

1 FUNDAMENTOS

Autor: Rogelio Montañana

1	FUNDAMENTOS	1-1
1.1	INTRODUCCIÓN	1-2
1.1.1	Que es (y que no es) objetivo del curso	1-2
1.1.2	Telecomunicaciones y Telemática	1-3
1.1.3	Redes de ordenadores y sistemas distribuidos	1-3
1.1	USOS DE LAS REDES DE ORDENADORES	1-4
1.1.1	Uso de las redes en empresas	1-4
1.1.2	Uso de las redes por particulares	1-5
1.1.3	Aspectos sociales	1-6
1.2	TIPOS DE REDES	1-6
1.2.1	Redes broadcast	1-7
1.2.2	Redes punto a punto	1-7
1.2.3	Redes de área local (LAN)	1-9
1.2.4	Redes de área metropolitana (MAN)	1-9
1.2.5	Redes de área extensa (WAN)	1-10
1.2.6	Redes inalámbricas y movilidad	1-11
1.2.7	Internetworking	1-11
1.3	ARQUITECTURA DE REDES	1-12
1.3.1	Diseño de arquitecturas de redes.	1-13
1.3.2	Interfaces y servicios	1-14
1.3.3	Servicios orientados y no orientados a conexión	1-15
1.3.4	Primitivas de servicio	1-16
1.4	MODELOS DE REFERENCIA	1-17
1.4.1	El modelo de referencia OSI	1-17
1.4.1.1	La Capa Física	1-18
1.4.1.2	La capa de enlace (data link)	1-18
1.4.1.3	La capa de red	1-19
1.4.1.4	La capa de transporte	1-19
1.4.1.5	La capa de sesión	1-20
1.4.1.6	La capa de presentación	1-20
1.4.1.7	La capa de aplicación	1-20
1.4.1.8	Transmisión de datos en el modelo OSI	1-20
1.4.2	El modelo de referencia TCP/IP	1-21
1.4.2.1	La capa host-red	1-22
1.4.2.2	La capa internet	1-22
1.4.2.3	La capa de transporte	1-22
1.4.2.4	La capa de aplicación	1-22
1.4.3	Comparación de los modelos OSI y TCP/IP	1-23
1.5	TRANSMISIÓN DE DATOS EN REDES WAN	1-25
1.5.1	Líneas dedicadas	1-25
1.5.2	Conmutación de circuitos	1-26
1.5.3	Conmutación de paquetes	1-27
1.5.3.1	X.25	1-28
1.5.3.2	Frame Relay	1-30
1.5.3.3	ATM y B-ISDN	1-31
1.6	ESTÁNDARES	1-33
1.6.1	La ISO	1-34
1.6.2	La ITU-T	1-35
1.6.3	Foros industriales	1-36
1.6.4	Otras organizaciones	1-37
1.7	EJERCICIOS	1-38
1.8	SOLUCIONES	1-40

1.1 INTRODUCCIÓN

En tan solo unos años las redes de ordenadores han pasado de ser algo esotérico solo conocido y utilizado por unos pocos a ocupar un primer plano en cualquier medio informativo de carácter general. Quizá el protagonismo que actualmente se da a términos como 'Internet', 'autopistas de la información' o 'aldea global' sea más fruto de las modas que de una necesidad real, pero no cabe duda que dichos términos (o al menos las ideas que representan) tendrán un interés creciente en los años venideros y permanecerán con nosotros durante bastante tiempo.

Podemos hacer un cierto paralelismo entre la explosión de la Telemática en la década de los noventa y el auge de la Informática personal en los ochenta; sin embargo a pesar de su importancia la aparición del PC no parece comparable a la revolución que está protagonizando la Telemática; la razón estriba en que, a pesar de todo, el PC aislado es hasta cierto punto un producto minoritario, mientras que el sistema multimedia de los noventa conectado a las redes se convertirá en una fuente de información y *entretenimiento* de interés para el público en general. Existen ya en el mercado algunos modelos de lo que se conoce como 'set-top boxes' desarrollados por empresas como Philips, Sony o Nokia, que son aparatos que se conectan a la red de datos y al televisor doméstico. En estos equipos resulta esencial la facilidad de manejo.

Los precios de la informática vienen sufriendo desde hace bastantes años una disminución exponencial. El precio del espacio en disco (pesetas/MB) se reduce a la mitad aproximadamente cada 4.5 años, el de la potencia de procesador (pesetas/MIP) cada 2.3 años, y el de la memoria RAM (pesetas/MB) cada 1.8 años. Como comparación el precio de la transmisión de datos (medido en pesetas/Mb/s/Km) se reduce a la mitad cada 1.5 años aproximadamente, es decir, esta teniendo una disminución aun mayor que las tecnologías informáticas. Las investigaciones y desarrollos en materia de transmisión de datos hacen prever que dicha tendencia se mantendrá en el futuro.

Además de los factores tecnológicos en los precios de los servicios telemáticos influyen aspectos legales que en ocasiones alteran la situación de manera importante. Por ejemplo en España, como en otros países de Europa, la decisión de liberalizar las telecomunicaciones en 1998 está produciendo un abaratamiento de los precios gracias a la libre competencia, que de forma transitoria hará aun mayor la reducción que cabría esperar de los factores puramente tecnológicos.

1.1.1 Que es (y que no es) objetivo del curso

El curso pretende dar una formación básica en los aspectos técnicos de la comunicación de ordenadores a alumnos de segundo ciclo (cuarto curso) de Ingeniería Informática, tomando en cuenta su formación durante el primer ciclo, en especial los conocimientos adquiridos en la asignatura Elementos y Sistemas de Transmisión de Datos, que podemos considerar como previa a la presente asignatura.

El alumno deberá ser capaz al finalizar el curso de diseñar adecuadamente una red informática para una empresa, atendiendo a criterios de coste, prestaciones y necesidades. También debería poder comprender la descripción técnica o documentación de un producto de comunicaciones, así como artículos de la literatura especializada.

En toda área de conocimiento técnica existe una profusión de siglas para referirse a términos, conceptos o incluso a frases concretas. La telemática es especialmente rica en este sentido, y el conocimiento del significado de tales abreviaturas es necesario para la comprensión de la literatura técnica. Siempre que un término o concepto disponga de una abreviatura habitual lo indicaremos junto con su significado (casi siempre en inglés) la primera vez que aparezca. El conocimiento del significado de las siglas es como su 'etimología', y forma parte de la 'cultura general' que todo ingeniero informático debería tener.

Actualmente existen, sobre todo en entornos universitarios, multitud de 'gurus' de la Internet que son capaces de encontrar casi cualquier cosa en la red, conocen todos los servicios existentes y están al tanto de la última aplicación o programa aparecido. Conviene destacar que no es el objeto de este curso crear tales gurus, por tres razones:

- Dicha información no sería susceptible de incluirse en una asignatura del currículo académico ya que para cuando el estudiante iniciara su andadura profesional sería ya obsoleta,
- No es este el tipo de formación que se espera de un Ingeniero Informático, y
- El profesor no está capacitado para ello.

En cierto modo podríamos decir, siguiendo la típica analogía de las ‘autopistas de la información’, que dichos ‘gurus’ de la Internet son muy buenos conductores, pero lo que aquí pretendemos no es obtener el carné de conducir sino aprender a diseñar carreteras y vehículos para que el tráfico sea lo más fluido (y *seguro*) posible. Que duda cabe que nunca le vendrá mal a un ingeniero saber conducir bien, y en este sentido estimulamos al alumno a realizar tantas ‘prácticas de conducción’ como le sea posible tanto durante sus estudios como después en su futura actividad profesional.

Tampoco es objeto de este curso introducir al alumno en los aspectos legales, comerciales o políticos del mundo de las telecomunicaciones, que son motivo de noticia casi diaria en los medios de comunicación, tanto a nivel nacional como europeo.

1.1.2 Telecomunicaciones y Telemática

Empezaremos por diferenciar estos dos términos fundamentales.

Entendemos por *telecomunicaciones* el conjunto de medios técnicos que permiten la comunicación a distancia. Normalmente se trata de transmitir información sonora (voz, música) o visual (imágenes estáticas o en movimiento) por ondas electromagnéticas a través de diversos medios (aire, vacío, cable de cobre, fibra óptica, etc.). La información se puede transmitir de forma analógica, digital o mixta, pero en cualquier caso las conversiones, si las hay, siempre se realizan de forma transparente al usuario, el cual maneja la información de forma analógica exclusivamente.

El término *telemática* (fusión de *telecomunicaciones* e *informática*) trata del uso de las telecomunicaciones para enriquecer las posibilidades de la informática (y no al revés), es decir, del uso de medios de comunicación a distancia para conexiones informáticas (ordenador-ordenador u ordenador-periférico). La información puede transmitirse de forma analógica, digital o mixta, pero esto es transparente al usuario, que la maneja de forma digital únicamente.

Todos los sistemas habituales de telecomunicaciones transmiten la información por medio de ondas electromagnéticas a través de diversos medios: aire, vacío, cable de cobre, fibra óptica, etc.

1.1.3 Redes de ordenadores y sistemas distribuidos

La expresión *redes de ordenadores* (o simplemente *redes*) se utiliza cuando, por medio de la telemática, se realiza la comunicación entre dos o más ordenadores. Queda excluida aquí la comunicación entre un ordenador y un periférico (terminal, impresora, etc.) independientemente de la distancia a la que dicha comunicación se produzca o el tipo de medios utilizados para ella. Dicho de otro modo, en redes de ordenadores se considera únicamente la comunicación entre elementos que pueden hablar de igual a igual (‘peer to peer’ en inglés), sin tomar en consideración la comunicación asimétrica maestro-esclavo.

Un caso particular de las redes de ordenadores son los *sistemas distribuidos*, en los que se intenta conectar varios ordenadores mediante una red y crear un entorno de utilización tal que el usuario no perciba la existencia de múltiples sistemas, sino que los maneje como un único sistema virtual de forma transparente; para esto se utilizan normalmente protocolos o aplicaciones específicos. Evidentemente si el medio de comunicación es de baja velocidad el usuario percibirá un retraso cuando acceda a un nodo remoto, por lo que generalmente los sistemas distribuidos sólo se implementan en redes de alta velocidad (redes locales por ejemplo). Un ejemplo de protocolo de sistemas distribuidos podría ser el NFS (Network File System) que permite acceso a ficheros remotos de forma transparente.

1.1 USOS DE LAS REDES DE ORDENADORES

Podemos diferenciar claramente dos tipos de usos o usuarios de las redes de ordenadores: el profesional, que se da normalmente en la empresa, y el particular, que generalmente tiene lugar en la residencia habitual del usuario.

1.1.1 Uso de las redes en empresas

Prácticamente cualquier empresa que tenga varios ordenadores hoy en día tiene una red local que los interconecta. Si la empresa dispone de varias sedes u oficinas dispersas dispondrá típicamente de una red local (LAN, Local Area Network) en cada una de ellas y de un medio de interconexión de dichas redes locales a través de enlaces telefónicos (también llamados accesos WAN, Wide Area Network). La red o redes permiten acceder a información importante y actualizada de manera rápida, por ejemplo una base de datos que contenga toda la información comercial de la compañía (productos, stocks, precios, plazos de entrega, etc.). A menudo estas bases de datos están en uno o unos pocos ordenadores de la red, ya que la existencia de múltiples copias complica las actualizaciones.

Antiguamente las aplicaciones se diseñaban para que los usuarios accedieran desde terminales ‘tontos’ al ordenador central en el que se mantenía la base de datos y en el cual se procesaba la transacción en su totalidad, pero la aparición de redes de ordenadores donde el terminal se ha convertido en un PC ha llevado a un nuevo modelo de desarrollo de las aplicaciones llamado *cliente-servidor*, consistente en descargar en el PC (cliente) una parte del proceso de la transacción (por ejemplo toda la labor de validación de los datos introducidos), y dejar para el ordenador central (servidor) únicamente la parte que no es posible hacer en el cliente, como por ejemplo la inclusión del nuevo registro en la base de datos. El modelo cliente-servidor reduce así de forma considerable los recursos necesarios en el ordenador central, y permite aprovechar el PC que el usuario tiene en su mesa (y que muy probablemente tendría de todas formas). Además así la aplicación se integra de forma más amigable en el ordenador del usuario final (mediante el uso de ventanas, interfaces gráficas, ratón, etc.). Así el uso del modelo cliente-servidor, y por tanto de las redes de ordenadores puede llegar a suponer en la práctica un *ahorro* en los gastos informáticos de la empresa, además de una mayor *productividad* de sus empleados.

Por otro lado, la existencia de redes de ordenadores permite a la empresa tener duplicado su servidor de base de datos, o cualquier otra información vital, de forma que en caso de fallo del software, hardware, o destrucción física del servidor la información no se vea afectada al poder los clientes seguir funcionando con el servidor de reserva. Esto se traduce en una mayor *fiabilidad* del sistema, aspecto imprescindible en algunas empresas (por ejemplo bancos, hospitales, cadenas de montaje de fábricas, etc.). Por supuesto para que el sistema en su conjunto sea altamente fiable es preciso duplicar no solo el servidor de base de datos, sino la propia red (elementos de conmutación, conexión, cables, etc.) de forma que no haya ningún elemento importante susceptible de fallo cuya funcionalidad no este duplicada.

La red en las empresas permite *compartir* recursos, tales como periféricos de elevado costo (impresoras láser, scanners, plotters, filmadoras, etc.), o programas (siempre y cuando la licencia que se posee permita su uso en red) con el consiguiente ahorro de espacio en disco y sencillez de actualización.

Otra utilidad importante de la red en las empresas es como *medio de comunicación* entre sus empleados; el correo electrónico es el servicio básico, pero otros mas avanzados se están implantando, tales como la videoconferencia o las aplicaciones que permiten compartir un documento entre varios usuarios trabajando desde ordenadores distintos. Este tipo de aplicaciones se conoce como CSCW (Computer Supported Cooperative Work) y también como ‘groupware’.

Hasta aquí hemos discutido aplicaciones orientadas fundamentalmente al uso de la red dentro de la propia empresa (lo que actualmente se suele denominar la ‘Intranet’). Dicha red puede conectarse al exterior, bien directamente o a través de un cortafuego o ‘firewall’, es decir, una pasarela intermedia que permita controlar el acceso (entrante y/o saliente) para evitar problemas de seguridad. Cuando la red de la empresa se conecta al exterior (normalmente a la Internet) aparecen una serie de nuevas aplicaciones que le dan aun mayor utilidad, entre las que cabe destacar las siguientes:

Las actividades de *marketing*; por ejemplo se puede poner el catálogo de productos de la empresa en la red para su consulta por los clientes, con información detallada de características, precio, referencias, etc.; también es posible tramitar pedidos recibidos a través de la red.

Actividades de *sophorte en línea*; se puede responder a preguntas de los usuarios a través de la red, tanto por correo electrónico como por listas de distribución o grupos de news. En el caso de empresas de software es frecuente ofrecer a través de la red nuevas versiones de programas, sistemas operativos, parches para la resolución de problemas, etc.

Las herramientas de *comunicación* antes mencionadas (correo electrónico, videoconferencia, CSCW, etc.) adquieren una relevancia mucho mayor cuando su uso no se limita al interior de la empresa.

Algunas empresas encuentran en Internet una manera económica de interconectar sus oficinas remotas, evitando así la contratación de líneas propias de larga distancia.

El empleado puede acceder a una enorme cantidad de *información externa* a su empresa útil para su trabajo, por ejemplo información de suministradores, competidores, clientes, foros de discusión sobre temas relacionados con su trabajo (especialmente cuando éste es de carácter técnico), etc. Curiosamente esta ventaja conlleva un problema, que es la imposibilidad de evitar que el empleado utilice la conexión al exterior para acceder a información no relacionada con su trabajo (por ejemplo sobre su hobby favorito), perdiendo en ello a veces una parte importante de su jornada laboral. Es prácticamente imposible impedir por medios técnicos que esto suceda, aunque se pueden adoptar algunas medidas protectoras. Este problema ha hecho a algunas empresas cuestionarse la conveniencia de dar acceso Internet a sus empleados.

1.1.2 Uso de las redes por particulares

El uso de las redes de ordenadores por particulares tiene tres objetivos fundamentales:

- Acceso a información
- Comunicación
- Entretenimiento

El acceso a información actualmente se centra en el acceso a Internet y sobre todo a servidores Web. En torno a esto han aparecido multitud de servicios derivados del uso de la telemática para diversos fines, tales como teletrabajo, telecompra, teleenseñanza, telemedicina, etc.

La comunicación tiene lugar tanto a nivel individual (correo electrónico) como en grupos (listas de distribución, grupos de news, etc.). Esto incluye no solo información textual, sino también multimedia: sonido, imagen y vídeo. Además de estas aplicaciones asíncronas, en las que los participantes no han de coincidir en el tiempo, existen otras (llamadas isócronas) en las que si han de coincidir, como las que permiten utilizar el ordenador como un teléfono, para hablar con un usuario remoto a través de la Internet; esto supone un ahorro importante en algunos casos ya que se puede hacer una llamada a un lugar remoto pagando tarifa local (lo cual ha motivado serias críticas y discusiones con las compañías telefónicas, especialmente en Estados Unidos). También está el servicio de videoconferencia, aunque poco extendido a nivel particular debido a su escasa difusión y a sus requerimientos de capacidad, difíciles de satisfacer con un módem telefónico.

El uso con fines de entretenimiento será la gran aplicación de las redes de ordenadores en el futuro, pero actualmente el reto tecnológico es tan grande que para abordarlo es preciso disponer de potentes y costosos equipos, con lo que la rentabilidad es cuando menos dudosa. Se han hecho ya algunas experiencias de *vídeo bajo demanda* en Estados Unidos, pero las necesidades de red y de servidores para un número elevado de usuarios son tan grandes que los servicios comerciales que actualmente se ofrecen se basan generalmente en el *vídeo casi bajo demanda* (NVOD, Near Video On Demand) donde cada transmisión es vista por un conjunto de usuarios simultáneamente.

