto no obtiene beneficio en estos casos. Para distancias menores de 1,5 Km se está experimentando otro sistema denominado VDSL (Very high data rate Digital Subscriber Loop), que permite mayores caudales; de nuevo la capacidad dependerá de la longitud y calidad del bucle de abonado, los valores típicos en sentido descendente aparecen en la tabla 2.14.

Distancia (m)	Caudal (Mb/s)
300	51,84-55,2
1000	25,92-27,6
1500	12,96-13,8

Tabla 2.14.- Velocidades típicas en sentido descendente de VDSL según la distancia

Para el sentido ascendente se barajan tres alternativas:

- Un servicio fuertemente asimétrico con un caudal sensiblemente inferior, de 1,6-2,3 Mb/s
- Un servicio de 19,2 Mb/s
- Un servicio completamente simétrico

Las implementaciones de VDSL que se han desarrollado hasta la fecha utilizan la primera opción.

En cierto modo podemos considerar VDSL como un 'super' ADSL para cortas distancias. Aunque tenga una capacidad mayor es técnicamente mas sencillo que ADSL ya que la menor distancia simplifica las cosas de forma considerable.

VDSL se encuentra todavía en proceso de estandarización. Existen sin embargo ya algunas experiencias piloto de servicios comerciales en Estados Unidos basadas en el uso de esta tecnología.

Debido a su corto alcance VDSL sólo puede implantarse en un ámbito muy próximo a la central telefónica. Para su despliegue generalizado VDSL requiere la implantación de nodos de distribución muy cerca de las viviendas, por ejemplo en cada manzana o en cada vecindad; estos nodos necesitan una conexión con la central por fibra óptica, lo cual ha dado lugar a las redes denominadas FTTC (Fibre To The Curb, curb=acera en inglés), FTTB (Fibre To The Building) y FTTN (Fibre To The Neighborhood).

2.7.3 HDSL

HDSL (High speed Digital Subscriber Loop) es la tecnología DSL más extendida, la más antigua y la primera que se estandarizó y curiosamente es la menos conocida de las que hemos comentado hasta ahora. La razón es sencillamente que no es una tecnología viable para el acceso residencial de banda ancha.

A principios de los años ochenta los ingenieros de la Bell intentaban desarrollar una tecnología que les permitiera establecer enlaces T1 a través de pares de cobre de las mangueras normalmente utilizadas para los bucles de abonado. La finalidad fundamental era disponer de un mecanismo que permitiera establecer múltiples canales entre dos centrales telefónicas que solo estuvieran unidas mediante cable de pares, sin tener que utilizar un par diferente para cada canal. La tecnología utilizada entonces en las líneas T1 empleaba frecuencias tan elevadas e introducía tanto crosstalk en los pares vecinos que no era posible meter más de un enlace T1 en una misma manguera.

La solución a este problema, que fue el denominado HDSL, consistía en repartir el tráfico en dos o tres pares, y emplear técnicas de codificación más complejas que permitiera meter más bits por baudio, reduciendo así de forma sensible la frecuencia máxima utilizada y con ello el crosstalk en pares vecinos.

HDSL es la tecnología utilizada actualmente por las compañías telefónicas para instalar líneas T1 y E1 (1,5 y 2 Mb/s respectivamente). Además de permitir la instalación de varias líneas sobre una misma manguera de cables HDSL presenta la ventaja de tener un mayor alcance que la tecnología T1/E1 tradicional, con lo que la cantidad de repetidores a instalar se reduce.

HDSL no es interesante para acceso residencial por las siguientes razones:

- Utiliza dos o tres pares de hilos para repartir la señal. Cualquier opción que suponga el uso de más de un par de cables por vivienda requiere recablear la red, lo cual es impensable.
- No reserva la zona de bajas frecuencias para la voz, por lo que es incompatible con el teléfono.
- Es un servicio completamente simétrico que utiliza el mismo rango de frecuencias en cada sentido, por lo que resulta más sensible que ADSL al crosstalk, y además se ve afectado por el eco.

2.8 TELEFONÍA CELULAR DIGITAL. GSM

La popularización de los ordenadores personales ha hecho que crezca considerablemente la demanda de sistemas de transmisión de datos por medios inalámbricos. Desde 1946 existen sistemas analógicos de radioteléfono, pero durante muchos años han tenido un coste prohibitivo para la mayoría de las aplicaciones y una cobertura geográfica muy escasa. En los últimos años ambos factores han evolucionado de forma drástica, lo cual hace posible hoy en día considerar estos sistemas como una alternativa interesante en muchos casos.

Existen actualmente diversos sistemas de comunicación inalámbrica, todos basados en ondas de radio. Como ya hemos dicho, el uso de las frecuencias de radio está regulado, y son muy pocas las entidades que pueden solicitar canales del espectro radioeléctrico. Cuando se asignan frecuencias en cada zona del espectro se toma en consideración el alcance que tendrá la emisión; de esta forma se puede reutilizar una misma frecuencia en dos emisoras separadas por una distancia lo suficientemente grande para que no interfieran entre sí. El alcance viene determinado fundamentalmente por la frecuencia y por la potencia de la emisión. Por ejemplo las frecuencias de emisoras comerciales de frecuencia modulada se reutilizan más que las de emisoras de onda media, ya que la FM tiene un alcance menor.

La mayoría de los sistemas de comunicación inalámbrica actualmente en uso se basan en el principio de la partición del espacio geográfico en células, de forma que el usuario que se encuentra dentro de una célula comunica con la estación base correspondiente; cuando el usuario se mueve y pasa a otra célula su comunicación se realiza con la nueva estación base. Para evitar interferencias células contiguas utilizan siempre frecuencias diferentes, pero células no contiguas pueden reutilizar la misma frecuencia. De esta forma es posible cubrir un área arbitrariamente grande utilizando únicamente siete frecuencias. En

realidad cada usuario dentro de una célula ha de utilizar una frecuencia distinta, por lo que lo que en realidad se asigna no son siete frecuencias sino siete grupos o rangos de frecuencias.

De manera similar a la telefonía convencional, la telefonía celular empezó siendo analógica. Mas tarde apareció la telefonía celular digital, que ya ha desplazado prácticamente en su totalidad a la analógica. Entre las ventajas de la telefonía celular digital frente a la analógica podemos destacar las siguientes:

- La calidad de la comunicación es mejor, ya que pueden incorporarse mecanismos de corrección de errores. No existen apenas zonas de penumbra: si hay cobertura la calidad es buena, si no la hay es imposible.
- Las conversaciones pueden encriptarse, asegurando así la privacidad de la comunicación.
- Es posible incluir más conversaciones en un mismo ancho de banda.
- Es posible transmitir por el mismo sistema voz, fax y datos con una velocidad mucho mayor.

El primer sistema de telefonía celular analógica, denominado AMPS (Advanced Mobile Phone System), fue instalado por los laboratorios Bell en Estados Unidos en 1982. AMPS era el único sistema de comunicación de este tipo en uso en los Estados Unidos. Cuando llegó la telefonía celular digital aparecieron varios sistemas, unos compatibles y otros incompatibles con AMPS y otros no compatibles; al menos dos de esos sistemas están bastante extendidos actualmente. Una situación similar se vivió en Japón, que optó por otro sistema llamado JDC.

En Europa la telefonía celular analógica apareció fundamentalmente para cubrir una necesidad de comunicación interna de cada país. No se prestó mucha atención a la interoperabilidad entre países y aparecieron cinco sistemas diferentes de telefonía analógica, todos incompatibles entre sí. En esta situación cuando se planteó establecer un servicio de telefonía digital las PTTs rápidamente se pusieron de acuerdo en que debían utilizar un mismo sistema digital que permitiera la interoperabilidad entre países, y que no tendría por que ser compatible con ninguno de los sistemas analógicos existentes. Esta decisión dio lugar al sistema conocido como GSM (Global System for Mobile communications), y fue desarrollado antes que los sistemas digitales americanos. GSM es utilizado actualmente en 50 países y es considerado un éxito de la coordinación y tecnología europea, pues es superior a los sistemas americano o japonés.

El sistema GSM utiliza una banda alrededor de la frecuencia de 900 MHz. Existe una segunda banda alrededor de 1,8 GHz que a veces se denomina DCS 1800, cuyo funcionamiento es idéntico al de la banda de 900 MHz. En estas bandas se definen dos grupos de 124 canales de 200 KHz, uno entre 935,2 y 959,8 MHz para la comunicación descendente (de estación base a estación móvil) y otro entre 890,2 y 914,8 MHz para la comunicación ascendente (de estación móvil a estación base). En cada canal se utiliza multiplexación por división de tiempos para poder soportar hasta 8 conversaciones (o circuitos) simultáneamente. Cada canal de 200 KHz transmite información digital a una velocidad de 270.833 bps, de los que una buena parte es información de control, sincronización y control de errores. Cada canal transporta ocho circuitos cada uno de los cuales puede llevar una conversación digitalizada que ocupa 13,6 Kb/s o un canal de datos con una capacidad de 9,6 Kb/s. Algunos países están haciendo ya experiencias de transmisión de datos con tecnología GSM a 64 Kb/s. En su conjunto la red de comunicaciones GSM es una obra de ingeniería altamente sofisticada.

Debido a la manera como se reparten los canales y las frecuencias la capacidad de una red GSM es constante por célula. Por eso la manera de desplegar una red GSM normalmente es crear células tan grandes como permitan las condiciones de cobertura, y a medida que aumenta la densidad de usuarios en una célula dividir dicha célula en varias más pequeñas. Los equipos emisores de las estaciones base en células más pequeñas emiten con una potencia menor para así tener menos alcance. Los teléfonos GSM ajustan dinámicamente su potencia de emisión dentro de un amplio rango emitiendo con la potencia mínima necesaria para comunicar con la base; de esta forma se adaptan al tamaño de la célula en la que se encuentran.