1.1.3 Aspectos sociales

La Internet es noticia casi diaria en los medios de comunicación, y no siempre en sentido positivo. Algunos ejemplos de temas polémicos son los siguientes:

- Distribución de pornografía. En muchos países es ilegal distribuir pornografía a menores, por lo que la disponibilidad de estos materiales en la red limita a veces el acceso a la Internet en colegios. También es polémica la distribución de pornografía infantil a adultos, que algunos consideran inaceptable.
- Distribución de información ‘peligrosa’: por ejemplo se han dado casos de personas que han aprendido a sintetizar drogas a partir de información obtenida en la Internet; análogamente sería posible distribuir información detallada sobre como fabricar explosivos, o incluso una bomba atómica.
- Distribución de publicidad no deseada. Es tremendamente fácil recopilar una enorme lista de direcciones de correo electrónico para distribuir a muy bajo costo cualquier propaganda de tipo comercial, político, religioso, etc. a nivel mundial. Alguna gente recomienda en estos casos utilizar la técnica del ‘ladrillo a portes pagados’, es decir, devolver al remitente un mensaje con unos cuantos Megabytes de información inútil. Esta acción tomada por un número elevado de usuarios inutiliza el buzón y el servidor desde los que se distribuye la propaganda.
- Discrepancias legales. Es posible que una información distribuida por la red desde un país sea ilegal en otro; por ejemplo, ETA ha puesto un servidor Web en Suiza con información que en España se considera apología del terrorismo. También es posible comprar en el extranjero bienes de consumo sin pagar los impuestos correspondientes a nuestro país.
- Acceso a la Internet desde el puesto de trabajo para fines personales. Este tema, que ya hemos comentado, ha llevado a algunas empresas a ‘censurar’ lo que sus empleados pueden consultar por la red.
- Derecho a la privacidad. La única forma de obtener privacidad en la red es encriptando la información; sin embargo, algunos países (Estados Unidos y Francia, por ejemplo) tienen regulaciones muy severas en ese sentido, al punto de prohibir a los ciudadanos encriptar, salvo si el encriptado es lo bastante ‘suave’ como para poder descifrarlo en caso necesario. Dicho de otro modo: el Estado siempre debe poder descifrar un mensaje si lo considera necesario.
- Anónimos: las redes de ordenadores permiten enviar mensajes anónimos. Si bien esto tiene sus ventajas, se plantean problemas legales cuando se utiliza un anónimo por ejemplo para acusar a una persona.

1.2 TIPOS DE REDES

De acuerdo con su tecnología de transmisión las redes se clasifican en:

- Redes broadcast (que significa radiodifusión en inglés)
- Redes punto a punto

Según su escala también se suelen clasificar en:

- Redes de área local (LAN, Local Area Network)
- Redes de área extensa (WAN, Wide Area Network)

En esta última clasificación también se distingue a veces una categoría intermedia, la formada por las redes de área metropolitana (MAN, Metropolitan Area Network).

La combinación de estos dos criterios nos permite crear una matriz con cuatro categorías posibles; en la práctica existen redes en cada una de estas cuatro categorías, si bien la mayoría encajan en dos de ellas:

	LAN	WAN
Broadcast	La mayoría de las LANs (Ethernet, FDDI, Token Ring, etc.), Fibre Channel	Redes de transmisión vía satélite
Punto a punto	HIPPI, Fibre Channel, LANs Conmutadas	La mayoría de las WANs (todas las basadas en enlaces telefónicos, X.25, Frame Relay, RDSI, ATM, etc.)

1.2.1 Redes broadcast

En las redes broadcast el medio de transmisión es compartido por todos los ordenadores interconectados. Normalmente cada mensaje transmitido es para un único destinatario, cuya dirección aparece en el mensaje, pero para saberlo cada máquina de la red ha de recibir o ‘escuchar’ cada mensaje, analizar la dirección de destino y averiguar si va o no dirigido a ella; las normas de buena educación ‘telemática’ establecen que un ordenador debe descartar sin mas análisis todo mensaje que no vaya dirigido a él; sin embargo, algunos programas llamados ‘sniffers’ se dedican a ‘cotillear’ todo lo que pasa por el cable, independientemente de quien sea su destinatario; con un sniffer es muy fácil capturar cualquier cosa, por ejemplo los caracteres que viajan por la red en un proceso de conexión averiguando así de manera rápida el userid y la password de un usuario cualquiera (por ejemplo ‘root’). La única protección efectiva en las redes broadcast es el encriptado de la información.

A veces en una red broadcast lo que se quiere es precisamente enviar un mensaje a todas las máquinas conectadas. Esto se llama un envío *broadcast*. Asimismo es posible enviar un mensaje dirigido a un subconjunto de todas las máquinas de la red (subconjunto que ha de estar definido previamente); esto se conoce como envío *multicast* (y el subconjunto se denomina grupo multicast). En algunos contextos cuando se habla de broadcast o multicast el caso en el que el mensaje va dirigido a una máquina concreta se denomina envío *unicast*.

Como ejemplos de redes broadcast podemos citar casi todas las tecnologías de red local: Ethernet (en sus diversos tipos), Token Ring, FDDI, etc. También son redes broadcast las basadas en transmisión vía satélite. En una red broadcast la capacidad o velocidad de transmisión indica la capacidad agregada de todas las máquinas conectadas a la red; por ejemplo, la red conocida como Ethernet tiene una velocidad de 10 Mb/s, lo cual significa que la cantidad máxima de tráfico agregado de todos los equipos conectados no puede superar este valor.

Conviene mencionar en este punto que en Telemática siempre que se especifican *capacidades de transmisión* de la información, a menudo referidas erróneamente como *velocidades de transmisión* o *anchos de banda*, los prefijos Kilo, Mega, etc., se utilizan con su significado métrico (10^3 , 10^6 , etc.), no con el significado informático (2^{10} , 2^{20} , etc.). Así 1 Kb/s corresponde a 1.000 bits/s, no 1.024 bits/s; análogamente 1 Mb/s significa 1.000.000 bits/s, no 1.048.576 bits/s. Sin embargo cuando no se trata de cantidad de información (sin dividir por el tiempo) el significado sigue siendo el habitual, así por ejemplo si decimos que un determinado protocolo utiliza un tamaño máximo de paquete de 64 Kbytes queremos decir que el paquete puede contener hasta 65535 Bytes; si decimos que hemos transmitido un fichero de 1 MByte, queremos decir que el fichero contiene 1.048.576 Bytes. Normalmente las velocidades o, más correctamente, las capacidades de transmisión se miden en bits/segundo (que abreviaremos como *bps*), mientras que el tamaño de una trama, de un paquete o de un fichero se expresa en Bytes.

1.2.2 Redes punto a punto

Las redes punto a punto se construyen por medio de *conexiones* entre pares de ordenadores, también llamadas *líneas*, *enlaces*, *circuitos* o *canales* (en inglés los términos equivalentes son ‘*lines*’, ‘*links*’,

'circuits', 'channels' o 'trunks'). Una vez un paquete es depositado en la línea el destino es conocido de forma unívoca y no es preciso en principio que lleve la dirección de destino.

Los enlaces que constituyen una red punto a punto pueden ser de tres tipos de acuerdo con el sentido de la transmisión:

- **Simplex:** la transmisión sólo puede efectuarse en un sentido
- **Semi-dúplex o 'half-duplex':** la transmisión puede hacerse en ambos sentidos, pero no simultáneamente
- **Dúplex o 'full-duplex':** la transmisión puede efectuarse en ambos sentidos a la vez.

En los enlaces semi-dúplex y dúplex la velocidad de conexión es generalmente la misma en ambos sentidos, en cuyo caso se dice que el enlace es simétrico; en caso contrario se dice que es asimétrico.

La gran mayoría de los enlaces en líneas punto a punto son dúplex simétricos. Así, cuando se habla de un enlace de 64 Kb/s sin especificar más se quiere decir 64 Kb/s en cada sentido, por lo que la capacidad total del enlace es de 128 Kb/s.

Al unir múltiples máquinas con líneas punto a punto es posible llegar a formar redes de topologías complejas en las que no sea trivial averiguar cuál es la ruta óptima a seguir para ir de un punto a otro, ya que puede haber múltiples caminos posibles con distinto número de ordenadores intermedios, con enlaces de diversas velocidades y distintos grados de ocupación. Como contraste, en una red broadcast el camino a seguir de una máquina a otra es único, no existen ordenadores intermedios y el grado de ocupación es el mismo para todas ellas.

Cada uno de los ordenadores que participa en una red de enlaces punto a punto es un *nodo* de la red. Si el nodo tiene un único enlace se dice que es un *nodo terminal* o '*end node*', de lo contrario se dice que es un *nodo intermedio*, de *encaminamiento* o '*routing node*'. Cada nodo intermedio ha de tomar una serie de decisiones respecto a por donde debe dirigir los paquetes que reciba, por lo que también se les llama *nodos de conmutación de paquetes*, *nodos de conmutación*, *conmutadores* o *encaminadores* (los términos equivalentes en inglés son respectivamente *packet switching nodes*, *switching nodes*, *switches* y *routers*). Dependiendo del tipo de red que se trate nosotros utilizaremos las denominaciones router o conmutador.

Cualquier ordenador (por ejemplo una estación de trabajo UNIX, o incluso un PC con MS/DOS), puede actuar como un router en una red si dispone del programa apropiado; sin embargo, se prefiere normalmente utilizar para este fin ordenadores dedicados, con sistemas operativos en tiempo real y software específico, dejando los ordenadores de propósito general para las aplicaciones del usuario; esto da normalmente mayor rendimiento y fiabilidad. Tradicionalmente al ordenador de propósito general que se conecta a la red como nodo terminal mediante un router se le denomina *host*, palabra inglesa que significa anfitrión (aunque esta denominación no se utiliza nunca en este contexto). El conjunto de líneas de comunicación y routers que interconectan a los hosts forman lo que se conoce como la *subred de comunicaciones*, o simplemente *subred*. Obsérvese que los hosts o nodos terminales no forman parte de la subred. Si hacemos la analogía con la red telefónica diríamos que la subred es el conjunto de cables y centralitas telefónicas, incluido el apilique de la pared donde conectamos el teléfono, pero no formaría parte de la subred nuestro teléfono, que enchufamos al apilique.

Para llegar de un nodo a otro en una red se ha de atravesar uno o varios enlaces; el número de enlaces se denomina en inglés '*hops*', que significa saltos, y depende de la trayectoria seguida y de la topología de la red. Cuando dos nodos no vecinos (es decir a más de un '*hop*' de distancia) desean intercambiar información lo han de hacer a través de uno o varios nodos intermedios. Cuando un paquete se envía de un nodo al siguiente normalmente el paquete es transmitido en su totalidad y almacenado; solo entonces el nodo receptor intenta enviar el paquete al siguiente nodo de la red. Esto es lo que se conoce como una red de *almacenamiento - reenvío* ('*store-and-forward*') o red de *conmutación de paquetes* ('*packet-switched*'). Esta forma de proceder permite una elevada fiabilidad incluso en entornos hostiles donde el número de errores puede ser elevado.

Dado que en una red punto a punto cada enlace puede tener una velocidad distinta, no podemos caracterizar la red con un único dato de forma tan sencilla como en una red broadcast; sería preciso

adjuntar un esquema de la topología indicando el tipo de cada enlace (simplex, semi-dúplex o dúplex) y su velocidad (en cada sentido si fuera asimétrico).

1.2.3 Redes de área local (LAN)

Las redes de área local tienen generalmente las siguientes características:

- Tecnología broadcast: medio compartido
- Cableado específico, instalado normalmente a propósito
- Velocidad de 1 a 1000 Mb/s
- Extensión máxima de unos 3 KM (FDDI llega a 200 Km)

Las LANs más conocidas y extendidas son la Ethernet a 10 Mb/s, la IEEE 802.5 o Token Ring a 4 y 16 Mb/s, y la FDDI a 100 Mb/s. Estos tres tipos de LAN han permanecido prácticamente sin cambios desde finales de los ochenta, por lo que a menudo se les referencia en la literatura como 'LANs tradicionales' ('legacy LANs' en inglés) para distinguirlas de otras mas modernas aparecidas en los 90, tales como la Fast Ethernet (100 Mb/s).

A menudo las LANs requieren un tipo de cableado específico (de cobre o de fibra); esto no suele ser un problema ya que al instalarse en una fábrica, campus o similar, se tiene un control completo sobre el entorno y las condiciones de instalación.

El alcance limitado de las LANs permite saber el tiempo máximo que un paquete tardará en llegar de un extremo a otro de la red, lo cual permite aplicar diseños que de otro modo no serían posibles, y simplifica la gestión de la red.

Como consecuencia del alcance limitado y del control en su cableado, las redes locales suelen tener un retardo muy bajo en las transmisiones (decenas de microsegundos) y una tasa de errores muy baja.

La topología básica de las redes locales suele ser de bus (p. Ej. Ethernet) o de anillo (Token Ring o FDDI). Sin embargo, pueden hacerse topologías mas complejas utilizando elementos adicionales, tales como repetidores, puentes, conmutadores, etc., como veremos más adelante.

En épocas recientes se ha popularizado una técnica para aumentar el rendimiento de las redes locales, que consiste en dividir una LAN en varias mas pequeñas, con lo que el ancho de banda disponible para cada uno es mayor; las diversas LANs así formadas se interconectan en un equipo especial denominado conmutador LAN (o LAN switch); en casos extremos se puede llegar a dedicar una red por equipo, disponiendo así de todo el ancho de banda para él.

En años recientes se ha empezado a utilizar una tecnología de redes telefónicas, y por tanto típicamente de redes WAN, para la construcción de redes locales; esta tecnología, denominada ATM (Asynchronous Transfer Mode), dará mucho que hablar en el futuro.

1.2.4 Redes de área metropolitana (MAN)

En principio se considera que una MAN abarca una distancia de unas pocas decenas de kilómetros, que es lo que normalmente se entiende como área metropolitana. Existe solamente una red característica de las MANs, la conocida como IEEE 802.6 o DQDB (Distributed Queue Dual Bus), que puede funcionar a diversas velocidades entre 34 y 155 Mb/s con una distancia máxima de unos 160 Km. En realidad la distinción de MANs en base a la distancia es un tanto arbitraria, ya que FDDI puede llegar a 200 Km pero raramente se la clasifica como MAN, al no ser un servicio ofrecido por las compañías telefónicas, cosa que sí ocurre con DQDB en algunos países.

La tecnología DQDB ha tenido escasa difusión. Su mayor mérito ha sido servir como predecesora de ATM en algunos aspectos. En el futuro es de esperar que la red DQDB caiga en desuso o desaparezca ya que su espacio ha sido ocupado por completo por las redes basadas en ATM.

Un caso de redes especialmente difíciles de clasificar son las formadas por empresas de televisión por cable. Desde el punto de vista técnico estas redes se podrían considerar tipo LAN, y como tal las estudiaremos; sin embargo el hecho de que sean gestionadas por empresas especializadas y ofrecidas como un servicio contratable por los usuarios les da unas características de WAN desde el punto de vista legal. Estas circunstancias unidas a su alcance máximo (entre 160 y 200 Km) hacen que las podamos considerar en cierto modo como redes MAN.

El término MAN suele utilizarse también en ocasiones para denominar una interconexión de LANs ubicadas en diferentes recintos geográficos (por ejemplo diferentes campus) cuando se dan las siguientes circunstancias:

- La interconexión hace uso de enlaces telefónicos de alta o muy alta velocidad (comparable a la de las propias LANs interconectadas).
- La interconexión se efectúa de forma transparente al usuario, que aprecia el conjunto como una única LAN por lo que se refiere a servicios, protocolos y velocidades de transmisión.
- Existe una gestión unificada de toda la red

1.2.5 Redes de área extensa (WAN)

Las redes de amplio alcance se utilizan cuando no es factible tender redes locales, bien porque la distancia no lo permite por el costo de la infraestructura o simplemente porque es preciso atravesar terrenos públicos en los que no es posible tender infraestructura propia. En todos estos casos lo normal es utilizar para la transmisión de los datos los servicios de una empresa portadora. Hasta hace poco este tipo de servicios eran ofrecidos en régimen de monopolio por las compañías telefónicas en la mayoría de los países de Europa. Afortunadamente esto está cambiando rápidamente siendo posible por ejemplo en España contratar hoy en día servicios portadores de datos con Retevisión, o en breve con diversas compañías de televisión por cable, si bien en muchos casos la mayor penetración de Telefónica hace que haya un monopolio de facto.

En la literatura especializada es frecuente referirse a las compañías telefónicas europeas genéricamente con la denominación PTT, abreviatura de Post, Telegraph and Telephone. Esto se debe a que en muchos países de Europa la empresa que se encargaba tradicionalmente de las transmisiones telefónicas era la misma que ofrecía el servicio de correos y telégrafos, todo esto en régimen de monopolio. Con la liberalización del servicio de telefonía y la aparición de diversas compañías competidoras la denominación PTT se está sustituyendo por la de *operador* (que quiere decir que opera la red); la costumbre hace que en muchos casos se siga aun utilizando el término PTT.

Las redes WAN se implementan casi siempre haciendo uso de enlaces telefónicos que han sido diseñados principalmente para transmitir la voz humana, ya que este es el principal negocio de las compañías telefónicas. Normalmente la infraestructura está fuera del control del usuario, estando supeditado el servicio disponible a la zona geográfica de que se trate. Conseguir capacidad en redes WAN suele ser caro, por lo que generalmente se solicita el mínimo imprescindible.

Hasta tiempos recientes las conexiones WAN se caracterizaban por su lentitud, costo y tasa de errores relativamente elevada. Con la paulatina introducción de fibras ópticas y líneas digitales en las infraestructuras de las compañías portadoras las líneas WAN han reducido apreciablemente su tasa de errores; también se han mejorado las capacidades y reducido los costos. A pesar del inconveniente que en ocasiones pueda suponer el uso de líneas telefónicas tienen la gran virtud de llegar prácticamente a todas partes, que no es poco.

Con la excepción de los enlaces vía satélite, que utilizan transmisión broadcast, las redes WAN se implementan casi siempre con enlaces punto a punto, por lo que prácticamente todo lo que hemos dicho en el apartado de redes punto a punto es aplicable a las redes WAN.

1.2.6 Redes inalámbricas y movilidad.

En los últimos años ha habido un auge considerable de los sistemas de telefonía inalámbrica. Algunos usuarios requieren facilidades para conectar por radioenlaces sus ordenadores personales desde cualquier lugar o mientras se encuentran viajando en tren, autobús, etc. El sistema de telefonía inalámbrica digital GSM (Global System for Mobile communications), muy extendido en Europa, utiliza un canal digital para transmitir la voz, por lo que es posible conectar un ordenador portátil mediante un teléfono GSM, sin necesidad de módem. En algunos países ya se han hecho experimentos de conexiones inalámbricas a 64 Kb/s utilizando una versión modificada del GSM.

La conexión de ordenadores con total movilidad es importante en aplicaciones tales como flotas de taxis, camiones, autobuses, servicios de emergencia, fines militares, etc. En estos casos se emplean, además de los ya familiares ordenadores portátiles conocidos como 'laptops', otros aún más pequeños que se conocen como 'palmtop', asistente digital personal o PDA (Personal Digital Assistant), y que son algo intermedio entre un ordenador portátil y una agenda electrónica.

Las redes inalámbricas también tienen utilidad en algunos casos donde no se requiere movilidad, como en las LANs inalámbricas. Por ejemplo, una empresa que desea establecer una nueva oficina y por rapidez, provisionalidad de la ubicación o simples razones estéticas no desea cablear el edificio puede utilizar una LAN inalámbrica, consistente en una serie de equipos transmisores-receptores. Las LAN inalámbricas son generalmente más lentas que las normales (1-2 Mb/s) y tienen una mayor tasa de errores, pero para muchas aplicaciones pueden ser adecuadas.