Para poder acomodar una conversación en 13,6 Kb/s se desarrollaron como parte del estándar GSM nuevos algoritmos de compresión de la voz. Esto permite aprovechar mejor la capacidad disponible, a cambio de aumentar la complejidad en el equipo del usuario (el teléfono GSM ha de llevar un procesador

capaz de realizar la compresión/descompresión en tiempo real) y degradar un poco la calidad (una conversación por GSM no tiene la misma calidad que una conversación normal, incluso en condiciones óptimas de cobertura).

En España existe un servicio de telefonía celular analógica ofrecido por Telefónica conocido como Moviline. En telefonía digital GSM existen tres operadores, Telefónica (Movistar), Airtel y Retevisión (Amena). Existe un servicio de pasarela entre la red GSM y las redes telefónicas convencionales, analógica y digital.

Los teléfonos GSM también pueden ser utilizados para enviar pequeños mensajes escritos, a modo de mensáfonos. Existen también servicios de pasarela que permiten desde la Internet enviar un mensaje a un teléfono GSM cualquiera de todo el mundo.

2.9 SATÉLITES DE COMUNICACIONES

Los satélites artificiales son un medio estupendo para emitir señales de radio en zonas amplias o poco desarrolladas, ya que pueden utilizarse como enormes antenas suspendidas del cielo. El primer satélite de comunicaciones se puso en órbita en 1962. La primera transmisión de televisión vía satélite se llevó a cabo en 1964. Dado que no hay problema de visión directa las emisiones vía satélite suelen utilizar frecuencias elevadas, en el rango de los GHz que son más inmunes a las interferencias; además la elevada direccionalidad de las ondas a estas frecuencias permite 'alumbrar' zonas concretas de la tierra.

Los satélites comerciales funcionan en tres bandas de frecuencias llamadas C, Ku y Ka; análogamente a lo que ocurría en GSM se utiliza un rango distinto para la comunicación ascendente (tierra→satélite) que para la descendente (satélite→tierra), según se detalla en la tabla siguiente:

Banda	Frecuencia descendente (GHz)	Frecuencia ascendente (GHz)	Anchura (GHz)	Problemas	Ejemplos
C	3,7-4,2	5,92-6,42	0,5	Interferencia terrestre	Intelsat, Telecom
Ku	10,7-12,75	13,0-15,0	2,0	Lluvia	Astra, Eutelsat, Hispasat, Intelsat, Telecom.
Ka	17,7-21,7	27,5-30,5	4-3	Lluvia, costo equipos	Teledesic

Tabla 2.15.- Bandas utilizadas en las comunicaciones vía satélite

La mayoría de las emisiones de televisión vía satélite se producen en la banda Ku.

2.9.1 Satélites geoestacionarios

El período orbital de los satélites depende de su distancia a la Tierra, cuanto más cerca más corto es éste. Los primeros satélites de comunicaciones tenían un período orbital que no coincidía con el de rotación de la Tierra sobre su eje, por lo que tenían un movimiento aparente en el cielo; esto hacía difícil la orientación de las antenas, y cuando el satélite desaparecía en el horizonte la comunicación se interrumpía.

A una altura de exactamente 35.876,04 Km el período orbital del satélite coincide exactamente con el de rotación de la tierra. A esta órbita se la conoce como el cinturón de Clarke, ya que fue el famoso escritor de ciencia ficción Arthur C. Clarke el primero en sugerir esta idea en el año 1945 (además de escritor Clarke era un científico que trabajaba en el campo de los satélites artificiales). Vistos desde la tierra los satélites que giran en esta órbita parecen estar inmóviles en el cielo, por lo que se les llama satélites geoestacionarios o satélites GEO. Los satélites geoestacionarios tienen dos ventajas importantes para las

comunicaciones: permiten el uso de antenas fijas pues su orientación no cambia y aseguran un contacto permanente con el satélite ya que no desaparecen por el horizonte.

No es conveniente poner muy próximos en el espacio dos satélites que funcionen en la misma banda de frecuencias, ya que pueden interferirse. En la banda C la distancia mínima es de 2 grados, y en Ku y Ka de un grado. Esto limita en la práctica el número total de satélites que puede haber en toda la órbita geostacionaria a 180 en la banda C y 360 en las Ku y Ka. La distribución de bandas y espacio en la órbita geostacionaria se realiza mediante acuerdos internacionales.

Cada una de las bandas utilizadas en los satélites se divide en canales. Para cada canal suele haber en el satélite un repetidor, llamado **transponder** o **transpondedor**, que se ocupa de captar la señal ascendente y retransmitirla de nuevo hacia la tierra en la frecuencia que le corresponde. Dado que el transpondedor ha de ser ligero y consumir poca potencia eléctrica las emisiones descendentes no suelen ser muy potentes, del orden de 50 a 100 vatios. Para llegar a la tierra con una potencia así las emisiones se hacen muy direccionales y en tierra se utiliza antenas parabólicas muy direccionales y de alta ganancia. El uso de antenas altamente direccionales junto a la elevada direccionalidad de las altas frecuencias hace posible concentrar las emisiones vía satélite a regiones geográficas muy concretas, hasta de unos pocos cientos de kilómetros. Esto permite evitar la recepción en zonas no deseadas y reducir la potencia de emisión necesaria, o bien concentrar el haz para así aumentar la potencia recibida por el receptor reduciendo así el tamaño de la antena parabólica necesaria. Por ejemplo el satélite Astra tiene una *huella* que se aproxima bastante al continente europeo.

Cada transponder puede tener un ancho de banda de 26 a 72 MHz, y puede utilizarse para enviar señales analógicas de vídeo y/o audio, o señales digitales moduladas en una portadora analógica como ocurre en el caso de la televisión digital que envía la información de vídeo codificada en flujos MPEG-2; también puede enviarse audio digital (con una calidad comparable al CD), conversaciones telefónicas digitalizadas, datos, etc., pero siempre modulados en la portadora analógica correspondiente. La modulación utilizada es la denominada QPSK (Quadrature Phase Shift Keying) que da una eficiencia de 2 bits por símbolo; por ejemplo un transponder del Eutelsat tiene una anchura de 38 MHz y transmite 27,5 Msímbolos/s o sea 55 Mb/s.

Para la transmisión de datos vía satélite se utilizan estaciones de emisión-recepción de bajo costo llamadas **VSAT (Very Small Aperture Terminal)**. Una estación VSAT típica tiene una antena de 1 metro de diámetro y un emisor de 1 vatio de potencia. Normalmente las estaciones VSAT no tienen potencia suficiente para comunicar entre sí a través del satélite (VSAT-satélite-VSAT), por lo que se suele utilizar una estación repetidora en tierra denominada *hub* (centro o eje en inglés) que actúa como repetidor; así la comunicación ocurre con dos saltos tierra-aire (VSAT-satélite-hub-satélite-VSAT); un solo hub puede dar servicio a múltiples comunicaciones VSAT.

En los últimos años han empezado a aparecer ISPs que ofrecen acceso a Internet vía satélite. En la implantación de estos servicios ha influido de manera decisiva el estándar DVB-S (Digital Video Broadcast – Satellite) y la difusión en el mercado de equipos receptores de bajo costo aprovechando los mismos componentes que se utilizan en los decodificadores de televisión digital vía satélite. Normalmente se trata de tarjetas PCI que se instalan en el PC e incorporan la conexión para la antena vía satélite. Los caudales que se consiguen normalmente están entre 300 Kb/s y 2 Mb/s. Dado que estos equipos suelen ser únicamente receptores el retorno se realiza mediante módem o RDSI, lo cual da una comunicación asimétrica, como en el caso de ADSL. También es posible, con un costo considerablemente superior, realizar el retorno vía satélite, pero aún en este caso el caudal suele ser asimétrico.

La comunicación vía satélites geostacionarios tiene algunas características singulares. Por un lado la transmisión a grandes distancias introduce un retardo inusualmente elevado en la propagación de la señal. Con 36.000 Km de altura orbital el viaje de ida y vuelta al satélite que ha de realizar la señal supone un retardo de unos 270 ms⁴. En una comunicación en la que el retorno se haga también vía satélite estos tiempos se duplican, y si se trata de una comunicación VSAT-VSAT los tiempos se duplican nuevamente debido a la necesidad de pasar por el hub. A título comparativo en una comunicación terrestre por fibra óptica a 10.000 Km de distancia el retardo puede suponer 50 milisegundos. Estos retardos suponen una limitación importante en aplicaciones interactivas, como videoconferencia o voz sobre IP. En el caso de protocolos de transporte que requieren el envío de acuses de recibo (como TCP) estos retardos limitan el

⁴ A 300.000 Km/s que es la velocidad de propagación de las ondas electromagnéticas en el aire y en el vacío (en el vidrio o en el cobre es de unos 200.000 Km/s)

rendimiento máximo que es posible obtener. En el caso de TCP hay una modificación denominada ‘ventana grande’ (RFC 1106) que resuelve este problema.

Otra característica singular de los satélites es que sus emisiones siempre son broadcast por naturaleza. Tiene el mismo costo enviar una señal a una estación que enviarla a todas las estaciones que se encuentren dentro de la *huella* del satélite. Para algunas aplicaciones esto es muy interesante, mientras que para otras donde la seguridad es importante es un inconveniente, ya que las transmisiones han de ser encriptadas.

Una tercera característica que se deriva de la anterior es el hecho de que el medio de comunicación sea compartido. Es necesario implementar entonces un protocolo de acceso al medio o protocolo MAC, ya que se plantean problemas similares a los de una red local de tipo broadcast.

El costo de una transmisión vía satélite es independiente de la distancia, siempre que las dos estaciones se encuentren dentro de la huella del mismo satélite. Además no hay necesidad de desarrollar infraestructuras terrestres y el equipamiento necesario es relativamente reducido, por lo que los satélites son especialmente adecuados para enlazar instalaciones provisionales, que tengan cierta movilidad o que se encuentren en zonas donde la infraestructura de comunicaciones está poco desarrollada.