La movilidad es importante también en casos en que no hay involucradas conexiones inalámbricas. Por ejemplo un representante que desee conectar con su oficina desde su ordenador portátil cuando se encuentra de viaje puede optar por llamar a su oficina directamente, pagando posiblemente una costosa llamada de larga distancia, o bien puede llamar al punto de presencia (POP, Point Of Presence) mas próximo de algún proveedor de servicios de comunicación, y a través de este acceder a su oficina por una infraestructura compartida que le resulte mas barata (por ejemplo la Internet); en este último caso se dan una serie de problemas de solución no trivial en cuanto a la seguridad y el correcto encaminamiento del tráfico.

1.2.7 Internetworking

Si bien las clasificaciones de redes antes estudiadas tienen interés como medio de sistematizar su estudio, es obvio que en la realidad casi nunca se da uno de esos tipos en estado puro. Por ejemplo, una LAN (que normalmente será una red de tipo broadcast) casi siempre dispondrá de un router que la interconecte a una WAN (que generalmente consistirá en un conjunto de enlaces punto a punto). Esta interconexión de tecnologías diferentes se conoce como 'internetworking' (que podríamos intentar traducir como 'interredes'). El router que interconecta redes diferentes está físicamente conectado a todas las redes que se desean interconectar.

Además de la combinación de medios físicos diversos es posible encontrarse con necesidades de internetworking en un mismo medio físico; este es el caso cuando coexisten protocolos de comunicación diferentes; por ejemplo, en una misma red Ethernet puede haber unos ordenadores utilizando el protocolo TCP/IP y otros utilizando DECNET (protocolo típico de la marca de ordenadores Digital). Al ser protocolos diferentes son completamente independientes y no se pueden hablar entre sí, por lo que un usuario de un ordenador TCP/IP no podría por ejemplo enviar un mensaje de correo electrónico a uno de un ordenador DECNET. Sin embargo, es posible instalar en un ordenador ambos protocolos, y un programa de conversión de correo electrónico, de forma que los usuarios de ambas redes puedan intercambiar mensajes. A la máquina que interconecta el correo electrónico de los dos protocolos se la denomina *pasarela* ('gateway' en inglés). Generalmente las pasarelas han de implementarse a nivel de aplicación; así disponer en nuestro ejemplo de una pasarela para el correo electrónico no significa que podamos transferir ficheros entre máquinas TCP/IP y DECNET, ya que para esto haría falta una pasarela del servicio de transferencia de ficheros. Una misma máquina puede actuar como pasarela para varios servicios. Haciendo una analogía podemos decir que los protocolos son como idiomas y las pasarelas equivalen a servicios de traducción que permiten entenderse a personas que hablan diferentes lenguas.

Cuando una red esta formada por la interconexión de varias redes se le denomina *internet*. A principios de los setenta se creó en los Estados Unidos una internet mediante la unión de varias redes que utilizando medios de transmisión diversos empleaban un conjunto común de protocolos en el nivel de red y superiores, denominados TCP/IP. Con el tiempo la denominación Internet (con I mayúscula) terminó convirtiéndose en el nombre propio de dicha red, muy conocida en nuestros días.

1.3 ARQUITECTURA DE REDES

En los inicios de la informática el diseño de un ordenador resultaba en sí mismo una tarea tan compleja que no se tomaba en consideración la compatibilidad con otros modelos de ordenadores; la preocupación fundamental era que el diseño fuera correcto y eficiente. Como consecuencia de esto era preciso crear para cada nuevo modelo de ordenador un nuevo sistema operativo y conjunto de compiladores. Los programas escritos en lenguaje máquina o en ensamblador (que entonces eran la mayoría) tenían que ser prácticamente reescritos para cada nuevo modelo de ordenador.

En 1964 IBM anunció un nuevo ordenador denominado *Sistema/360*. Se trataba en realidad de una familia formada por varios modelos que compartían una *arquitectura* común (era la primera vez que se utilizaba este término referido a ordenadores). La arquitectura establecía unas especificaciones comunes que hacían compatibles a todos los modelos de la familia (conjunto de instrucciones, forma de representar los datos, etc.), pudiendo así ejecutar los mismos programas, utilizar el mismo sistema operativo, compiladores, etc. en toda la familia, que comprendía una gama de ordenadores de potencias y precios diversos. El nombre 360 se eligió en base a la década en que se creó (los 60) y a la idea de que era una arquitectura polivalente, que pretendía servir para aplicaciones de todo tipo (360°, o sea que puede ir en todas direcciones). La arquitectura 360 ha ido evolucionando hasta desembocar en nuestros días en la arquitectura ESA/390, utilizada en los grandes ordenadores IBM (mainframes) actuales, que son aún la base de las aplicaciones críticas en grandes empresas (bancos, líneas aéreas, etc.). Todos los fabricantes de ordenadores actuales utilizan una o varias arquitecturas como base para el diseño de sus equipos.

Las primeras redes de ordenadores tuvieron unos inicios muy similares a los primeros ordenadores: Las redes y los protocolos se diseñaban pensando en el hardware a utilizar en cada momento, sin tener en cuenta la evolución previsible, ni por supuesto la interconexión y compatibilidad con equipos de otros fabricantes (seguramente muchos creían que bastante trabajo suponía conseguir que las cosas funcionaran como para perder el tiempo con florituras). A medida que la tecnología avanzaba y se mejoraba la red se vivieron experiencias parecidas a las de los primeros ordenadores: los programas de comunicaciones, que habían costado enormes esfuerzos de desarrollo, tenían que ser reescritos para utilizarlos con el nuevo hardware, y debido a la poca modularidad prácticamente nada del código era aprovechable.

El problema se resolvió de forma análoga a lo que se había hecho con los ordenadores. Cada fabricante elaboró su propia *arquitectura de red*, que permitía independizar las funciones y el software del hardware concreto utilizado. De esta forma cuando se quería cambiar algún componente sólo la función o el módulo afectado tenía que ser sustituido. La primera arquitectura de redes fue anunciada por IBM en 1974, justo diez años después de anunciar la arquitectura S/360, y se denominó SNA (Systems Network Architecture). La arquitectura SNA se basa en la definición de siete niveles o capas, cada una de las cuales ofrece una serie de servicios a la siguiente, la cual se apoya en esta para implementar los suyos, y así sucesivamente. Cada capa puede implementarse en hardware, software o una combinación de ambos. El módulo (hardware y/o software) que implementa una capa en un determinado elemento de la red debe poder sustituirse sin afectar al resto de la misma, siempre y cuando el protocolo utilizado se mantenga inalterado. Dicho en otras palabras, SNA es una arquitectura altamente modular y estructurada. No vamos a entrar en mas detalles sobre la arquitectura SNA, ya que cae fuera de los objetivos del presente curso, pero sí diremos que el modelo de capas que utiliza ha sido la base de todas las arquitecturas de redes actualmente en uso, incluidas las basadas en el modelo OSI (Open Systems Interconnection) y el TCP/IP (Transmission Control Protocol/Internet Protocol) que veremos en detalle más adelante.

Las ideas básicas del modelo de capas son las siguientes:

- La capa n ofrece una serie de servicios a la capa $n+1$.
- La capa n solo 've' los servicios que le ofrece la capa $n-1$.
- La capa n en un determinado sistema solo se comunica con su homóloga en el sistema remoto (comunicación de igual a igual o 'peer-to-peer'). Esa 'conversación' se efectúa de acuerdo con una serie de reglas conocidas como *protocolo de la capa n*.

La comunicación entre dos capas adyacentes en un mismo sistema se realiza de acuerdo con una *interfaz*. La interfaz es una forma concreta de implementar un servicio y no forma parte de la arquitectura de la red.

La arquitectura de una red queda perfectamente especificada cuando se describen las capas que la componen, su funcionalidad, los servicios que implementan y los protocolos que utilizan para hablar con sus 'iguales'. El conjunto de protocolos que utiliza una determinada arquitectura en todas sus capas se denomina *pila de protocolos* ('protocol stack' en inglés); así es frecuente oír hablar de la pila de protocolos OSI, SNA, TCP/IP o DECNET, por ejemplo.

Para mejor comprender como funciona el modelo de arquitectura de redes basado en capas hagamos una analogía. Supongamos que un ejecutivo de la empresa A desea enviar de forma urgente un importante informe a un colega suyo en la empresa B. Para esto hablará con aquél notificándole el envío y a continuación pasará a su secretaria el informe con las instrucciones correspondientes. La secretaria llamará a la secretaria de B para averiguar la dirección exacta, pondrá el informe en un sobre y llamará a un servicio de mensajería, que enviará a un motorista para que recoja el paquete y lo lleve al aeropuerto. Cuando el paquete llega al aeropuerto de destino es recogido allí por otro motorista que lo lleva a la oficina de la empresa B y lo entrega a la secretaria; ésta se ocupará de los trámites administrativos (pagar al mensajero, abrir el paquete, comprobar su contenido, acusar recibo a la secretaria de A, etc.) y lo pasará después a su jefe, el cual una vez estudio el informe llamará al ejecutivo de A.

Obsérvese que en el proceso anterior existen diferentes niveles claramente diferenciados: los ejecutivos, las secretarías, los motoristas, y por último la empresa de líneas aéreas que se ocupa del transporte físico de la mercancía. En todos los niveles (menos probablemente el más bajo) hay dos entidades, la transmisora (A) y la receptora (B). Si todo ocurre según lo previsto cada entidad sólo hablará con su correspondiente en el otro lado, y con sus entidades vecinas, es decir, el jefe de A sólo habla con el jefe de B y con su secretaria, la secretaria habla con su jefe, con el motorista y con la otra secretaria para confirmar el envío, etc. En ningún caso se contempla que la secretaria de A hable con el ejecutivo de B. Si por ejemplo la secretaria de A es sustituida por enfermedad por otra persona los procedimientos seguirán funcionando, siempre y cuando la secretaria suplente desarrolle la misma función. Las variaciones de carácter interno sólo han de ser conocidas por las entidades contiguas, por ejemplo, el motorista de B podría ser reemplazado por una furgoneta de reparto, y este hecho solo ha de ser conocido por la secretaria de B y por la persona que entrega los paquetes en el aeropuerto. Esto es lo que denominamos una interfaz. Obsérvese que el modelo de capas simplifica considerablemente la tarea de cada una de las entidades, que sólo tiene que preocuparse de una pequeña parte de todo el mecanismo. En esencia se trata de aplicar a la resolución de problemas la vieja fórmula de divide y vencerás.

Cuando un sistema desea enviar un mensaje a un sistema remoto normalmente la información se genera en el nivel más alto; conforme va descendiendo se producen diversas transformaciones, por ejemplo adición de cabeceras, de colas, de información de control, la fragmentación en paquetes mas pequeños si es muy grande (o mas raramente la fusión con otros si es demasiado pequeño), etc. Todas estas operaciones se invierten en el sistema remoto en las capas correspondientes, llegando en cada caso a la capa correspondiente en el destino un mensaje igual al original.

1.3.1 Diseño de arquitecturas de redes.

Cuando se diseña una arquitectura de red hay una serie de aspectos y decisiones fundamentales que condicionan todo el proceso. Entre estos cabe mencionar los siguientes:

Direccionamiento: cada capa debe poder identificar los mensajes que envía y recibe. En ocasiones un mismo ordenador puede tener varias instancias de una misma capa, por lo que la sola identificación del ordenador puede no ser suficiente.

Normalmente cualquier protocolo admite comunicación en ambos sentidos (dúplex); pero no siempre se permite que esta ocurra de forma *simultánea* (full-dúplex). También se debe determinar si se definirán *prioridades*, y cuáles serán éstas.

En cualquier comunicación es preciso establecer un *control de errores*, ya que los canales de comunicación no son totalmente fiables. Es preciso decidir que código de detección y/o corrección de errores se va a utilizar, y en que capa o capas se va a llevar a cabo. Generalmente a medida que los medios de transmisión mejoran y las tasas de errores disminuyen la detección/corrección se va suprimiendo de las capas inferiores y dejando al cuidado de las más altas, ya que es un proceso costoso que puede llegar a ralentizar apreciablemente la transmisión.

En algunos casos se debe tener en cuenta la posibilidad de que los paquetes lleguen a su destino en *orden diferente* al de envío.

Debe contemplarse la posibilidad de que el receptor no sea capaz de ‘digerir’ la información enviada por el transmisor. Para esto es conveniente disponer de algún mecanismo de control de flujo y notificación para indicar la *congestión*.

Normalmente los equipos funcionan de forma óptima cuando el tamaño de los mensajes que se envían esta dentro de un cierto rango. Para evitar los problemas que puede producir el envío de mensajes muy grandes o muy pequeños se suelen contemplar mecanismos de *fragmentación* y reagrupamiento. Es importante que estos mecanismos estén claramente especificados para evitar la destrucción del mensaje en tránsito.

1.3.2 Interfaces y servicios

Debido a su importancia vamos a estudiar con más detalle que es un servicio. Empezaremos con algunas definiciones.

Llamaremos *entidad* a los elementos activos en cada capa. Una entidad puede ser un proceso, un componente hardware, o una combinación de ambos. Un ordenador puede tener una o varias entidades en cada capa (por ejemplo un ordenador con dos tarjetas de conexión a LAN).

Llamaremos *entidades iguales* o *entidades pares* (*‘peer entities’* en inglés) a dos entidades diferentes que pertenecen a la misma capa; generalmente estarán en diferentes máquinas, pero podrían estar en la misma.

Las entidades de la capa n implementan los servicios que utiliza la capa $n+1$. En este caso la capa n actúa como el *proveedor del servicio* y la capa $n+1$ es el *usuario del servicio*. El uso que la capa n haga de los servicios de la capa $n-1$ es algo que no afecta ni incumbe a la capa $n+1$.

Los servicios están disponibles en los SAPs (Service Access Points). Los SAPs de la capa n son los puntos donde la capa $n+1$ puede acceder a los servicios ofertados. Cada SAP de cada entidad de la capa n tiene una dirección que le identifica de forma única en toda la red.

Denominamos *interfaz* al conjunto de reglas que gobiernan el intercambio de información entre capas. En una comunicación la entidad de la capa $n+1$ intercambia una *IDU* (Interface Data Unit) con la entidad de la capa n a través del SAP (ver Fig. 1-12 del Tanenbaum). La IDU esta formada por una SDU (Service Data Unit) e información de control. La SDU es la información que se transmite a la entidad equivalente (peer) en el lado contrario, y de allí a la capa $n+1$ a través de su SAP. La información de control es necesaria como su nombre indica para que la capa n haga correctamente su trabajo, pero no es parte de los datos mismos. En la especificación de una arquitectura solo es necesario describir la estructura de la SDU, pero no la de la IDU; ésta se describe en la interfaz, que puede ser distinta para cada implementación.

Para transferir la SDU (Service Data Unit) la entidad de la capa n puede tener que fragmentarla en varias PDUs (Protocol Data Units). Cada PDU llevará una cabecera que permitirá a la entidad de la capa n en el otro lado ensamblar de nuevo la SDU correctamente.

1.3.3 Servicios orientados y no orientados a conexión

En una arquitectura de redes cada capa utiliza los servicios de la capa inmediatamente inferior para comunicar con la correspondiente del otro extremo. En función de como se establezca esa comunicación suelen distinguirse dos tipos de servicios: orientados a conexión y no orientados a conexión.

En el *servicio orientado a conexión*, también llamado CONS (Connection Oriented Network Service), primero se establece el canal de comunicación, después se transmiten los datos, y por último se termina la conexión. Dicha 'conexión' se denomina *circuito virtual* (VC, virtual circuit). Una vez establecido el VC el camino físico que van a seguir los datos está determinado; los paquetes deben ir todos por él desde el origen al destino, y llegar en el mismo orden con el que han salido. Dado que el VC establece de forma clara el destino, los paquetes no necesitan contener su dirección. Generalmente se distinguen dos tipos de circuitos virtuales: *conmutados*, también llamados SVCs (Switched Virtual Circuits), y *permanentes*, conocidos también como PVCs (Permanent Virtual Circuits). Los SVCs se establecen y terminan a petición del usuario, normalmente cuando hay paquetes que se quieren transmitir. Los PVCs están establecidos todo el tiempo que la red está operativa (o al menos eso es lo que se pretende). Al hablar de circuitos utilizaremos las denominaciones 'establecer' y 'terminar' en vez de abrir y cerrar, ya que estos términos tienen un significado completamente opuesto según se trate de ingenieros informáticos o electrónicos (para un ingeniero electrónico un circuito está abierto cuando está interrumpido, es decir cuando no puede viajar por el ninguna señal).

En el servicio *no orientado a conexión*, llamado también CLNS (ConnectionLess Network Service) la comunicación se establece de manera menos formal. Cuando una entidad tiene información que transmitir sencillamente la envía en forma de paquetes, confiando que estos llegaran a su destino mas pronto o mas tarde. No se establece previamente un VC ni otro tipo de canal de comunicación extremo a extremo; los paquetes pueden ir por caminos físicos diversos, y deben incluir cada uno la dirección de destino. Los paquetes pueden ser almacenados por nodos intermedios de la red, y reenviados mas tarde. Aunque lo normal es que lleguen en el mismo orden con que han salido, esto no está garantizado como ocurría en el servicio orientado a conexión debido al almacenamiento en nodos intermedios y a la diversidad de caminos físicos posibles. A los paquetes enviados en un servicio no orientado a conexión se les denomina *datagramas*, ya que cada paquete viaja hacia su destino de forma completamente independiente de los demás como si fuera un telegrama.

Generalmente se suelen explicar los modelos orientado y no orientado a conexión con dos analogías: el sistema telefónico y el sistema postal. El sistema telefónico es un ejemplo de servicio orientado a conexión, mientras que el sistema postal es un servicio no orientado a conexión. La analogía es bastante exacta salvo por el hecho de que en redes telemáticas la diferencia en el tiempo de entrega del mensaje entre servicios CONS y CLNS no es tan grande como la anterior comparación podría hacer pensar.

En cualquiera de los dos tipos de servicio antes mencionados es posible que se produzca pérdida de información; también puede ocurrir que el tiempo de envío del paquete, también llamado retardo o latencia ('delay' y 'latency' respectivamente en inglés) sea demasiado grande o fluctúe dentro de un amplio rango debido a la carga o congestión en la red (el término inglés usado para denominar dicha fluctuación es *jitter*, que literalmente significa mieditis, temblar de miedo). En algunos casos se requiere una entrega fiable, es decir que se garantice la entrega de los paquetes, o un retardo y/o jitter garantizados, o sea no superiores a un determinado valor. Por ejemplo si transferimos un fichero, normalmente dividiéndolo en múltiples paquetes, necesitaremos un servicio fiable en la entrega, pero podemos tolerar un retardo o jitter más o menos grande; por el contrario la voz, o el vídeo (imagen en movimiento) toleran un pequeño porcentaje de pérdidas, pero requieren un retardo y un jitter reducidos y constantes. Cuando al establecer una comunicación se solicita un nivel mínimo para alguno de éstos parámetros se dice que se requiere una *calidad de servicio* (llamada QoS, Quality of Service). La calidad de servicio estipula unos mínimos que la red ha de satisfacer para efectuar la conexión, por ejemplo 'transmisión fiable con un retardo no superior a 100 ms'; es posible que la red no sea capaz de satisfacer la calidad solicitada, en cuyo caso podría hacer una propuesta alternativa, a modo de regateo (por ejemplo, 'no puedo asegurar 100 ms de retardo, lo mínimo es 250ms, ¿estás conforme?') Una vez pactadas las condiciones de la

conexión éstas actúan a modo de contrato que obliga a la red a dar la calidad de servicio prometida al usuario. No todos los protocolos o redes ofrecen la posibilidad de negociar calidades de servicio; en estos casos el protocolo simplemente aprovecha los medios disponibles lo mejor que puede, intentando evitar las congestiones y situaciones críticas en lo posible, y repartir los recursos entre los usuarios de manera mas o menos equilibrada; esta estrategia se denomina del ‘mejor esfuerzo’ (o también ‘best effort’). Como ejemplos de redes con QoS podemos citar ATM, como ejemplos de redes ‘best effort’ podemos mencionar TCP/IP (la Internet) y Ethernet.