2.9.2 Satélites de órbita baja

Como hemos dicho los satélites con órbitas inferiores a 36.000 Km tienen un período de rotación inferior al de la Tierra, por lo que su posición relativa en el cielo cambia constantemente. La movilidad es tanto más rápida cuanto menor es su órbita. En los últimos años se han puesto en marcha diversos proyectos que pretenden ofrecer servicios de comunicaciones basados en el uso de satélites de órbita baja o LEO (Low Earth Orbit), entre 750 y 1500 Km de altura. A estas alturas el período orbital es menor de 24 horas, por ejemplo a 750 Km es de 90 minutos. Esto hace que el satélite desaparezca de la vista a los pocos minutos, lo cual hace la comunicación poco útil. Para evitar este problema se ponen en la misma órbita varios satélites adecuadamente espaciados entre sí, de forma que cuando uno desaparece ya está el siguiente a la vista. Además se establecen varias órbitas circumpolares (siguiendo los meridianos) de forma que la cobertura puede abarcar amplias zonas geográficas, en algunos casos todo el planeta. El conjunto de satélites forma pues una malla ‘colgada del cielo’ de tal forma que siempre haya uno a la vista; los satélites se reparten la superficie del globo creando una estructura de celdas similar a la de una red GSM, con la salvedad de que en este caso las estaciones base se mueven. La tabla 2.16 recoge las principales características de los servicios LEO más conocidos. El primer proyecto LEO que se puso en marcha fue Iridium, iniciado por Motorola en el año 1990. Los servicios de voz de Iridium empezaron a funcionar en 1999.

Satélite	Frecuencia Subida (GHz)	Frecuencia Bajada (GHz)	Número de Satélites	Altura Órbita (Km)	Caudal max. (datos)	Puesta en marcha	Conmutación
Globalstar	1,61-1,626	2,483-2,5	6x8=48	1414	9,6 Kb/s	2000	Tierra
Iridium	1,616-1,625	1,616-1,625	11x6=66	750	4,8 Kb/s	1999	Satélite
Teledesic	28,6-29,1	18,8-19,3	24x12=288	1375	64 Mb/s desc. 2 Mb/s asc.	2004	Satélite

Tabla 2.16.- Características principales de los servicios LEO más conocidos

La baja altura de los satélites LEO tiene dos consecuencias importantes que los diferencian de los satélites geoestacionarios. En primer lugar el retardo en la propagación de la señal es mucho menor, similar a las comunicaciones por superficie, por lo que tienen una total compatibilidad en software y protocolos con los medios terrestres. En segundo lugar, al tener que cubrir distancias menores es posible utilizar emisores de baja potencia que pueden integrarse en equipos móviles de peso reducido alimentados por baterías y no es necesario recurrir al uso de antenas parabólicas altamente direccionales. Los servicios Iridium y Globalstar por ejemplo utilizan un teléfono un poco mas grande que un GSM. Ambos están orientados primordialmente para la voz. En cambio Teledesic está diseñado para datos y no contempla movilidad mientras se transmiten datos (aunque es posible cambiar de ubicación con facilidad).

En algunos sistemas, como Globalstar, el satélite devuelve inmediatamente la señal a la tierra, donde es transportada hasta la célula de destino; una vez allí es enviada al satélite correspondiente que a su vez la transmite al destinatario. En otros sistemas, como Iridium o Teledesic, la conmutación se realiza totalmente en el cielo, sin pasar por la tierra en ningún punto intermedio del trayecto.

Teledesic es un ambicioso proyecto que pretende competir con tecnologías de banda ancha residencial, tales como redes de televisión por cable o ADSL. El protocolo de red utilizado por los satélites Teledesic para comunicarse entre ellos es no orientado a conexión y se asemeja en muchos aspectos a IP; algunos se refieren a Teledesic como una Internet 'colgada del cielo'. En Teledesic los satélites dividen la superficie de la tierra en células cuadradas de 53 Km de lado (un satélite abarca múltiples células); cada célula tiene una capacidad total de 64 Mb/s, capacidad que es asignada bajo demanda a los usuarios de la misma.