1.3.4 Primitivas de servicio

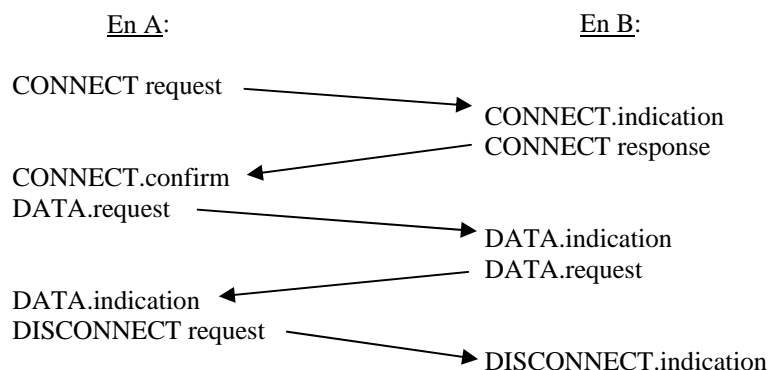
Recordemos que, en el modelo de capas, cada capa ofrece sus servicios a la siguiente. El servicio se define por un conjunto de operaciones u órdenes que la capa superior puede mandar a la capa inferior. Dicho conjunto de operaciones se denomina *primitivas*.

Vamos a analizar en detalle las primitivas que participan en el establecimiento y terminación de una conexión entre la capa n de dos sistemas llamados A y B. La entidad $A.n$ (es decir, la capa n del sistema A) inicia la conexión emitiendo la primitiva *CONNECT.request*, que provoca la transferencia de una IDU (Interface Data Unit) a través del SAP (Service Access Point) a la entidad $A.n-1$; ésta extrae la información de control y la interpreta creando la SDU (Service data Unit), que convierte en una o varias PDUs (Protocol Data Units); las PDUs son transferidas a $B.n-1$, que regenera a partir de ello la SDU, luego la información de control correspondiente y con ambos la IDU; una vez dispone de la IDU la transmite a $B.n$ a través del SAP mediante la primitiva *CONNECT.indication*, que le indica a $B.n$ que alguna entidad desea establecer conexión con ella. La entidad $B.n$ emite entonces la primitiva *CONNECT.response* para indicar si acepta o rechaza la conexión (las primitivas pueden llevar parámetros y sería aquí donde se indicaría esto). La respuesta se traduce en un paquete que $B.n-1$ envía a $A.n-1$, el cual informa a $A.n$ de la situación mediante la primitiva *CONNECT.confirm*.

Obsérvese que el mismo evento origina diferentes primitivas en cada lado. Una *CONNECT.request* produce una *CONNECT.indication* en el lado contrario, y la *CONNECT.response* se convierte en *CONNECT.confirm*. Existe una cierta simetría entre las primitivas, ya que a una *CONNECT.request* siempre le corresponderá una *CONNECT.indication* en el lado opuesto (salvo que falle la comunicación).

En este ejemplo hemos hecho un servicio *confirmado*, es decir, hemos verificado que la conexión se establecía, para lo cual ha tenido que enviarse un paquete en cada sentido. Se podría haber hecho una conexión no confirmada, para lo cual sencillamente se habría emitido la *CONNECT.request* y la *CONNECT.indication*.

Una vez establecida la conexión lo normal sería transferir datos, y finalmente terminar la conexión. Un ejemplo del conjunto de primitivas que se emitirían a lo largo de una conexión podría ser el siguiente:



Aquí hemos introducido cuatro nuevas primitivas para poder transferir datos y terminar la conexión. Obsérvese que como antes una primitiva *request* va seguida siempre de una *indication* en el lado contrario. En este ejemplo hemos supuesto que se intercambiaban únicamente dos paquetes de datos.

Como ya hemos dicho las primitivas pueden llevar parámetros, y de hecho casi siempre los llevan. Por ejemplo una `CONNECTrequest` llevará la máquina con la que se desea conectar, una `CONNECT.indication` dirá la máquina que quiere conectar con nosotros, etc. La descripción detallada de estos argumentos, su significado, etc., no es parte de la especificación de las primitivas (y por tanto del servicio) sino del protocolo. El protocolo puede modificarse sin necesidad de cambiar las primitivas. Por ejemplo, un protocolo puede establecer que el servicio de establecimiento de conexión sea confirmado y otro que no lo sea, y ambos pueden utilizar el mismo conjunto de primitivas antes descrito.

Una vez más diremos que la interfaz no forma parte del protocolo. Por ejemplo imaginemos en el caso anterior que las entidades A_n y A_{n-1} acuerdan que la SDU estará codificada en EBCDIC, mientras que B_n y B_{n-1} acuerdan utilizar ASCII. Si el protocolo de la capa $n-1$ establece que la PDU estará en ASCII, entonces A_{n-1} sabe que deberá realizar la conversión de códigos cada vez que construya una PDU a partir de una SDU, o viceversa.

1.4 MODELOS DE REFERENCIA

Hasta aquí hemos hablado del modelo de capas en un sentido genérico. Vamos a hablar ahora con cierto detalle de las dos arquitecturas de redes más importantes en la actualidad, correspondientes a los protocolos OSI (Open Systems Interconnection) y TCP/IP (Transmission Control Protocol/Internet Protocol). Conviene destacar que la arquitectura es una entidad abstracta, más general que los protocolos o las implementaciones concretas en que luego se materializan éstos. Típicamente para cada capa de una arquitectura existirán uno o varios protocolos, y para cada protocolo habrá múltiples implementaciones. Las implementaciones cambian continuamente; los protocolos ocasionalmente se modifican o aparecen otros nuevos que coexisten con los anteriores o los dejan anticuados; sin embargo una vez definida una arquitectura ésta permanece esencialmente intacta y muy raramente se modifica.

1.4.1 El modelo de referencia OSI

Después de la especificación de SNA por parte de IBM cada fabricante importante definió su propia arquitectura de redes; así la evolución de los productos de comunicaciones estaba garantizada, pero no se había resuelto el problema de la interoperabilidad entre diferentes fabricantes. Debido a la posición de hegemonía que IBM disfrutaba en los años 70 y principios de los ochenta la compatibilidad con IBM era un requisito necesario, por lo que la mayoría de los fabricantes tenían implementaciones de los protocolos SNA para sus productos, o estas estaban disponibles a través de terceros. Así, la forma mas sencilla de interconectar dos equipos cualesquiera era conseguir que ambos hablaran SNA.

En 1977 la ISO (International Organization for Standardization) consideró que esta situación no era la mas conveniente, por lo que entre 1977 y 1983 definió la arquitectura de redes OSI con el fin de promover la creación de una serie de estándares que especificaran un conjunto de protocolos independientes de cualquier fabricante. Se pretendía con ello no favorecer a ninguno a la hora de desarrollar implementaciones de los protocolos correspondientes, cosa que inevitablemente habría ocurrido si se hubiera adoptado alguna de las arquitecturas existentes, como la SNA de IBM o la DNA (Digital Network Architecture) de Digital. Se esperaba llegar a convertir los protocolos OSI en el auténtico *Esperanto* de las redes telemáticas. Por diversas razones que veremos luego el éxito de los protocolos OSI en la práctica ha sido mucho menor de lo inicialmente previsto (cosa que por cierto también le ha ocurrido al Esperanto, aparentemente).

Seguramente la aportación más importante de la iniciativa OSI ha sido precisamente su arquitectura. Ésta ha servido como marco de referencia para describir multitud de redes correspondientes a diversas arquitecturas, ya que la arquitectura OSI es bien conocida en entornos de redes, y su generalidad y no dependencia de ningún fabricante en particular le hacen especialmente adecuada para estos fines. Por este motivo generalmente a la arquitectura OSI se la denomina *Modelo de Referencia OSI*, o también *OSIRM* (OSI Reference Model). Por extensión hoy en día se utiliza a menudo el término *modelo de referencia* para referirse a una arquitectura de red; así oímos hablar del Modelo de Referencia TCP/IP, el Modelo de Referencia ATM, etc.

El modelo OSI define siete capas, curiosamente como en la arquitectura SNA si bien la funcionalidad es diferente. Las capas son las siguientes:

- Física
- Enlace
- Red
- Transporte
- Sesión
- Presentación
- Aplicación

La ISO ha especificado protocolos para todas las capas, aunque algunos son poco utilizados. En función del tipo de necesidades del usuario no siempre se utilizan todas ellas.

Pasaremos a describir brevemente las funciones desarrolladas por cada una de las capas.

1.4.1.1 La Capa Física

Esta capa transmite los bits entre dos entidades (nodos) directamente conectadas. Puede tratarse de un enlace punto a punto o de una conexión multipunto (una red broadcast, por ejemplo Ethernet). La comunicación puede ser dúplex, semi-dúplex o simplex. Si la información se transmite por señales eléctricas se especifican los voltajes permitidos y su significado (1 ó 0) y análogamente para el caso de fibra óptica. Se especifican las características mecánicas del conector, la señalización básica, etc.

Como ejemplos de la capa física podemos mencionar las norma EIA RS-232-C, utilizada por las puertas COM de los ordenadores personales, la EIA-RS-449, CCITT X.21/X.21bis, CCITT V.35. Las normas de redes locales incluyen en sus especificaciones la capa física (IEEE 802.3 o Ethernet, IEEE 802.5 o Token Ring, ISO 9314 o FDDI, etc.)

Muchas de las normas que existen en la capa física se refieren a la interfaz utilizada para conectar un ordenador con un módem o dispositivo equivalente, que a través de una línea telefónica conecta con otro módem y ordenador en el extremo opuesto. Este es el caso por ejemplo de las normas EIA RS-232-C, EIA-RS-449, CCITT X.21/X.21bis y CCITT V.35 antes mencionadas. En estos el conector del ordenador y el módem son de diferente 'sexo' (macho o hembra). En este contexto se suele utilizar la denominación *DTE (Data Terminal Equipment)* para referirse al ordenador y *DCE (Data Circuit-Terminating Equipment)* para referirse al módem. El 'módem' en ocasiones no es más que un adaptador, ya que por ejemplo la norma X.21 se utiliza para líneas digitales. En sentido general al equipo que actúa como adaptador entre el ordenador y el medio de transmisión se le denomina CSU/DSU (Channel Service Unit/Data Service Unit).

1.4.1.2 La capa de enlace (data link)

La principal función de la capa de enlace es ofrecer un servicio de comunicación fiable a partir de los servicios que recibe de la capa física, también entre dos entidades contiguas de la red. Esto supone que se realice detección y posiblemente corrección de errores. A diferencia de la capa física, que transmitía los bits de manera continua, la capa de enlace transmite los bits en grupos denominados *tramas* (*frames* en inglés) cuyo tamaño es típicamente de unos pocos cientos a unos pocos miles de bytes. En caso de que una trama no haya sido transmitida correctamente se deberá enviar de nuevo; también debe haber mecanismos para reconocer cuando una trama se recibe duplicada. Generalmente se utiliza algún mecanismo de control de flujo, para evitar que un transmisor rápido pueda 'abrumar' a un receptor lento.

Las redes broadcast utilizan funciones especiales de la capa de enlace para controlar el acceso al medio de transmisión, ya que éste es compartido por todos los nodos de la red. Esto añade una complejidad a la capa de enlace que no está presente en las redes basadas en líneas punto a punto, razón por la cual en las redes broadcast la capa de enlace se subdivide en dos subcapas: la inferior, denominada subcapa MAC (Media Access Control) se ocupa de resolver el problema de acceso al medio, y la superior, subcapa LLC (Logical Link Control) cumple una función equivalente a la capa de enlace en las líneas punto a punto.

Ejemplos de protocolos de la capa de enlace son el ISO 7776, la capa de enlace de X.25 (de la ITU) o el ISO HDLC. Como ejemplos de protocolos de la subcapa MAC podemos citar los IEEE 802.3 (Ethernet), IEEE 802.5 (Token Ring) o el ISO 9314 (FDDI). El protocolo de subcapa LLC de todas las redes locales broadcast es el IEEE 802.2.

1.4.1.3 La capa de red

La capa de red se ocupa del control de la subred. Esta es la capa que tiene 'conciencia' de la topología de la red, y se ocupa de decidir por que ruta va a ser enviada la información; la decisión de la ruta a seguir puede hacerse de forma estática, o de forma dinámica en base a información obtenida de otros nodos sobre el estado de la red.

De forma análoga a la capa de enlace la capa de red maneja los bits en grupos discretos que aquí reciben el nombre de *paquetes*; motivo por el cual a veces se la llama la capa de paquete. Los paquetes tienen tamaños variables, pudiendo llegar a ser muy elevados, sobre todo en protocolos recientes, para poder aprovechar eficientemente la elevada velocidad de los nuevos medios de transmisión (fibra óptica, ATM, etc.). Por ejemplo en TCP/IP el tamaño máximo de paquete es de 64 KBytes, pero en el nuevo estándar, llamado IPv6, el tamaño máximo puede llegar a ser de 4 GBytes (4.294.967.296 Bytes).

Entre las funciones de la capa de red cabe destacar, aparte de la ya mencionada de elegir la ruta a seguir, el control del tráfico para evitar situaciones de congestión o 'atascos'. En el caso de ofrecer servicios con QoS el nivel de red debe ocuparse de reservar los recursos necesarios para poder ofrecer el servicio prometido con garantías. También debe ser capaz de efectuar labores de contabilidad del tráfico en caso necesario (por ejemplo si el servicio se factura en base a la cantidad de datos transmitidos).

En la capa de red es donde con mas intensidad se observa la distinción entre servicios orientados y no orientados a conexión (CONS vs CLNS). En el curso veremos en detalle las redes ATM, que en el nivel de red dan un servicio de tipo CONS, y las redes TCP/IP, que en el nivel de red dan un servicio de tipo CLNS.

La capa de red es la más importante en redes de conmutación de paquetes (tales como X.25 o TCP/IP). Algunos ejemplos de protocolos utilizados en la capa de red son los protocolos de nivel de paquete y nivel de pasarela CCITT X.25 y X.75, el IP (Internet Protocol), CCITT/ITU-T Q.931, Q.933, Q.2931, y el OSI CLNP (ConnectionLess Network Protocol).

En las redes de tipo broadcast el nivel de red es casi inexistente, ya que desde un punto de vista topológico podemos considerar que en una red broadcast los nodos están interconectados todos con todos, por lo que no se toman decisiones de encaminamiento. Sin embargo veremos que la unión de redes broadcast mediante puentes suscita en algunos casos la necesidad de efectuar tareas propias del nivel de red en el nivel de enlace.

1.4.1.4 La capa de transporte

La capa de transporte es la primera que se ocupa de comunicar directamente nodos terminales, utilizando la subred como un medio de transporte transparente gracias a los servicios obtenidos de la capa de red. Por esta razón se la ha llamado históricamente la capa host-host. También se suele decir que es la primera capa extremo a extremo.

La principal función de la capa de transporte es fragmentar de forma adecuada los datos recibidos de la capa superior (sesión) para transferirlos a la capa de red, y asegurar que los fragmentos lleguen y son recompuestos correctamente en su destino.

En condiciones normales la capa de transporte solicita a la capa de red una conexión diferente por cada solicitud recibida de la capa de sesión, pero puede haber razones de costo que aconsejen multiplexar diferentes conexiones en la capa de sesión sobre una sola conexión en la capa de red o, inversamente, razones de rendimiento pueden requerir que una conexión solicitada por la capa de sesión sea atendida por varias conexiones en la capa de red; en ambos casos la capa de transporte se ocupará de hacer la multiplexación mas adecuada de forma transparente a la capa de sesión.

La capa de transporte establece el tipo de servicio que recibe la capa de sesión, y en último extremo los usuarios. Éste podría ser por ejemplo un servicio libre de errores que entrega los mensajes en el mismo orden en que se envían; también podría ser un servicio de datagramas, es decir, mensajes independientes sin garantía en cuanto al orden de entrega ni confirmación de la misma, o un servicio broadcast o multicast en que los paquetes se distribuyen a múltiples destinos simultáneamente.

El control de flujo, que ha aparecido en capas anteriores, es necesario también en la capa de transporte para asegurar que un host rápido no satura a uno lento. La capa de transporte realiza también su propio control de errores, que resulta ahora esencial pues algunos protocolos modernos como Frame Relay o ATM han reducido o suprimido totalmente el control de errores de las capas inferiores, ya que con las mejoras en la tecnología de transmisión de datos éstos son menos frecuentes y se considera mas adecuado realizar esta tarea en el nivel de transporte.

Salvo el caso de transmisiones multicast o broadcast el nivel de transporte se ocupa siempre de una comunicación entre dos entidades, lo cual le asemeja en cierto sentido al nivel de enlace. Por esto existen grandes similitudes entre ambas capas en cuestiones tales como el control de errores o control de flujo.

Ejemplos de protocolos de transporte incluyen el CCITT X.224, también llamado protocolo de transporte OSI TP4 (Transport Protocol 4). En Internet existen dos protocolos de transporte: TCP y UDP.

1.4.1.5 La capa de sesión

La capa de sesión es la primera que es accesible al usuario, y es su interfaz más básica con la red. Por ejemplo, mediante los servicios de la capa de sesión un usuario podría establecer una conexión como terminal remoto de otro ordenador. En un sistema multiusuario la capa de sesión se ocupa de ofrecer un SAP a cada usuario para acceder al nivel de transporte.

1.4.1.6 La capa de presentación

Hasta aquí nos hemos preocupado únicamente de intercambiar bits (o bytes) entre dos usuarios ubicados en dos ordenadores diferentes. Lo hemos hecho de manera fiable y entregando los datos a la sesión, es decir al usuario, pero sin tomar en cuenta el significado de los bits transportados. La capa de presentación se ocupa de realizar las conversiones necesarias para asegurar que dichos bits se presentan al usuario de la forma esperada. Por ejemplo, si se envía información alfanumérica de un ordenador ASCII a uno EBCDIC será preciso efectuar una conversión, o de lo contrario los datos no serán interpretados correctamente. Lo mismo podríamos decir de la transferencia de datos enteros, flotantes, etc. cuando la representación de los datos difiere en los ordenadores utilizados.

1.4.1.7 La capa de aplicación

La capa de aplicación comprende los servicios que el usuario final está acostumbrado a utilizar en una red telemática, por lo que a menudo los protocolos de la capa de aplicación se denominan *servicios*. Dado que se crean continuamente nuevos servicios, existen muchos protocolos para la capa de aplicación, uno o más por cada tipo de servicio.

Ejemplos de protocolos estándar de la capa de aplicación son el X.400 o X.500 de la ITU, los protocolos SMTP, FTP y HTTP de Internet, etc.

1.4.1.8 Transmisión de datos en el modelo OSI

La transmisión de datos en el modelo OSI se realiza de forma análoga a lo ya descrito para el modelo de capas. La capa de aplicación recibe los datos del usuario y les añade una cabecera (que denominamos cabecera de aplicación), constituyendo así la PDU (Protocol Data Unit) de la capa de aplicación. La cabecera contiene información de control propia del protocolo en cuestión. La PDU es transferida a la capa de aplicación en el nodo de destino, la cual recibe la PDU y elimina la cabecera entregando los datos

al usuario. En realidad la PDU no es entregada directamente a la capa de aplicación en el nodo de destino, sino que es transferida a la capa de presentación en el nodo local a través de la interfaz; esto es una cuestión secundaria para la capa de aplicación, que ve a la capa de presentación como el instrumento que le permite hablar con su homóloga en el otro lado.

A su vez la capa de presentación recibe la PDU de la capa de aplicación y le añade una cabecera propia, (cabecera de presentación) creando la PDU de la capa de presentación. Esta PDU es transferida a la capa de presentación en el nodo remoto usando a la capa de sesión como instrumento para la comunicación, de manera análoga a lo ya descrito para la capa de aplicación.

En el caso mas general cada capa añade una cabecera propia a los datos recibidos de la capa superior, y construye así su PDU. La capa homóloga del nodo de destino se ocupará de extraer dicha cabecera, interpretarla, y entregar la PDU correspondiente a la capa superior. En algunos casos la cabecera puede no existir. En el caso particular de la capa de enlace además de la cabecera añade una cola al construir la PDU (trama) que entrega a la capa física.

Volviendo por un momento a nuestra analogía de los dos ejecutivos que intercambian un documento, vemos que a medida que vamos descendiendo capas en el envío (jefe, secretaria, motorista, líneas aéreas) el documento va recibiendo nuevos envoltorios que contienen a los anteriores. A la llegada el paquete es procesado de forma *simétrica*, es decir se le va quitando en cada capa el envoltorio correspondiente antes de pasarlo a la siguiente.

1.4.2 El modelo de referencia TCP/IP

En 1969 la agencia ARPA (Advanced Research Projects Agency) del Departamento de Defensa (DoD, Department of Defense) de los Estados Unidos inició un proyecto de interconexión de ordenadores mediante redes telefónicas. Al ser un proyecto desarrollado por militares en plena guerra fría un principio básico de diseño era que la red debía poder resistir la destrucción de parte de su infraestructura (por ejemplo a causa de un ataque nuclear), de forma que dos nodos cualesquiera pudieran seguir comunicados siempre que hubiera alguna ruta que los uniera. Esto se consiguió en 1972 creando una red de conmutación de paquetes denominada ARPAnet, la primera de este tipo que operó en el mundo. La conmutación de paquetes unida al uso de topologías malladas mediante múltiples líneas punto a punto dio como resultado una red altamente fiable y robusta.

La ARPAnet fue creciendo paulatinamente, y pronto se hicieron experimentos utilizando otros medios de transmisión de datos, en particular enlaces por radio y vía satélite; los protocolos existentes tuvieron problemas para interoperar con estas redes, por lo que se diseñó un nuevo conjunto o pila de protocolos, y con ellos una arquitectura. Este nuevo conjunto se denominó TCP/IP (Transmission Control Protocol/Internet Protocol) nombre que provenía de los dos protocolos más importantes que componían la pila; la nueva arquitectura se llamó sencillamente *modelo TCP/IP*, los nuevos protocolos fueron especificados por vez primera por Cerf y Kahn en un artículo publicado en 1974. A la nueva red, que se creó como consecuencia de la fusión de ARPAnet con las redes basadas en otras tecnologías de transmisión, se la denominó Internet.

La aproximación adoptada por los diseñadores del TCP/IP fue mucho más pragmática que la de los autores del modelo OSI. Mientras que en el caso de OSI se emplearon varios años en definir con sumo cuidado una arquitectura de capas donde la función y servicios de cada una estaban perfectamente definidas, y solo después se planteó desarrollar los protocolos para cada una de ellas, en el caso de TCP/IP la operación fue a la inversa; primero se especificaron los protocolos, y luego se definió el modelo como una simple descripción de los protocolos ya existentes. Por este motivo el modelo TCP/IP es mucho más simple que el OSI. También por este motivo el modelo OSI se utiliza a menudo para describir otras arquitecturas, como por ejemplo la TCP/IP, mientras que el modelo TCP/IP nunca suele emplearse para describir otras arquitecturas que no sean la suya propia.

En el modelo TCP/IP se pueden distinguir cuatro capas:

- La capa host-red
- La capa internet
- La capa de transporte
- La capa de aplicación

Pasemos a describirlas brevemente.

1.4.2.1 La capa host-red

Esta capa engloba realmente las funciones de la capa física y la capa de enlace del modelo OSI. El modelo TCP/IP no dice gran cosa respecto a ella, salvo que debe ser capaz de conectar el host a la red por medio de algún protocolo que permita enviar paquetes IP. Podríamos decir que para el modelo TCP/IP esta capa se comporta como una 'caja negra'. Cuando surge una nueva tecnología de red (por ejemplo ATM) una de las primeras cosas que aparece es un estándar que especifica de que forma se pueden enviar sobre ella paquetes IP; a partir de ahí la capa internet ya puede utilizar esa tecnología de manera transparente.

1.4.2.2 La capa internet

Esta capa es el 'corazón' de la red. Su papel equivale al desempeñado por la capa de red en el modelo OSI, es decir, se ocupa de encaminar los paquetes de la forma más conveniente para que lleguen a su destino, y de evitar que se produzcan situaciones de congestión en los nodos intermedios. Debido a los requisitos de robustez impuestos en el diseño, la capa internet da únicamente un servicio de conmutación de paquetes no orientado a conexión. Los paquetes pueden llegar desordenados a su destino, en cuyo caso es responsabilidad de las capas superiores en el nodo receptor la reordenación para que sean presentados al usuario de forma adecuada.

A diferencia de lo que ocurre en el modelo OSI, donde los protocolos para nada intervienen en la descripción del modelo, la capa internet define aquí un formato de paquete y un protocolo, llamado IP (Internet Protocol), que se considera el protocolo 'oficial' de la arquitectura.

1.4.2.3 La capa de transporte

Esta capa recibe el mismo nombre y desarrolla la misma función que la cuarta capa del modelo OSI, consistente en permitir la comunicación extremo a extremo (host a host) en la red. Aquí se definen dos protocolos: el TCP (Transmission Control Protocol) ofrece un servicio CONS fiable, con lo que los paquetes (aquí llamados segmentos) llegan ordenados y sin errores. TCP se ocupa también del control de flujo extremo a extremo, para evitar que por ejemplo un host rápido sature a un receptor más lento. Ejemplos de protocolos de aplicación que utilizan TCP son el SMTP (Simple Mail Transfer Program, correo electrónico) y el FTP (File Transfer Protocol).

El otro protocolo de transporte es UDP (User Datagram Protocol) que da un servicio CLNS, no fiable. UDP no realiza control de errores ni de flujo. Una aplicación típica donde se utiliza UDP es la transmisión de voz y vídeo en tiempo real; aquí el retardo que introduciría el control de errores produciría más daño que beneficio: es preferible perder algún paquete que retransmitirlo fuera de tiempo. Otro ejemplo de aplicación que utiliza UDP es el NFS (Network File System); aquí el control de errores y de flujo se realiza en la capa de aplicación.

1.4.2.4 La capa de aplicación

Esta capa desarrolla las funciones de las capas de sesión, presentación y aplicación del modelo OSI. La experiencia ha demostrado que las capas de sesión y presentación son de poca utilidad, debido a su escaso contenido, por lo que la aproximación adoptada por el modelo TCP/IP parece mas acertada.

La capa de aplicación contiene todos los protocolos de alto nivel que se utilizan para ofrecer servicios a los usuarios. Entre estos podemos mencionar tanto los ‘tradicionales’, que existen desde que se creó el TCP/IP: terminal virtual (TelNet), transferencia de ficheros (FTP), correo electrónico (SMTP) y servidor de nombres (DNS), como los mas recientes, como el servicio de news (NNTP), el Web (HTTP), el Gopher, etc.

1.4.3 Comparación de los modelos OSI y TCP/IP

Como ya hemos comentado, la génesis del modelo OSI y TCP/IP fue muy diferente. En el caso de OSI primero fue el modelo y después los protocolos, mientras que en TCP/IP el orden fue inverso. Como consecuencia de esto el modelo OSI es mas elegante y esta menos condicionado por ningún protocolo en particular, y se utiliza profusamente como modelo de referencia para explicar todo tipo de redes. El modelo OSI hace una distinción muy clara entre servicios, interfaces y protocolos, conceptos que a menudo se confunden en el modelo TCP/IP. Podríamos decir que la arquitectura (o el modelo) OSI es mas modular y académico que el TCP/IP.

Pero este mayor nivel de abstracción también tiene sus inconvenientes. Los diseñadores del modelo OSI no tenían experiencia práctica aplicando su modelo para desarrollar protocolos y olvidaron algunas funcionalidades importantes. Por ejemplo, las redes broadcast no fueron previstas inicialmente en la capa de enlace, por lo que se tuvo que insertar a la fuerza la subcapa MAC para incluirlas. Otro problema era que no se había previsto la interconexión de redes diferentes, cosa que fue como ya hemos visto el *alma mater* del modelo TCP/IP.

El modelo OSI tiene siete capas, mientras que el modelo TCP/IP sólo tiene cuatro. Aunque es desafortunada la fusión de la capa física y la de enlace en una oscura capa host-red, la fusión de las capas de sesión, presentación y aplicación en una sola en el modelo TCP/IP es claramente mas lógica que la del modelo OSI.

Otra diferencia fundamental estriba en los servicios orientados a conexión (CONS) o no orientados a conexión (CLNS). El modelo OSI soporta ambos modos en la capa de red, pero sólo el modo CONS en la capa de transporte, que es la que percibe el usuario. El modelo TCP/IP en cambio soporta solo CLNS en la capa de red, pero ambos en la de transporte. Quizá un sutil detalle pueda explicar esta diferencia: el servicio CONS a nivel de red hace mucho mas sencillo facturar por tiempo de conexión, cosa a la que están muy acostumbradas las compañías telefónicas, que son las que han participado activamente en los comités técnicos de ISO que diseñaron el modelo OSI.

En la práctica los protocolos basados en las normas estándar OSI definidas por la ISO nunca llegaron a tener gran relevancia a nivel mundial, a pesar de que la mayoría de los grandes fabricantes de ordenadores y compañías telefónicas impulsaron su utilización ofreciendo productos y servicios basados en ellos. Las razones principales que motivaron este fenómeno las podemos resumir en los siguientes puntos:

- Momento inadecuado: Para cuando estaban disponibles productos comerciales basados en protocolos OSI (finales de los ochenta) ya estaban ampliamente difundidos los productos basados en los protocolos TCP/IP; esto era especialmente cierto en entornos académicos (universidades y centros de investigación), que aunque económicamente no eran los mejor dotados sí tenían las mayores redes a nivel mundial.
- Tecnología inapropiada: como ya hemos comentado la elección del modelo de siete capas para el protocolo OSI era algo forzada. Una de las razones que llevaron a elegir este número de capas era que coincidía con el del modelo SNA de IBM, que dominaba el mercado de la informática por aquel entonces; los autores del modelo OSI creían que aproximándose a SNA tenían mayores posibilidades de éxito. La complejidad de la arquitectura OSI (análogamente a la SNA) es considerable, y en muchos aspectos difícil de traducir en programas.
- Implementaciones inadecuadas: en parte como consecuencia de su complejidad, los productos comerciales que aparecían basados en los protocolos OSI eran muy caros y poco fiables. Esto creó un círculo vicioso, ya que al ser caros los usuarios no los compraban, y al no usarse en condiciones reales los nuevos productos no se depuraban; además, las empresas fabricantes tenían que mantener un alto precio del software OSI para compensar los elevados costos de

desarrollo y mantenimiento. Como contraste una de las primeras implementaciones de TCP/IP formaba parte del UNIX de Berkeley, era muy buena y además se distribuía gratuitamente. No es extraño pues que rápidamente se asociara OSI con baja calidad, complejidad y costos elevados.

- Mala política: el desarrollo de OSI era patrocinado principalmente por la ISO, las PTTs europeas, la Comunidad Europea y los gobiernos de sus países miembros; las decisiones eran fruto de multitud de reuniones de los diversos comités y grupos de trabajo, y en ocasiones se tomaban en consideración no sólo aspectos técnicos sino también políticos, buscando el compromiso entre sus miembros. Por el contrario el desarrollo de TCP/IP seguía un curso mucho más improvisado e informal, cualquier persona podía (y puede) proponer un nuevo protocolo para su estandarización independientemente de su nacionalidad, prestigio o situación laboral. Haciendo una simplificación podríamos decir que OSI funcionaba como una 'democracia parlamentaria' (similar a un gobierno moderno), mientras que TCP/IP era más similar a una ONG, o a un movimiento alternativo; esto se reflejaba incluso en la indumentaria utilizada por uno y otro colectivo. No es de extrañar que en entornos académicos (de nuevo recordemos los más avanzados en redes globales) se viera con mucha más simpatía el mecanismo de estandarización del TCP/IP que el de OSI.

Aunque por la exposición anterior pueda parecer lo contrario, también existen aspectos negativos en los protocolos TCP/IP. Por un lado no se distinguen claramente los conceptos de servicio, interfaz y protocolo. En segundo lugar, el 'modelo' TCP/IP fue diseñado con posterioridad al protocolo, intentando imitar la labor de síntesis que se había hecho en el modelo OSI (podríamos decir que es como si se hubieran cortado los patrones después de cosido el traje). En tercero esta la 'caja negra' que hemos llamado capa host-red y que en el modelo TCP/IP es mas bien una interfaz que una capa, ya que lo único que se especifica de ella es que ha de ser capaz de transmitir paquetes IP. Como consecuencia de esto el modelo TCP/IP no distingue entre la capa física y la de enlace, ya que ambas entran en la 'capa' host-red.

Por otro lado, aun cuando los protocolos IP y TCP fueron diseñados concienzudamente y bien implementados, algunos protocolos, especialmente del nivel de aplicación, fueron el resultado de una improvisación para resolver un problema concreto; como las implementaciones se distribuían después de forma gratuita se extendían con rapidez por lo que resultaban difíciles de sustituir; un ejemplo de esto lo tenemos en el protocolo TelNet que se utiliza ampliamente a pesar de no tener soporte para interfaz gráfica, ratón, etc.

Durante la década de los ochenta en Europa las redes académicas de la mayoría de los países (incluido España) utilizaban protocolos OSI por imposición de los respectivos gobiernos y de la Comunidad Europea; a la vista de los problemas ya mencionados de los productos OSI, y la extensión y buen resultado de los protocolos TCP/IP, se empezaron a ofrecer en 1991 servicios basados en TCP/IP, lo cual provocó su inmediata difusión por toda Europa y el estancamiento y casi desaparición de los servicios basados en protocolos OSI.

Probablemente el único protocolo OSI que sobrevivirá la batalla contra TCP/IP será el X.500, protocolo a de aplicación que implementa los servicios de directorio. Estos estaban cubiertos en TCP/IP por un servicio denominado Whois de funcionalidad mucho mas pobre. Probablemente es el hecho de no haber una alternativa en TCP/IP lo que ha salvado a X.500, que actualmente funciona sobre TCP/IP.

Consecuentemente con los puntos fuertes y débiles de cada modelo y protocolo, en el curso nos basaremos en una versión modificada del modelo OSI, del cual hemos suprimido la capa de sesión y la de presentación. Sin embargo utilizaremos este modelo para describir fundamentalmente protocolos TCP/IP, si bien también hablaremos de otros mas modernos y que en muchos casos se utilizan como medio de transporte para TCP/IP. En la tabla siguiente hacemos un resumen del modelo y los protocolos más comunes de cada capa.

Capa	Protocolo
Aplicación	TCP/IP (DNS, SMTP, SNMP, NNTP, HTTP)
Transporte	TCP/IP (TCP, UDP) ATM (AAL1, AAL2, AAL3/4, AAL5)
Red	TCP/IP (IP, ICMP, ARP, RARP, OSPF, BGP, IPv6), ATM (Q2931)
Enlace	ISO(HDLC), TCP/IP (SLIP, PPP), ATM, LANs
Física	N-ISDN, B-ISDN (ATM), GSM, SONET/SDH, LANs Cable coaxial, cable UTP, fibra óptica, microondas, radioenlaces, satélite

Tabla 1.1.- Ejemplos de protocolos en cada uno de los niveles del modelo de red OSI-TCP/IP

1.5 TRANSMISIÓN DE DATOS EN REDES WAN

Dado que cualquier usuario puede solicitar un acceso a las redes que operan las compañías telefónicas, a éstas se las denomina redes públicas de datos (PDN, Public Data Networks). Cuando se desea interconectar ordenadores o redes locales ubicadas a cierta distancia es preciso normalmente utilizar los servicios de alguna de esas redes públicas. Dichos servicios pueden clasificarse de acuerdo con el tipo de conexión que ofrecen, permanente o temporal, y con el tipo de circuito, real o virtual. Esquemáticamente sería:

Tipo de circuito	Tipo de conexión	
	Permanente	Temporal
Real	Líneas dedicadas	Redes de conmutación de circuitos (RTB, RDSI, GSM)
Virtual	Redes de conmutación con PVCs (X.25, Frame Relay, ATM)	Redes de conmutación con SVCs (X.25, Frame Relay, ATM)

Tabla 1.2.- Clasificación de los tipos de servicio de transmisión de datos por líneas telefónicas según el tipo de circuito y conexión.

En la práctica suele utilizarse en cada caso el servicio más conveniente por sus prestaciones y precio, por lo que las redes suelen mezclar varios de los servicios que hemos mencionado. Vamos a dar una pequeña descripción de cada uno de ellos.

1.5.1 Líneas dedicadas

La solución mas simple para una red es el circuito real permanente, constituido por lo que se conoce como *líneas dedicadas o líneas alquiladas (leased lines* en inglés); está formado por un enlace punto a punto permanente entre los ordenadores o routers que se desean unir. Una línea dedicada es únicamente un medio de transmisión de datos a nivel físico, todos los protocolos de niveles superiores han de ser suministrados por el usuario.