2.10 EJERCICIOS

1. Indique si es verdadera o falsa cada una de las siguientes afirmaciones:
 - a) Según la ley de Shannon-Hartley cuando se envía información digital por un canal analógico la capacidad máxima de transmisión de información es directamente proporcional al ancho de banda para una relación señal/ruido constante.
 - b) Cuando se transmiten datos de forma analógica la eficiencia máxima teórica (bits/Hz) solo depende de la relación señal/ruido y no del ancho de banda utilizado.
 - c) La atenuación en cables de cobre (medida en dB/m o dB/Km) depende únicamente del tipo de cable y no de la frecuencia o intensidad de la señal transmitida.
 - d) Una de las razones que llevaron a la elaboración de los estándares SDH (Synchronous Digital Hierarchy) fue unificar la diversidad de sistemas que había en el mundo para la PDH (Plesiochronous Digital Hierarchy).
 - e) Cuando se habla de RDSI de banda ancha normalmente se está haciendo referencia a redes basadas en tecnología ATM.
2. A continuación se enumeran una serie de medios físicos de transmisión de datos. Ordénelos de más fiable a menos fiable (entendiendo por más fiable el que produce menos errores de transmisión):
 - a) Cable coaxial de 50 ohmios (LANs)
 - b) Fibra óptica (LAN y WAN)
 - c) Enlaces móviles (por ejemplo GSM)
 - d) Microondas (WAN)
3. Una empresa desea efectuar una instalación de cableado estructurado en diversas oficinas para la transmisión de datos, y se le proponen dos alternativas:
 - a) Utilizar cable de 100 MHz (categoría 5 'enhanced'); este cable permitirá transmitir a 1 Gb/s en breve (cuando se apruebe el nuevo estándar de Gigabit Ethernet).
 - b) Utilizar cable de 200 MHz (conforme con los borradores de la categoría 6), que en principio permitiría llegar a unos 2 Gb/s. Esto supone un aumento de un 7% en el costo de instalación respecto a la alternativa a).

Se calcula que las necesidades actuales de los usuarios se satisfacen con un caudal máximo de 1,5 Mb/s (que corresponde a un flujo MPEG-1). A falta de un estudio detallado sobre la evolución que tendrán dichas necesidades se estima que estas seguirán un crecimiento exponencial similar al establecido por la regla de Moore, es decir se duplicarán cada 18 meses.

Se calcula que la vida media del cableado es de 14 años, es decir que en este plazo de tiempo las modificaciones efectuadas a los edificios habrán sido tantas que prácticamente se tendrán que cablear de nuevo.

Diga cual de los dos cables se debe utilizar.

4. ¿Cuál es la máxima velocidad (en bps) a la que podrían transmitirse datos en un canal sin ruido con un ancho de banda de 6 KHz?
5. Suponga que en una conexión ADSL se utilizan los bins 35 a 255 para el tráfico descendente. En el proceso de inicialización de los módems ADSL éstos miden la calidad (la relación señal/ruido) de cada uno de los bins, y eligen la técnica de modulación más eficiente en cada caso. Suponga que en el proceso de inicialización el resultado ha sido el siguiente:
 - 117 bins con S/R de 20 dB
 - 88 bins con S/R de 15 dB
 - 16 bins desactivados por exceso de ruido

Calcule la capacidad máxima teórica de la comunicación en este caso.

6. Se quiere establecer un enlace entre un conmutador ATM y un ordenador usando fibra óptica multimodo y emisores LED de segunda ventana (1310 nm); el emisor tiene una potencia de -15 dBm y el receptor una sensibilidad de -28 dBm. La fibra ha de tener necesariamente 3 empalmes y 6 pares de conectores.

Calcule la distancia máxima que puede haber entre los equipos a 155 y a 622 Mb/s, sabiendo que:

- La atenuación de la fibra multimodo en segunda ventana es de 1,5 dB/Km
- Cada empalme introduce una atenuación de 0,2 dB
- Cada pareja de conectores introduce una atenuación de 0,5 dB
- El efecto de ensanchamiento de los pulsos debido a la dispersión limita la capacidad de la fibra multimodo a un máximo de 500 Mb/s*Km (es decir 500 Mb/s para una distancia de un kilómetro, 250 Mb/s para dos kilómetros, etc.).

Contemple un margen de seguridad de 1,5 dB, para compensar fluctuaciones de temperatura o envejecimiento de la fibra.

7. La fibra trasatlántica FLAG (Fiberoptic Link Around the Globe) conecta Londres con Tokio mediante un enlace SDH STM-32, con un recorrido de 28.000 Km. El proyecto tuvo un costo de 210.000.000.000 pesetas. Calcule:
 - a) El número máximo de conversaciones simultáneas PCM que pueden mantenerse en dicha fibra, suponiendo que las conversaciones se transportan por TDM en tramas E1 que a su vez se transportan en tramas E2, estas en E3, estas en E4 y estas en STM-1 (A los efectos de este ejercicio suponga por un momento que Japón, para mejorar sus relaciones con Europa, ha decidido adoptar la normativa ITU-T sobre velocidades PDH).
 - b) El retardo que tendrá la comunicación Londres-Tokio a través de esta fibra, suponiendo que el retardo introducido por los multiplexores y repetidores SDH es despreciable.
 - c) El costo mensual de un circuito STM-1 suponiendo:
 - que no hay costos de mantenimiento,
 - que se quiere amortizar la inversión en 20 años,
 - que se tiene asegurada la contratación continuada de toda la capacidad existente
 - que se establece una tarifa directamente proporcional a la capacidad

- d) La cantidad de bits y de tramas STM-32 contenidos en la fibra en un momento cualquiera.
8. La firma alemana Sennheiser sacó al mercado en 1993 unos auriculares estereofónicos inalámbricos (modelo IS850) en los que la señal se transmite de forma digital hasta los propios auriculares, realizándose en estos la conversión analógica. La información sonora se transmite por luz infrarroja utilizando exactamente el mismo formato del sistema de grabación digital de discos compactos (es posible incluso conectar al emisor infrarrojo directamente la salida digital de un reproductor de discos compactos).