La red ARPAnet que hemos visto anteriormente se constituyó mediante líneas dedicadas. La Internet incorpora actualmente todos los servicios que hemos mencionado.

Normalmente no es posible contratar una línea dedicada de una velocidad arbitraria, existen unas velocidades prefijadas que son las que suelen ofrecer las compañías telefónicas y que tienen su origen en la propia naturaleza del sistema telefónico, como veremos más adelante. Por ejemplo Telefónica de España ofrece líneas dedicadas de las siguientes velocidades: 9,6, 64, 128, 192, 256, 512 y 2.048 Kb/s. El precio de una línea dedicada es una cuota fija mensual que depende de la velocidad y de la distancia entre los dos puntos que se unen. La cuota es independiente del uso (corresponde por tanto con lo que se conoce como 'tarifa plana').

En las líneas dedicadas la capacidad contratada está reservada de forma permanente en todo el trayecto. Su costo es elevado y por tanto su instalación generalmente sólo se justifica cuando el uso es elevado (al menos tres o cuatro horas al día). Por este motivo las líneas dedicadas no suelen utilizarse en casos en que se necesita una conexión esporádica, por ejemplo una oficina que requiere conectarse unos minutos al final del día para transferir unos ficheros, o un usuario doméstico que se conecta a Internet en los ratos de ocio.

Para mostrar el elevado consumo de recursos que representan las líneas dedicadas pondremos un ejemplo: supongamos que la empresa X con sede central en Valencia ha abierto treinta sucursales en distintos puntos de España, y necesita que los ordenadores de las sucursales comuniquen con la sede central todos los días durante treinta minutos cada uno para transferir 2 MBytes de información. Para esto la empresa solicita 30 líneas dedicadas de 64 Kb/s a la compañía telefónica, constituyendo una red con topología de estrella. Aunque cada línea se utiliza únicamente el 2% del tiempo ($0,5/24$) con una eficiencia del 14% ($2 \text{ MB} * 8 / (0,064 * 30 * 60)$) el ancho de banda está reservado en su totalidad de forma permanente. Además, se requieren treinta interfaces físicas en el servidor, lo cual encarece y complica bastante la red.

1.5.2 Conmutación de circuitos

La *conmutación de circuitos* supone una utilización más óptima de los recursos que las líneas dedicadas, ya que la conexión extremo a extremo sólo se establece durante el tiempo necesario. Para la transmisión de datos mediante conmutación de circuitos se utiliza la misma red que para la transmisión de la voz, mediante módems o adaptadores apropiados. Genéricamente se la denomina Red Telefónica Conmutada (RTC) o PSTN (Public Switched Telephone Network) y comprende en realidad tres redes diferentes:

La Red de Telefonía Básica (RTB) también llamada POTS (Plain Old Telephone Service); Está formada por las líneas analógicas tradicionales y por tanto requiere el uso de módems; la máxima velocidad que puede obtenerse en este tipo de enlaces es de 33.6 Kb/s, salvo el caso en que la transmisión se origine en un acceso RDSI, en cuyo caso puede obtenerse una velocidad máxima de 56 Kb/s.

La Red Digital de Servicios Integrados (RDSI) también llamada ISDN (Integrated Services Digital Network). Está formada por enlaces digitales hasta el bucle de abonado, por lo que el circuito es digital de extremo a extremo. La velocidad por circuito (también llamado canal) es de 64 Kb/s, pudiendo con relativa facilidad agregarse varios canales en una misma comunicación para obtener mayor ancho de banda.

La Red GSM (Global System for Mobile communications). Se trata de conexiones digitales, como en el caso de la RDSI, pero por radioenlaces. La capacidad máxima de un circuito GSM cuando se transmiten datos es de 9.6 Kb/s.

La RDSI apareció en España hacia 1994, y la red GSM hacia 1995. Dado que hasta fechas recientes el único sistema de RTC era la RTB a menudo se utilizan ambos términos indistintamente para indicar la red telefónica analógica. Para evitar confusiones conviene usar el término RTB al referirse a la red telefónica analógica, y reservar el término RTC para referirnos al conjunto de todas las redes conmutadas existentes, ahora o en el futuro.

En el caso de la RTC cualquier par de usuarios puede comunicar entre sí siempre que conozca su dirección o número de teléfono, por lo que podemos ver la RTC como una gran nube a la que se conectan multitud de usuarios. Una vez establecido un circuito entre dos abonados la función que desempeña para los protocolos de nivel superior es equivalente a la de una línea dedicada.

Telefónica de España dispone de los tres tipos de RTC (RTB, RDSI y GSM), con tarificación por tiempo de conexión. En el caso de RTB y RDSI se aplica una tarificación con cuatro ámbitos: metropolitano, provincial, nacional e internacional (éste último depende del país). En el caso de la red GSM (conocida como Movistar) hay sólo dos ámbitos: nacional e internacional. También existen servicios GSM ofrecidos por Airtel y Retevisión (Amena).

Es posible la interconexión entre ordenadores de redes diferentes (RDSI, RTB o GSM); en cuyo caso la velocidad de transmisión será igual a la más lenta de las conexiones implicadas; en algunos casos puede ser necesario disponer de equipos específicos o contratar servicios especiales.

Siguiendo con nuestro ejemplo anterior de la empresa X, en vez de líneas dedicadas se podría haber utilizado la red telefónica conmutada (por ejemplo la RDSI). En este caso el costo de cada conexión es normalmente menor, ya que sólo se paga por el tiempo que se está utilizando. Además, la sede central podría contratar menos de treinta enlaces si se planifica un horario escalonado de conexión de las sucursales, o si simplemente se considera que la probabilidad de que todas llamen a la vez es muy reducida. Esto se conoce como *sobresuscripción* ('oversubscription') o *sobrerreserva* ('overbooking') y es algo muy normal en redes cuando el número de usuarios es razonablemente elevado y se puede jugar con el factor estadístico (es algo similar a lo que hacen las compañías aéreas con los billetes de avión). Por ejemplo, supongamos que inicialmente la sede central contrata diez accesos y observa que solo durante el 0,1% del tiempo están todos utilizados; entonces se puede afirmar que el servicio tiene una disponibilidad del 99,9%, es decir, el 99,9% del tiempo hay líneas libres para recibir llamadas de las sucursales; a la vista de esto la empresa puede decidir si aumenta o reduce el número de accesos, según la disponibilidad que se quiera tener y el costo de cada acceso (aquí además del costo de la compañía telefónica se deberá tener en cuenta el de interfaces, módems, equipo auxiliar, etc.).

1.5.3 Conmutación de paquetes

Con la conmutación de circuitos hemos avanzado en el aprovechamiento de la infraestructura. Sin embargo nos encontramos aún con tres inconvenientes:

En ocasiones no podremos establecer la conexión por no haber circuitos libres, salvo que contratemos un número de circuitos igual al máximo número posible de conexiones simultáneas, lo cual sería muy costoso.

Que un circuito se esté utilizando no garantiza que se esté aprovechando el ancho de banda que tiene asignado; en nuestro ejemplo cada sucursal está conectada 30 minutos para enviar 2 MBytes de información, que cual supone un aprovechamiento del 14% suponiendo que se trata de conexiones de 64 Kb/s.

El servidor ha de tener una conexión física por cada circuito, aun cuando la ocupación media sea reducida.

Para evitar estos inconvenientes se crearon redes en las que el usuario puede mantener una única conexión física a la red, y sobre ella varios *circuitos virtuales* con equipos remotos. De esta forma podemos dotar a nuestro ordenador central de treinta circuitos virtuales, con lo que las sucursales siempre van a encontrar un circuito libre sobre el cual establecer la conexión. Al mantener un solo enlace físico el costo de las interfaces, módems, etc., es fijo e independiente del número de circuitos virtuales utilizados. Lógicamente al tener el ordenador central que atender a todas las conexiones por el mismo enlace físico sería conveniente (aunque no necesario) incrementar la velocidad de este; en nuestro ejemplo con conexiones el 2% del tiempo y con un tráfico medio del 14%; para las 30 oficinas agregadas nos daría una ocupación media del 8,4% ($0.02 \times 0.14 \times 30$) suponiendo un reparto homogéneo, cosa poco probable. Como previsiblemente muchas oficinas querrán conectar más o menos a la misma hora sería conveniente ampliar el enlace del servidor a 128 o 256 Kb/s por ejemplo para evitar congestión en horas punta.

Para poder definir circuitos virtuales es preciso disponer de equipos inteligentes en la red que puedan hacer la distribución de los paquetes en función de su destino. Por esto a las redes que permiten crear circuitos virtuales se las denomina redes de *conmutación de paquetes*, y en cierto sentido podemos considerarlas como la evolución de las redes de conmutación de circuitos. Existen dos tipos de redes de conmutación de paquetes, según ofrezcan servicios orientados a conexión o no orientados a conexión (envío de datagramas). La primera red de conmutación de paquetes que existió fue como ya hemos visto ARPAnet, pero como no era orientada a conexión no se adaptaba bien a un servicio de compañía telefónica. Para facilitar la facturación las redes públicas de conmutación de paquetes suelen ofrecer servicios orientados a conexión en el nivel de red. Actualmente hay tres tipos de redes públicas de conmutación de paquetes orientadas a conexión estandarizadas: X.25, Frame Relay y ATM. Las tres representan implementaciones bastante completas de los tres primeros niveles del Modelo de Referencia OSI, y tienen muchos puntos en común, según veremos a continuación.

La subred de una red de conmutación de paquetes se constituye mediante conmutadores unidos entre sí por líneas dedicadas. La distribución de los conmutadores y la forma como éstos se interconectan, es decir la topología de la red, es algo que decide el proveedor del servicio y que fija la carga máxima que la red podrá soportar en lo que se refiere a tráfico entre conmutadores; la topología fija también la fiabilidad de la red, es decir cuan resistente será a fallos; por ejemplo una red muy mallada será muy fiable y tendrá una gran disponibilidad, ya que en caso de avería de un enlace o conmutador será fácil encontrar un camino alternativo. Cuando un usuario desea conectar un equipo a la red el acceso se hace normalmente mediante una línea dedicada entre el equipo a conectar y el conmutador mas próximo del proveedor de servicio. La velocidad de la conexión entre el equipo y el conmutador establece de entrada un máximo a las prestaciones que ese usuario podrá obtener de la red. Puede haber además otras limitaciones impuestas por la capacidad de la red, por saturación o porque se hayan impuesto limitaciones de acuerdo con lo contratado por el usuario con el proveedor del servicio.

Aunque estamos considerando el caso en que la red de conmutación de paquetes la gestiona una compañía Telefónica (con lo que tenemos una red pública de conmutación de paquetes), también es posible que una organización o conjunto de organizaciones (por ejemplo una gran empresa, una administración o un conjunto de universidades) establezcan una red privada basada en X.25, Frame Relay o ATM. En este caso normalmente la gestión de la red se asigna a algún grupo especializado (por ejemplo el departamento de comunicaciones en el caso de la empresa) que se ocupa de diseñar topología, solicitar los enlaces correspondientes, instalar los conmutadores, etc. Si se desea que la red privada esté interconectada con la red pública es preciso prever que al menos uno de los conmutadores de la red privada esté conectado con la red pública. Desde el punto de vista técnico ambas redes son equivalentes en su funcionamiento, salvo que normalmente en una red privada no se tarifica la utilización, por lo que el control de su utilización no es tan crítico.

En X.25, Frame Relay y ATM existe el concepto de circuito virtual (VC), que puede ser de dos tipos: conmutado o SVC (Switched Virtual Circuit) y permanente o PVC (Permanent Virtual Circuit). El conmutado se establece y termina a petición del usuario, mientras que el permanente tiene que ser definido por el proveedor del servicio, mediante configuración en los conmutadores a los que se conectan los equipos implicados, normalmente mediante modificación contractual con el cliente. En cierto modo podemos considerar los PVCs como 'líneas dedicadas virtuales' mientras que los SVCs son como conexiones RTC 'virtuales'.

1.5.3.1 X.25

X.25 fue el primer protocolo estándar de red de datos pública. Se definió por primera vez en 1976 por el CCITT (Comité Consultatif International Télégraphique and Téléphonique). Aunque el protocolo ha sido revisado múltiples veces (la última en 1993) ya se ha quedado algo anticuado y no es en la actualidad un servicio interesante en general, debido a su baja eficiencia y velocidad; normalmente no supera los 64 Kb/s, aunque se pueden contratar conexiones de hasta 2.048 Kb/s. A pesar de estas desventajas conviene conocer los aspectos básicos de X.25 pues aun existe una gran cantidad de usuarios de este tipo de redes. Además, en el protocolo X.25 se definieron por primera vez muchos de los conceptos en que se basa Frame Relay y ATM, que podemos considerar en cierto sentido como el X.25 versión 2 y versión 3, respectivamente. El conjunto de estándares que definen X.25 ha sido adoptado como parte del modelo OSI para los tres primeros niveles.

X.25 es un servicio fiable orientado a conexión; los paquetes llegan en el mismo orden con que han salido. Una vez establecido un circuito entre dos NSAPs la información se transfiere en paquetes que pueden ser de hasta 128 bytes (aunque en muchas redes se permiten tamaños de hasta 4 KBytes). En la red los paquetes son transferidos de cada conmutador al siguiente por la técnica de almacenamiento y reenvío y solo son borrados cuando se recibe la notificación de recepción; es necesario que se produzca una confirmación de la correcta recepción del paquete en cada salto que éste realiza en la red. Un mismo NSAP puede tener establecidos varios VCs (PVCs y/o SVCs) hacia el mismo o diferentes destinos.

A nivel físico se definen en X.25 dos interfaces, la X.21 cuando se usa señalización digital (cosa poco habitual) y la X.21bis (un subconjunto de la EIA-232D/V.24) cuando es analógica.

A nivel de enlace se utiliza un protocolo llamado LAP-B (Link Access Procedure-Balanced) que es una versión modificada del estándar ISO HDLC (High-level Data Link Control), que veremos en detalle al estudiar la capa de enlace.

El protocolo utilizado a nivel de red se conoce como X.25 PLP (Packet Layer Protocol). En este nivel se realizan todas las funciones de control de flujo, confirmación y direccionamiento. Cada NSAP (Network Services Access Point) en una red X.25 viene representado por una interfaz de un conmutador X.25, y tiene una dirección única. Las direcciones son numéricas y típicamente pueden tener entre nueve y quince dígitos. Las redes X.25 públicas de muchos países están interconectadas, como ocurre con las redes telefónicas. Para facilitar su direccionamiento la CCITT ha establecido un sistema jerárquico análogo al sistema telefónico en la recomendación X.121; así es posible por ejemplo llamar desde Iberpac (la red X.25 pública española) a una dirección de Transpac (la red pública X.25 francesa), sin más que añadir el prefijo correspondiente a dicha red en la dirección de destino.

Los ordenadores que se conectan a un conmutador X.25 necesitan tener la capacidad suficiente para procesar los complejos protocolos X.25. Cuando se definió el estándar X.25 los ordenadores personales eran caros y poco potentes; muchos usuarios que tenían necesidad de conectarse a redes X.25 no disponían de un ordenador adecuado. Para estos casos se diseñó un equipo capaz de conectar un terminal asíncrono, que trabaja en modo carácter (es decir, un paquete por carácter) a una red X.25. A dicho equipo se le denominó PAD (Packet Assembler Disassembler) ya que se ocupaba de ensamblar y desensamblar los paquetes X.25 que recibía. A través de un PAD un usuario de un PC, o incluso de un terminal 'tonto', podía conectarse a un host en una red X.25 y trabajar como un terminal remoto de aquel. La CCITT publicó tres documentos para especificar todo lo relacionado con el funcionamiento de un PAD: el X.3 describe las funciones propias del PAD, el X.28 define el protocolo de comunicación entre el PAD y el terminal asíncrono, y el X.29 define el protocolo entre el PAD y la red X.25. El uso conjunto de estos tres protocolos permite iniciar una sesión interactiva desde un terminal conectado a un PAD con un ordenador remoto, por lo que se le conoce como el logon remoto XXX. Cuando un usuario en un ordenador conectado a X.25 desea establecer una conexión como terminal remoto de otro ordenador a través de una red X.25 lo hace mediante un programa en su ordenador que emula el comportamiento de un PAD (PAD Emulation). El logon remoto XXX ofrece en redes X.25 un servicio equivalente al de Telnet en TCP/IP. Para el caso de usuarios que no dispongan de un PAD propio muchas compañías telefónicas ponen a su disposición un servicio de acceso a PADs por RTC (normalmente RTB). Este servicio se denomina normalmente X.28, por ser este estándar el que define el protocolo de comunicaciones entre el terminal de usuario y el PAD.

El rendimiento que se obtiene de un VC X.25 depende de muchos factores: velocidad de los accesos físicos implicados, número de VC simultáneos, tráfico en cada uno de ellos, carga de la red, infraestructura, etc.

En España Telefónica inició un servicio de red pública de conmutación de paquetes en 1971 con la red RSAN, basada en unos protocolos propios, no estándar. Esta red hoy desaparecida fue la segunda red de conmutación de paquetes del mundo (después de ARPAnet que empezó en 1969), y la primera establecida por un operador de telefonía. En 1984 Telefónica inició la red Iberpac, que ya obedecía a los estándares X.25. A través de Iberpac es posible acceder a más de 200 redes similares en todo el mundo. Las velocidades de acceso a Iberpac pueden ser de 2,4 a 2.048 Kb/s. Es posible contratar PVCs, aunque lo normal es utilizar SVCs. La tarificación se hace por tres conceptos: en primer lugar una cuota fija mensual según la velocidad de la línea de acceso, en segundo por el tiempo que dura cada llamada (o lo que es lo mismo, el tiempo que esta establecido cada SVC), y en tercer lugar por el número de paquetes transferidos por llamada. Para los dos últimos conceptos existen tres ámbitos de tarificación: nacional, europeo e internacional (en X.25 cuesta lo mismo transferir datos entre dos oficinas vecinas que entre Valencia y La Coruña). Telefónica dispone también de un servicio de acceso X.28 a su red Iberpac, conocido como Datex28.

Los protocolos X.25 se diseñaron pensando en los medios de transmisión de los años setenta, líneas de baja velocidad con tasa de errores elevada. El objetivo era aprovechar lo mejor posible las lentas líneas de transmisión existentes, aun a costa de hacer un protocolo de proceso pesado. Por si esto fuera poco, las redes X.25 casi siempre se utilizan para *encapsular* tráfico correspondiente a otros protocolos, por ejemplo TCP/IP, SNA o DECNET (podríamos decir que los paquetes de estos protocolos viajan 'disfrazados' en paquetes X.25); cuando se encapsula un protocolo como TCP/IP en X.25 se realizan de

forma redundante las tareas de la capa de red, con lo que el resultado es aún mas ineficiente. Para resolver este tipo de problemas a partir de 1990 se empezaron a crear redes basadas en Frame Relay.

1.5.3.2 Frame Relay

Frame Relay (que podríamos traducir como *retransmisión de tramas*) nació a partir de los trabajos de estandarización del servicio RDSI, en un intento por crear una versión 'light' de X.25, que permitiera aprovechar las ventajas de los circuitos virtuales pero sin la pérdida de eficiencia que suponían los protocolos excesivamente 'desconfiados' de X.25. En X.25 la capa de enlace y la capa de red eran sumamente complejas; en cambio en Frame Relay ambas se intentaron reducir a su mínima expresión, dejando en manos de los equipos finales toda la labor de acuse de recibo, retransmisión de tramas erróneas y control de flujo; de esta forma Frame Relay se convertía en el complemento perfecto a otros protocolos, tales como TCP/IP. En muchos casos se considera que Frame Relay no es un protocolo a nivel de red sino a nivel de enlace (de ahí su nombre), y aun visto como nivel de enlace resulta bastante ligero.

El servicio que suministra Frame Relay consiste básicamente en identificar el principio y final de cada trama, y detectar errores de transmisión. Si se recibe una trama errónea simplemente se descarta, confiando en que el protocolo de nivel superior de los equipos finales averiguará por sí mismo que se ha perdido una trama y decidirá si quiere recuperarla o si por el contrario prefiere ignorarla. A diferencia de X.25, Frame Relay no tiene control de flujo ni genera acuse de recibo de los paquetes (estas tareas se dejan al nivel de transporte o de aplicación en los equipos finales). El tamaño máximo de los paquetes varía según las implementaciones entre 1 KB y 8 KB. La velocidad de acceso a la red típicamente esta entre 64 y 2.048 Kb/s, aunque también se ha estandarizado la velocidad de 34 Mb/s.

Una novedad importante de Frame Relay estriba en que se define un ancho de banda 'asegurado' para cada circuito virtual mediante un parámetro conocido como CIR (Committed Information Rate). Un segundo parámetro, conocido como EIR (Excess Information Rate) define el margen de tolerancia que se da al usuario, es decir, cuanto se le va a dejar 'pasarse' del CIR contratado. Por ejemplo, supongamos que un ordenador se conecta a una red Frame Relay mediante una línea de acceso a la red de 1.984 Kb/s, y tiene dos circuitos permanentes (PVCs) establecidos con otros dos ordenadores, cada uno de ellos con un CIR de 256 Kb/s y un EIR de 256 Kb/s; en este caso cada circuito tendrá asegurado un ancho de banda de 256 Kb/s como mínimo, y si la red no está saturada podrá llegar a 512 Kb/s; si un circuito intenta utilizar mas de 512 Kb/s el conmutador Frame Relay empezará a descartar tramas. Obsérvese que en este caso la línea de acceso nunca llegaría a saturarse, ya que como mucho podrían enviarse 512 Kb/s por cada circuito. La especificación del CIR para un circuito virtual se hace de forma independiente para cada sentido de la transmisión, y puede hacerse asimétrica, es decir con un valor distinto del CIR para cada sentido.

Cuando un usuario hace uso del EIR (es decir, genera un tráfico superior al CIR contratado en un circuito virtual) el conmutador Frame Relay pone a 1 en las tramas excedentes un bit especial denominado DE (Discard Eligibility). Si se produce congestión en algún punto de la red el conmutador en apuros descartará en primera instancia las tramas con el bit DE marcado, intentando resolver así el problema. Este mecanismo permite a un usuario aprovechar la capacidad sobrante en la red en horas valle sin perjudicar la calidad de servicio a otros usuarios en horas punta, ya que entonces se verá limitado a su CIR. En realidad el CIR tampoco está garantizado, ya que si la congestión no se resuelve descartando las tramas DE el conmutador empezará a descartar tramas normales (no marcadas como DE) que pertenecen a usuarios que no han superado su CIR. Afortunadamente las redes Frame Relay se suelen dimensionar de forma que el CIR de cada usuario esté prácticamente garantizado en todo momento. En cierto modo podemos imaginar el bit DE como equivalente a la 'reserva de asiento' en un billete de tren (el bit a 0 significaría en este caso tener hecha la reserva).

Una red Frame Relay podría utilizarse en vez de líneas dedicadas para interconectar conmutadores X.25; a la inversa (usar una red X.25 para unir entre sí conmutadores Frame Relay) sería mucho más difícil ya que al ser X.25 una red más lenta los retardos introducidos serían apreciados por los usuarios de Frame Relay.

En ocasiones se utilizan redes Frame Relay para transmitir voz digitalizada; esto no es posible con X.25 debido a la lentitud del protocolo, que introduciría unos retardos excesivos; el envío de voz por una red

tiene unos requerimientos especialmente severos en cuanto a retardos para que la transmisión se efectúe correctamente.

La red pública Frame Relay de Telefónica se denomina Red Uno, y esta operativa desde 1992. Aunque Telefónica anunció la disponibilidad de SVCs en Frame Relay para 1997, parece que estos aun no están disponibles y el único servicio contratable es el de PVCs. La tarificación se realiza por dos conceptos: el primero es una cuota fija mensual en función de la velocidad de acceso a la red; el segundo es una cuota fija al mes por cada circuito según el valor de CIR que se tenga contratado; en ambos casos la tarifa depende de la distancia. El EIR no se especifica en el contrato, y por tanto no se paga, pero tampoco se compromete su valor por parte de Telefónica. La velocidad del acceso físico puede tener valores comprendidos entre 64 y 1.984 Kb/s. El CIR puede ser de 0 a 1.984 Kb/s. Al no existir circuitos conmutados la Red Uno no es una red abierta como lo son Iberpac o la RTC. Es posible la conexión internacional con muchas otras redes Frame Relay gracias a acuerdos suscritos con diversos operadores.

1.5.3.3 ATM y B-ISDN

Casi todos los servicios de comunicación que hemos visto hasta ahora fueron diseñados para la transmisión de voz o datos, pero no ambos. La RTB y la red GSM, pensadas para la voz, pueden transmitir datos, pero no están diseñadas para ello y sólo pueden hacerlo a muy bajas velocidades. Las líneas dedicadas y redes Frame Relay, pensadas para datos, pueden transmitir voz si se utilizan los equipos apropiados y se respetan ciertas restricciones.

El único servicio de los que hemos visto hasta ahora que se diseñó pensando en voz y datos es la RDSI (de ahí el nombre de Red Digital de *Servicios Integrados*). Pero la RDSI tiene dos inconvenientes importantes:

Al ser una red de conmutación de circuitos *reales* la reserva del ancho de banda se realiza durante todo el tiempo que está establecida la comunicación, independientemente de que se estén transfiriendo datos o no (o en el caso de transmitir voz independientemente de que se esté hablando o se esté callado).

El estándar RDSI se empezó a definir en 1984. En aquel entonces las líneas dedicadas eran de 9.6 Kb/s en el mejor de los casos y hablar de enlaces a 64 Kb/s parecía algo realmente avanzado; sin embargo el proceso de estandarización tardó mas de lo previsto (cosa que ocurre a menudo) y cuando aparecieron los primeros servicios RDSI diez años más tarde la red 'avanzada' resultaba interesante sólo en entornos domésticos y de pequeñas oficinas; resultando claramente insuficiente para las nuevas aplicaciones.

Una de esas nuevas aplicaciones era el vídeo en movimiento (videoconferencia y vídeo bajo demanda) que tiene unos requerimientos distintos a la voz y los datos. De una forma muy concisa resumimos en la siguiente tabla las características esenciales de cada tipo de tráfico:

Tipo de información	Capacidad	Pérdida tolerable	Retardo	Fluctuación Retardo
Datos	Variable	Muy baja	Alto	Alto
Audio en tiempo real unidireccional (monólogo)	Baja	Baja	Bajo	Muy baja
Audio en tiempo real bidireccional (diálogo)	Baja	Baja	Muy bajo	Muy baja
Vídeo en tiempo real unidireccional	Alta	Media	Bajo	Baja
Vídeo en tiempo real bidireccional (videoconferencia)	Alta	Media	Muy bajo	Baja

Tabla 1.3.- Necesidades de los diversos tipos de tráfico

Cuando una red está preparada para transmitir tanto audio y vídeo como datos informáticos decimos que es una red multimedia. Generalmente el tráfico multimedia tiene unas necesidades muy variables de ancho de banda, se dice que es un tráfico a *ráfagas* ('bursty traffic').

Cuando se tiene tráfico a ráfagas resulta especialmente útil disponer de una red de conmutación de paquetes con circuitos virtuales, ya que de ese modo unos usuarios pueden aprovechar en un determinado instante el ancho de banda sobrante de otros. Sin embargo las redes de este tipo que hemos visto hasta ahora (X.25 y Frame Relay) no son apropiadas para tráfico multimedia porque el retardo y la fluctuación de éste (también llamada 'jitter') son generalmente excesivos (especialmente en X.25) y además resultan impredecibles cuando la red está cargada.

Las compañías telefónicas vienen trabajando desde hace bastante tiempo en el diseño de una red adecuada al tráfico multimedia que permita aprovechar las ventajas de la conmutación de paquetes, para así utilizar de forma más eficiente las infraestructuras y ofrecer servicios nuevos, tales como la videoconferencia o el vídeo bajo demanda. La tecnología que permite todo esto se denomina ATM (Asynchronous Transfer Mode) y sus orígenes se remontan nada menos que a 1968, cuando se concibió en los laboratorios Bell el primer sistema de transmisión de *celdas*. En esencia lo que se intenta con esta nueva tecnología es integrar todos los servicios (audio, vídeo y datos) en una única red digital, es decir lo mismo que pretendía la RDSI más el vídeo (aunque como hemos visto RDSI llegó demasiado tarde). Por este motivo ATM también se denomina a veces RDSI de banda ancha, RDSI-BA o B-ISDN (Broadband-ISDN). Por contraste a la 'antigua' RDSI se la denomina en ocasiones RDSI de banda estrecha; RDSI-BE o N-ISDN (Narrowband-ISDN).

En 1986 la CCITT definió el concepto de RDSI-BA y eligió ATM como la tecnología sobre la que se basarían los futuros estándares. En aquel entonces ATM interesaba exclusivamente a las compañías telefónicas. Gradualmente los fabricantes de ordenadores se fueron percatando de las posibilidades de ATM y en 1991 decidieron crear el *ATM forum*, una organización que produciría estándares con un dinamismo mayor que la CCITT. En el ATM forum participan compañías telefónicas y fabricantes de ordenadores de todo el mundo, y es actualmente allí donde se decide fundamentalmente la evolución de ATM; la mayoría de los estándares aprobados por el ATM Forum son refrendados posteriormente por la CCITT. El primer conmutador ATM comercial apareció precisamente en 1991.

ATM es en parte una evolución de Frame Relay. La principal diferencia es que los 'paquetes' ATM tienen una longitud fija de 53 bytes (5 de cabecera y 48 de datos) frente al tamaño variable y mucho mayor de las tramas Frame Relay. Debido a su tamaño pequeño y constante los paquetes ATM se denominan *celdas*, y por esto en ocasiones a ATM se le denomina cell relay (retransmisión de celdas). Manejar celdas de un tamaño tan reducido tiene la ventaja de que permite responder con mucha rapidez a tráfico de alta prioridad que pueda llegar inesperadamente mientras se están transmitiendo otro menos urgente, algo muy importante en tráfico multimedia. El hecho de que todas las celdas sean del mismo tamaño simplifica el proceso, cuestión esencial cuando se quiere que dicho proceso sea lo más rápido posible. En el lado negativo está el overhead del 9,4% (5/53) debido a la información de cabecera presente en cada celda.

Al igual que en X.25 o Frame Relay, una red ATM se constituye mediante conmutadores interconectados por líneas dedicadas, y ordenadores o hosts conectados a dichos conmutadores. Mientras que en X.25 o Frame Relay se utilizan normalmente velocidades de 64 Kb/s a 2 Mb/s, en ATM las velocidades normales son de 155,52, 622,08 Mb/s o incluso superiores (aunque también es posible utilizar ATM a velocidades de 2 ó 34 Mb/s). Estos valores de 155,52 Mb/s en adelante son los que se utilizan en el sistema de transmisión SONET/SDH (Synchronous Optical Network/Synchronous Digital Hierarchy), desarrollado por la CCITT más o menos en la misma época que ATM. SONET/SDH es una tecnología de transporte de información sobre fibra óptica para redes WAN y es el que están utilizando las compañías telefónicas de todo el mundo actualmente en el desarrollo de sus infraestructuras de alta capacidad.

ATM da al usuario muchas más facilidades que X.25 o Frame Relay para controlar las características de su circuito virtual: se puede fijar un ancho de banda máximo utilizable, un margen de tolerancia sobre dicho máximo, un ancho de banda mínimo garantizado, un ancho de banda asimétrico, un perfil horario de forma que el ancho de banda fluctúe con la hora del día de una forma preestablecida, etc. Además es posible definir prioridades y distintos tipos de tráfico según se prefiera fiabilidad o rapidez, tráfico constante o a ráfagas, etc.

El modelo de referencia ATM

ATM tiene su propio modelo de referencia, constituido por tres capas denominadas *capa física*, *capa ATM* y *capa de adaptación ATM*, también llamada *capa AAL (ATM Adaptation Layer)*.

La capa física está formada por dos subcapas: la PMD (Physical Media Dependent) y la TC (Transmission Convergence). La subcapa PMD describe la interfaz física con el medio de transmisión, y equivale a la capa física del modelo OSI. La subcapa TC se ocupa de 'deshacer' las celdas en bits para pasarlos a la subcapa PMD en el envío, y de recibir los bits de la subcapa PMD para reconstruir las celdas en la recepción. Si consideramos la celda como equivalente a la trama del modelo OSI la subcapa TC desempeñaría la función de la capa de enlace, por lo que la estudiaremos en ese capítulo.

La capa ATM trata de la estructura de las celdas y su transporte. También realiza las tareas de señalización, es decir establece y termina los circuitos virtuales, y realiza el control de congestión. Sus funciones son una mezcla de la capa de enlace y la capa de red en el modelo OSI.

La capa de adaptación ATM (capa AAL) se divide también en dos subcapas; la inferior, denominada subcapa SAR (Segmentation And Reassembly) se ocupa de fragmentar el paquete que recibe desde 'arriba' (normalmente mayor de 48 bytes) en celdas para su envío, y de reensamblarlo en la recepción cuando se lo entrega la capa ATM. La subcapa CS (Convergence Sublayer) se ocupa de suministrar distintos tipos de servicio adecuados al tipo de tráfico (vídeo, audio, datos, etc.). Haciendo la equivalencia con el modelo OSI podemos decir que la capa AAL corresponde a la capa de transporte.

Obsérvese que en el modelo de referencia ATM no se habla de aplicaciones. En realidad el modelo contempla la existencia de capas por encima de la capa AAL, pero no se especifican sus funciones ni características. El modelo deja total libertad en el diseño de aplicaciones sobre ATM. Actualmente el principal uso de ATM es como medio de transporte para otros protocolos; hay muy pocas aplicaciones que hayan sido diseñadas para funcionar de manera *nativa* en ATM, es decir directamente sobre la capa AAL.

Futuro de ATM

Hace unos años nadie cuestionaba el liderazgo de la tecnología ATM cuando se trata de redes de alta capacidad. Hoy en día se estima que aproximadamente el 80% del tráfico de datos nivel mundial atraviesa en algún punto una red ATM. Sin embargo las previsiones para ATM no son actualmente tan optimistas como lo eran hace unos años. Por un lado no ha sido capaz de imponerse como protocolo de red, la mayoría de las aplicaciones actualmente siguen funcionando sobre IP, incluso en el campo de aplicaciones multimedia en tiempo real que parecía ser el territorio ideal para ATM; por otro lado se plantean tecnologías competidoras, tales como Gigabit Ethernet en LAN y POS (Packet Over SONET) en WAN. Aunque sin duda ATM seguirá dando mucho que hablar durante bastantes años las cosas ya no apuntan a que se convierta en la 'tecnología universal' como parecía en 1996-1997.

En España Telefónica inició en 1996 dos servicios de red ATM denominados servicio Gigacom y Servicio Cinco (Comunicaciones Integrales Corporativas). Estos servicios están orientados a clientes con grandes necesidades de transmisión de datos multimedia; solo se permite la constitución de PVCs; las velocidades de acceso van de 512 Kb/s a 155 Mb/s. Este servicio es una alternativa interesante a las líneas dedicadas de alta velocidad, ya que permite contratar servicios de acuerdo a horarios preestablecidos, por ejemplo un periódico que necesita 4 Mb/s de capacidad entre sus oficinas de Madrid y Barcelona todos los días de 1 a 2 de la madrugada para transmitir la edición del día siguiente.

1.6 ESTÁNDARES

En nuestra vida diaria estamos rodeados de estándares, incluso para las cosas más triviales como los pasos de rosca o el tamaño de las hojas de papel. En algunos casos el estándar hace la vida más cómoda (por ejemplo el formato A4 permite una manipulación cómoda de documentos), en otros es necesario para asegurar la *interoperabilidad* (roscar una tuerca en un tornillo, por ejemplo). Los estándares en materia de telecomunicaciones pertenecen al segundo tipo, es decir, son esenciales para asegurar la interoperabilidad entre diversos fabricantes, cosa esencial si se quieren hacer redes abiertas, es decir si no se quiere ser

cautivo de un fabricante en particular. Los estándares pueden ser de ámbito regional, nacional o internacional; por ejemplo en Estados Unidos el formato habitual de papel no es el A4 sino el tamaño carta o *letter*, que es un poco mas pequeño y constituye un estándar nacional. Las telecomunicaciones son probablemente la primera actividad humana en la que se reconoció la necesidad de definir estándares internacionales; ya en 1865 representantes de muchos países europeos se reunieron para crear una organización que se ocupara de estandarizar las comunicaciones por telégrafo, acordando cosas tales como el código a utilizar; dicha organización fue la predecesora de la actual ITU (International Telecommunication Union).

Conviene destacar que la pertenencia de un país a una determinada organización no asegura su adhesión a los estándares emanados de la misma. Por ejemplo, el tamaño de papel A4 es parte de un estándar de la ISO (International Organization for Standardization) que es seguido por la mayoría de los países del mundo pero no por Estados Unidos, donde como ya hemos comentado se prefiere el tamaño carta, a pesar de que Estados Unidos también es miembro de la ISO.

Generalmente se suele distinguir dos tipos de estándares: *de facto* y *de jure*. Los estándares de facto (del latín 'del hecho') ocurren cuando un determinado producto o pauta de comportamiento se extiende en una comunidad determinada sin una planificación previa, hasta el punto de que ese producto o comportamiento se considera 'normal' dentro de esa comunidad. Los estándares de facto ocurren de forma natural y progresiva, sin una planificación previa ni un proceso formal que los refrende. Por ejemplo en informática personal podemos decir que el PC IBM o compatible (generalmente con software Microsoft) es un estándar de facto; en entornos universitarios de docencia e investigación en informática el uso de sistemas operativos UNIX es mayoritario, por lo que podemos decir que es un estándar de facto. Los estándares de facto también se llaman a veces 'estándares de la industria'.