Se le pide que:

- a) Calcule con que velocidad (en bits por segundo) transmite los datos el emisor infrarrojo, suponiendo que no se añade ninguna información adicional por el protocolo de comunicación o para detección o control de errores (se supone que el medio de transmisión es altamente fiable).
- b) Calcule cual es la relación señal/ruido máxima que teóricamente podría obtenerse con un sistema de estas características.
- c) Obtenga de la Internet la relación señal/ruido real de estos auriculares (suministre el dato y el URL del que lo ha obtenido).

2.11 SOLUCIONES

S1.-

- a) **Verdadera.** Si la relación señal/ruido es constante la eficiencia (medida en bits/Hz) es también constante, con lo que la capacidad es directamente proporcional al ancho de banda.
- b) **Verdadera.** Evidentemente al ser la eficiencia una magnitud que viene dividida por el ancho de banda (bits/Hz) es independiente de éste.
- c) **Falsa.** La atenuación depende del tipo de cable y de la frecuencia de la señal (pero no de su intensidad). A mayor frecuencia mayor atenuación.
- d) **Verdadera.** Con PDH había tres jerarquías diferentes en uso, una en Europa, otra en Norteamérica y otra en Japón.
- e) **Verdadera.**

S2.-

El orden correcto es:

- 1: Fibra óptica
- 2: Cable coaxial
- 3: Microondas
- 4: Enlaces Móviles

S3.-

La ley de Moore es un ejemplo de crecimiento exponencial, y la podemos expresar para el problema del enunciado de la siguiente manera:

$$C_{\text{final}} = C_{\text{inicial}} * 2^{(p/18)}$$

Donde:

C_{inicial} : Caudal necesario al inicio del período

C_{final} : Caudal necesario al final del período

p: período en estudio (en meses)

Sustituyendo los valores del enunciado:

$$C_{\text{final}} = 1.5 * 2^{(14*12/18)} = 1,5 * 2^{(168/18)} = 1,5 * 645 = \mathbf{968 \text{ Mb/s}}$$

Por consiguiente la primera opción (el cable categoría 5 enhanced) es suficiente para cubrir la necesidad prevista y es la que debería tomarse.

Podemos también calcular el momento exacto en que se superará la capacidad del cable instalado. Para esto despejamos la variable p de la expresión anterior:

$$p = 18 * \log(C_{\text{final}} / C_{\text{inicial}}) / \log(2) = 18 * 2,8239 / 0,30103 = 168.85 \text{ meses}$$

Por tanto la necesidad de transmitir a 1 Gb/s se presentaría a los 14 años y 26 días.

S4.-

La velocidad de transmisión de un canal sin ruido es ilimitada, ya que si aplicamos la ley de Shannon obtendremos una eficiencia teórica infinita. Si la pregunta hubiera sido cual es la máxima capacidad en baudios la respuesta habría sido 12 Kbaudios, aplicando el teorema de Nyquist.

S5.-

La anchura de un bin es 4,3125 KHz. Para calcular la eficiencia de cada bin utilizaremos la aproximación de la ley de Shannon expresada por la fórmula:

$$\text{Eficiencia (en bps/Hz)} = S/R \text{ (en dB)} / 3$$

$$\begin{array}{l} S/R \text{ 20 dB} \rightarrow \text{Eficiencia 6,7 bits/Hz} \rightarrow 6,7 * 4,3125 \rightarrow 28,89 \text{ Kb/s} \\ S/R \text{ 15 dB} \rightarrow \text{Eficiencia 5 bits/Hz} \rightarrow 5 * 4,3125 \rightarrow 21,56 \text{ Kb/s} \end{array}$$

$$28,89 * 117 = 3,380 \text{ Mb/s}$$

$$21,56 * 88 = 1,897 \text{ Mb/s}$$

La capacidad total es de **5,277 Mb/s**

S6.-

Para los cálculos de atenuación se utiliza la unidad de potencia dBm, definida como:

$$P_{\text{dBm}} = 10 \log (P_{\text{mW}})$$

Por ejemplo:

P (mW)	P(dBm)
0.01	-20
0.1	-10
1	0
10	10
100	20
1000	30

En nuestro caso:

Potencia emisor:	$P_{\text{em}} = -15 \text{ dBm} (30 \mu\text{W})$
Sensibilidad receptor:	$P_{\text{rec}} = -28 \text{ dBm} (1,6 \mu\text{W})$
Tolerancia:	$\text{tol} = 1,5 \text{ dB}$
Empalmes:	$\text{emp} = 3$
Conectores (parejas):	$\text{con} = 6$
Longitud fibra (Km):	long

$$\text{Atenuación máxima permitida: } At_p = P_{\text{em}} - P_{\text{rec}} - \text{tol}$$

$$\text{Atenuación del trayecto: } At_t = 1,5 * \text{long} + 0,2 * \text{emp} + 0,5 * \text{con}$$

Para que la transmisión sea posible $At_t \leq At_p$

En el caso límite (distancia máxima): $At_t = At_p$:

$$1,5 * \text{long} + 0,2 * \text{emp} + 0,5 * \text{con} = P_{\text{em}} - P_{\text{rec}} - \text{tol}$$

$$\text{long} = (P_{em} - P_{rec} - \text{tol} - 0,2 * \text{emp} - 0,5 * \text{con}) / 1,5$$

$$\text{long} = (-15 - (-28) - 1,5 - 0,2*3 - 0,5*6) / 1,5$$

$$\text{Longitud} = \mathbf{5,27 \text{ Km}}$$

Cálculo de la dispersión:

$$\text{Dispersión} = \text{velocidad (Mb/s)} * \text{longitud (Km)}$$

$$\text{Dispersión máxima} = 500 \text{ Mb/s} * \text{Km}$$

La longitud máxima vendrá dada pues por:

$$\text{Longitud (Km)} = 500 / \text{velocidad (Mb/s)}$$

A 155,52 Mb/s:

$$\text{Longitud} = 500/155,52 = \mathbf{3,2 \text{ Km}}$$

A 622,08 Mb/s:

$$\text{Longitud} = 500/622,08 = \mathbf{0,804 \text{ Km}}$$

Así pues, en ambos casos la limitación vendrá impuesta por la dispersión y no por la atenuación.

S7.-

Datos:

Velocidad: 4976,64 Mb/s (STM-32)

Distancia: 28000 Km

Costo: $2,1 \times 10^{11}$ pesetas

a) Número de conversaciones PCM:

$$1 \text{ STM-32} = 32 \text{ STM-1}$$

$$1 \text{ STM-1} = 1 \text{ E4}$$

$$1 \text{ E4} = 4 \text{ E3}$$

$$1 \text{ E3} = 4 \text{ E2}$$

$$1 \text{ E2} = 4 \text{ E1}$$

$$1 \text{ E1} = 30 \text{ canales PCM}$$

$$\text{Canales PCM: } 32 * 1 * 4 * 4 * 4 * 30 = \mathbf{61440 \text{ conversaciones}}$$

$$\text{Ancho de banda útil: } 61440 * 0,064 = 3932,16 \text{ Mb/s}$$

$$\text{Eficiencia: } 3932,16/4976,64 = 0,79 \quad 79\%$$

b) Retardo en la transmisión:

La velocidad de la luz en las fibras ópticas es de aproximadamente 200.000 Km/s, por tanto:

$$\text{Retardo} = 28000 \text{ (Km)} / 200000 \text{ (Km/s)} = \mathbf{140 \text{ ms}}$$

c) Costo mensual:

$$2,1 \times 10^{11} / (20 \text{ años} * 12 \text{ meses/año} * 32 \text{ STM-1}) = \mathbf{27.343.750 \text{ pts/mes}}$$

d) Cantidad de bits y tramas en la fibra:

Para calcular el número de bits simplemente multiplicamos la velocidad por el retardo calculado en el punto b):

$$\text{Bits: } 4976,64 \times 10^6 \text{ bps} \times 0,14 \text{ s} = \mathbf{696,73 \times 10^6 \text{ bits}}$$

Para calcular el número de tramas dividimos el retardo por el tiempo que tarda en emitirse una trama:

$$\text{Tramas: } 140 \text{ ms} / 0,125 \text{ (ms/trama)} = \mathbf{1120 \text{ tramas}}$$

S8.-

a) Cálculo del ancho de banda:

Frecuencia de muestreo de CD: 44,100 KHz

Tamaño de cada muestra: 16 bits

Velocidad de transferencia: $44,100 \times 16 = 705,6 \text{ Kb/s}$

Al ser estéreo será: $705,6 \times 2 = \mathbf{1411,2 \text{ Kb/s}}$

b) Cálculo de la relación señal/ruido:

Al tratarse de una señal digital la relación señal/ruido (S/N) es igual a la relación entre la potencia máxima y la mínima que podemos codificar. La magnitud codificada es la amplitud. La potencia es proporcional al cuadrado de la amplitud.

Máxima amplitud codificable con n bits: $2^n - 1$: $2^{16} - 1 = 65535$

Máxima Potencia: $65535^2 = 4,295 \times 10^9$

Mínima amplitud codificable: 1 Mínima Potencia: 1

La relación señal/ruido será: $10 \times \log_{10} (4,295 \times 10^9) = \mathbf{96,3 \text{ dB}}$

Podría resolverse también aplicando la ley de Shannon:

$$C = H \cdot \log_2 (1 + S/N)$$

(C = Velocidad de transferencia, H = Ancho de banda)

$$S/N = 2^{C/H} - 1$$

Con C = 705,6 Kb/s y H = 22,05 KHz

$$S/N = 2^{(705,6/22,05)} - 1 = 2^{32} - 1 = 4,295 \times 10^9 = \mathbf{96,3 \text{ dB}}$$

c) El valor de la relación señal/ruido real es de 92 dB

ver <http://www.sennheiser.com> o <http://www.sennheiser.de>