Los estándares de jure (del latín 'por ley') son fruto de un acuerdo formal entre las partes implicadas, después de un proceso de discusión, consenso y a menudo votación. Se adoptan en el seno de una organización cuya principal misión es la elaboración o aprobación de estándares; si dicha organización tiene ámbito internacional el estándar definido es internacional. Existen dos tipos de organizaciones internacionales: las que podemos denominar 'oficiales' se crean por acuerdo entre los gobiernos de las naciones participantes; en este grupo se encuentran por ejemplo la ITU o la ISO. En otra categoría se encuentran las organizaciones que existen gracias al esfuerzo voluntario de sus miembros y que podemos denominar 'extraoficiales'; en esta categoría están por ejemplo la Internet Society o el ATM forum.

En el mundo de las redes de ordenadores existen hoy en día como hemos visto dos conjuntos de protocolos estándar, el OSI y el TCP/IP, pero ambos son relativamente recientes. En los años setenta y ochenta en que no había protocolos estándar la forma más sencilla de constituir una red multifabricante era utilizar los protocolos de IBM: SNA o su predecesor el NJE, Network Job Entry; como los equipos IBM eran los más extendidos casi todos los fabricantes disponían de productos que implementaban estos protocolos en sus equipos; además, en muchos casos la mayoría de los ordenadores a conectar era IBM por lo que el software necesario era fácil de obtener o venía incluido con el sistema operativo. Podemos decir que en los años setenta y parte de los ochenta los protocolos SNA y NJE eran un 'estándar de facto'.

Pasaremos ahora a describir con más detalle las principales organizaciones que tienen alguna relación con los estándares del campo de la telemática.

1.6.1 La ISO

Muchos países tienen organizaciones nacionales de estándares donde expertos de la industria y las universidades desarrollan estándares de todo tipo. Entre ellas se encuentran por ejemplo las que aparecen en la tabla 1.4.

País	Abreviatura	Nombre completo
Estados Unidos	ANSI	American National Standards Institute
Alemania	DIN	Deutsches Institut fuer Normung
Reino Unido	BSI	British Standards Institution
España	AENOR	Asociación Española de Normalización
Francia	AFNOR	Association Francaise de Normalisation
Italia	UNI	Ente Nazionale Italiano de Unificazione
Países Bajos	NNI	Nederlands Normalisatie-Instituut
Australia	SAA	Standards Australia
Nueva Zelanda	SANZ	Standards Association of New Zealand
Noruega	NSF	Norges Standardiseringsforbund
Dinamarca	DS	Dansk Standard

Tabla 1.4.- Organizaciones de estandarización/normalización de algunos países del mundo.

La ISO (International Organization for Standardization) es una organización voluntaria (es decir, no es fruto de tratados internacionales) creada en 1946 con sede en Ginebra, Suiza. Sus miembros son las organizaciones nacionales de estándares de los 89 países miembros. A menudo un estándar de uno de sus miembros es adoptado por ISO como estándar internacional; esto ocurre especialmente con los miembros más importantes, ANSI, DIN, BSI y AFNOR.

ISO emite estándares sobre todo tipo de asuntos, como por ejemplo: el sistema métrico de unidades de medida, tamaños de papel, sobres de oficina, tornillos y tuercas, reglas para dibujo técnico, conectores eléctricos, regulaciones de seguridad, componentes de bicicleta, números ISBN (International Standard Book Number), lenguajes de programación, protocolos de comunicaciones, etc. Hasta la fecha se han publicado unos 10.000 estándares ISO que afectan a prácticamente cualquier actividad de la vida moderna.

Para realizar esta ingente labor ISO se organiza en cerca de 200 comités técnicos denominados TC (Technical Committee) que se numeran en orden ascendente según su fecha de creación. El que nos interesa a nosotros es el TC97 que trata de ordenadores y proceso de la información. Cada comité tiene subcomités (SCs) que a su vez se dividen en grupos de trabajo o WGs (Working Groups).

El proceso de creación de un estándar ISO es como sigue. Uno de sus miembros (una organización nacional de estándares) propone la creación de un estándar internacional en un área concreta. Entonces ISO constituye un grupo de trabajo que produce un primer documento denominado borrador del comité o CD (Committee Draft). El CD se distribuye a todos los miembros de ISO, que disponen de un plazo de seis meses para exponer críticas. El documento, modificado de acuerdo con las críticas recibidas, se somete entonces a votación y si se aprueba por mayoría se convierte en un estándar internacional borrador o DIS (Draft International Standard) que se difunde para recibir comentarios, se modifica y se vota nuevamente. En base a los resultados de esta votación se prepara, aprueba y publica el texto final del estándar internacional o IS (International Standard). En áreas muy polémicas un CD o un DIS han de superar varias versiones antes de conseguir un número de votos suficiente, y el proceso entero puede llevar años.

ISO ha generado multitud de estándares en telemática y en tecnologías de la información en general, siendo OSI su ejemplo más significativo. Además a menudo ISO adopta estándares producidos por sus organizaciones miembros o por otras organizaciones relacionadas; por ejemplo ISO adopta sistemáticamente los estándares 802 del IEEE sobre redes locales.

1.6.2 La ITU-T

La ITU (International Telecommunication Union) fue creada en 1934, y con la creación de la ONU se vinculó a ésta en 1947. La ITU tiene tres sectores de los cuales solo nos interesa el conocido como ITU-T que se dedica a la estandarización de las telecomunicaciones. Desde 1956 a 1993 la ITU-T se conoció con el nombre CCITT, acrónimo del nombre francés Comité Consultatif International Télégraphique et Téléphonique. En 1993 el CCITT fue reorganizada y se le cambió el nombre a ITU-T; estrictamente

hablando el cambio de nombre tiene efectos retroactivos, es decir, los documentos vigentes, aun cuando fueran producidos antes de 1993, son hoy documentos de la ITU-T y no del CCITT.

Los miembros de la ITU-T son de cinco clases:

- Representantes de los países.
- Operadores privados reconocidos (por Ej. British Telecom, Global One, AT&T).
- Organizaciones regionales de telecomunicaciones (p. Ej. el ETSI).
- Empresas que comercializan productos relativos a telecomunicaciones y organizaciones científicas
- Otras organizaciones interesadas (bancos, líneas aéreas, etc.)

Entre los miembros hay unos 200 representantes de países, unos cien operadores privados y varios cientos de miembros de las otras clases. Sólo los representantes de los países tienen derecho a voto, pero todos los miembros pueden participar en el trabajo.

Para desarrollar su trabajo la ITU-T se organiza en Grupos de Estudio, que pueden estar formados por hasta 400 personas. Los Grupos de Estudio se dividen en Equipos de Trabajo (Working Parties), que a su vez se dividen en Equipos de Expertos (Expert Teams).

Las tareas de la ITU-T comprenden la realización de recomendaciones sobre interfaces de teléfono, telégrafo y comunicaciones de datos. A menudo estas recomendaciones se convierten en estándares reconocidos internacionalmente, por ejemplo la norma ITU-T V.24 (también conocida como EIA RS-232) especifica la posición y el significado de las señales en el conocido conector de 25 contactos utilizado en muchas comunicaciones asíncronas.

La ITU-T denomina a sus estándares 'recomendaciones'; con esto se quiere indicar que los países tienen libertad de seguirlas o no. Ignorarlas puede suponer quedar aislado del resto del mundo, por lo que en la práctica a menudo las recomendaciones se traducen en obligaciones.

Todos los estándares de la ITU-T se nombran mediante una letra seguida de un punto seguido a su vez de números. La letra identifica la serie, por ejemplo todo lo relativo a módems se encuentra en la serie V (V.32, V.42, ...); la serie X trata sobre redes de datos y OSI (X.25, X.400,...), las series I y Q definen la RDSI, la serie H comprende todo lo relativo a codificación digital de vídeo y videoconferencia (H.263, H.323, etc.).

1.6.3 Foros industriales

El proceso de elaboración de estándares de la ITU-T y la ISO siempre se ha caracterizado por una gran lentitud, debido quizá a la necesidad de llegar a un consenso entre muchos participantes y a procedimientos excesivamente complejos y burocratizados. Esa lentitud fue uno de los factores que influyó en el rechazo de los protocolos OSI, por ejemplo. En el caso de RDSI la ITU-T empezó a elaborar el estándar en 1972, y lo finalizó en 1984; los servicios comerciales aparecieron hacia 1994, 22 años después de iniciado el proceso.

Los fabricantes de equipos, que perdían gran cantidad de mercado por culpa de estos retrasos, no estaban dispuestos a seguir funcionando de la misma forma. Por ello a principios de los noventa surgió un nuevo mecanismo para acelerar la creación de estándares, que fue la creación de foros industriales. La idea era simple: un conjunto de fabricantes, usuarios y expertos interesados en desarrollar una tecnología concreta forman un consorcio que se ocupa de fijar los estándares necesarios para garantizar la interoperabilidad entre diversos fabricantes; los estándares se hacen públicos de forma que cualquier fabricante que lo desee puede desarrollar productos conformes con dicho estándar.

Los foros no pretenden competir con las organizaciones internacionales de estándares, sino cooperar con ellas y ayudarlas a acelerar su proceso, especialmente en la parte más difícil, la que corresponde a la traducción de los documentos en implementaciones que funcionen en la práctica. Generalmente los foros trabajan en los mismos estándares intentando aclarar ambigüedades y definir subconjuntos de funciones que permitan hacer una implementación sencilla en un plazo de tiempo más corto y comprobar la viabilidad y la interoperabilidad entre diversos fabricantes; así los organismos de estandarización pueden

disponer de prototipos reales del estándar que se está definiendo. En cierto modo es como traer a la ISO e ITU-T el estilo de funcionamiento de la IETF.

Otra característica de los foros es que se establecen fechas límite para la producción de estándares, cosa que no hacen los organismos oficiales; de esta manera los fabricantes pueden planificar la comercialización de sus productos de antemano, ya que saben para qué fecha estarán fijados los estándares necesarios.

Como ejemplo de foros industriales que existen o han existido podemos mencionar el Forum Frame Relay, el Forum ATM, el Forum ADSL (Asymmetric Digital Subscriber Loop), el Forum IPv6, la alianza Gigabit Ethernet, etc. El forum ATM, creado en 1991 por Northern Telecom, Sprint, Sun Microsystems, y Digital Equipment Corporation (DEC), cuenta en la actualidad con más de 500 miembros

1.6.4 Otras organizaciones

La Internet Society, aunque no es una organización de estándares ‘oficial’, es la que se ocupa de aprobar todo lo relacionado con los estándares Internet. Debido a su importancia y estrecha relación con la propia Internet aplazaremos el estudio de dicha organización a la descripción de la evolución de Internet que abordaremos en el capítulo 9.

El IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) es una asociación profesional de ámbito internacional. Aparte de otras muchas tareas el IEEE (también llamado IE cubo) tiene un grupo que desarrolla estándares en el área de ingeniería eléctrica e informática. Entre ellos se encuentran por ejemplo los estándares 802 que cubren casi todo lo relacionado con redes locales. Los estándares 802 son adoptados regularmente por ISO con el número 8802.

El ANSI es como ya hemos dicho la organización de estándares de los Estados Unidos. Debido a que muchos fabricantes de equipos de comunicaciones diseñan o desarrollan sus productos en Estados Unidos muchos estándares ANSI son de interés también en otros países. Además muchos estándares ANSI son adoptados posteriormente por ISO como estándares internacionales.

El NIST (National Institute of Standards and Technology) es una agencia del Departamento de Comercio de los Estados Unidos., antes conocido como el NBS (National Bureau of Standards). Define estándares para la administración de los Estados Unidos.

El ETSI (European Telecommunications Standards Institute) es una organización internacional dedicada principalmente a la estandarización de las telecomunicaciones europeas. Es miembro de la ITU-T. Entre sus misiones está elaborar especificaciones detalladas de los estándares internacionales adaptadas a la situación de Europa en los aspectos históricos, técnicos y regulatorios.

La EIA (Electrical Industries Association) es una organización internacional que agrupa a la industria informática y que también participa en aspectos de la elaboración de estándares.

La ECMA (European Computer Manufacturers Association), creada en 1961, es un foro de ámbito europeo donde expertos en proceso de datos se ponen de acuerdo y elevan propuestas para estandarización a ISO, ITU-T y otras organizaciones.

La CEPT (Conference European of Post and Telecommunications) es una organización de las PTTs europeas que participa en la implantación de estándares de telecomunicaciones en Europa. Sus documentos se denominan Norme Europeene de Telecommunication (NET). La CEPT está avalada por la Comunidad Europea.

1.7 EJERCICIOS

1. Indique si es verdadera o falsa cada una de las siguientes afirmaciones:

- a) A diferencia de lo ocurrido con los protocolos OSI en TCP/IP el modelo se definió después de especificar los protocolos
- b) Los estándares Internet son aprobados por la ISO.
- c) Todas las tecnologías de red local son de tipo broadcast.
- d) OSI fue la primera arquitectura de redes que se describió mediante un modelo de capas.
- e) Cuando se utilizan SVCs en Frame Relay la red es no orientada a conexión.
- f) El desarrollo y estandarización de los protocolos TCP/IP se efectúa al margen de las organizaciones tradicionales de estándares, como ISO, ITU o el IEEE.

2. Diga en cuales de las siguientes situaciones se utilizan las telecomunicaciones y en cuales la telemática:

- a) Dos usuarios mantienen una conversación a través de dos teléfonos conectados a la RDSI (Red Digital de Servicios Integrados).
- b) Otros dos usuarios hablan, pero utilizan dos PCs (con tarjeta de sonido); los PCs están conectados a la Internet mediante líneas analógicas y módems de 28.8 Kb/s.
- c) Un usuario envía a otro por mensajero un disquete que contiene un fichero.
- d) Un usuario envía un telegrama utilizando el código Morse.
- e) Un usuario envía un documento desde un ordenador, conectado mediante un módem y un programa emulador de facsímil; en el destino el documento es recibido por otro ordenador conectado de la misma forma.
- f) Dos usuarios mantienen una videoconferencia mediante PCs conectados por RDSI en los que se ha instalado el hardware y software adecuado.

3. Explique las modificaciones efectuadas en el modelo de capas OSI para adaptarlo a los protocolos TCP/IP

4. Una empresa ubicada en Valencia dispone de una serie de sucursales, todas en área metropolitana, que desea unir a 128 Kb/s con su oficina central. Tanto la oficina central como las sucursales disponen de routers que pueden conectarse bien a líneas dedicadas de 128 Kb/s o a enlaces básicos RDSI. El costo mensual de una línea dedicada de 128 Kb/s en pesetas es de:

$$\begin{array}{ll} 64458 + 4576*d & \text{para } d = 0 \text{ a } 4 \\ 82762 + 4895*(d-4) & \text{para } d = 4 \text{ a } 20 \end{array}$$

donde d es la distancia en kilómetros.

Como alternativa se considera utilizar en cada caso una pareja de accesos básicos RDSI. En este caso el costo es de:

5843 pesetas al mes por cada acceso básico
5,7 pesetas por establecer la llamada

5,7 pesetas por cada tres minutos o fracción

El horario de las sucursales es de 8 a 20 horas de lunes a viernes, y de 8 a 14 horas los sábados. El calendario laboral de la empresa establece 12 festivos al año (el comité de empresa se asegura de que los festivos siempre ocurran entre lunes y viernes).

Se supone que el tráfico de cada sucursal será lo bastante elevado como para requerir tener los dos canales B abiertos de forma permanente mientras están abiertas las sucursales; fuera de esas horas el router está apagado.

Dado que el costo de la línea dedicada depende de la distancia y el de la conexión RDSI es independiente de ésta (siempre y cuando nos encontremos en ámbito metropolitano) se sospecha que la línea dedicada será más barata hasta una cierta distancia y que a partir de ésta será más barato utilizar RDSI. Confirme o desmienta esta suposición, y en caso afirmativo calcule cual será la distancia a partir de la cual será más barato utilizar RDSI.

5. En 1999 Telefónica puso en marcha la opción de tarifa plana dentro del servicio RDSI con el nombre comercial de servicio Novacom Multiplan, con dos modalidades: conmutada y permanente. En la modalidad conmutada el usuario notifica a Telefónica un número de teléfono RDSI con el cual tiene tarifa plana, es decir no se le factura el tiempo de conexión. El usuario puede además llamar a cualquier otro número de teléfono de la red, facturándosele en este caso el tiempo de conexión de acuerdo con las tarifas normales. En la modalidad permanente el usuario notifica a Telefónica el número de teléfono con el que desea establecer la comunicación y el circuito se configura de forma que la comunicación esté establecida de forma permanente, sin necesidad de establecer la llamada; al estar el usuario siempre conectado con el número de teléfono correspondiente no es posible utilizar ese canal para comunicar con otros números de teléfono. Tanto la modalidad conmutada como la permanente se aplican a cada canal B que el usuario solicite, independientemente de que se trate de un acceso básico o primario.

Las cuotas mensuales (en pesetas) del servicio Novacom son como sigue:

Ámbito	Permanente	Conmutado
Metropolitano	20.000	16.000
Provincial	31.000	25.000
Nacional	108.000	95.000

El ámbito queda determinado por los dos números de teléfono que se interconectan.

Calcule en el problema anterior para que casos (es decir, para que rango de distancias) puede ser el servicio Novacom conmutado o permanente una opción interesante frente a las dos posibilidades allí planteadas (línea punto a punto y acceso RDSI normal).

1.8 SOLUCIONES

S1.-

- a) **Verdadera.** Se especificaron los protocolos antes de definir el modelo.
- b) **Falsa.** Los estándares Internet son aprobados por el IAB (Internet Architecture Board) que pertenece al IAB (Internet Architecture Board).
- c) **Falsa.** Algunas, como por ejemplo HIPPI, se basan en enlaces punto a punto.
- d) **Falsa.** SNA (Systems Network Architecture) que se definió varios años antes también utilizaba el modelo de capas.
- e) **Falsa.** Si hay circuitos virtuales, independientemente de su tipo, la red siempre es orientada a conexión.
- f) **Verdadera.** El desarrollo y estandarización de los protocolos TCP/IP lo realiza el IAB (Internet Architecture Board), que pertenece a la Internet Society, y que tiene poco o nada que ver con la ISO, la ITU o el IEEE.

S2.-

- a) Telecomunicaciones. La transmisión digital de información ocurre en este caso sin que los usuarios sean conscientes de ello y sin que puedan obtener un beneficio directo.
- b) Telemática. Los usuarios disponen de un PC con todas sus posibilidades de programación; por ejemplo uno de ellos podría dejar un mensaje pregrabado cuyo contenido dependiera de la hora en la que el otro llama, etc.
- c) Ninguna de ambas. La Telemática requiere el envío de bits, y las Telecomunicaciones el envío de ondas (normalmente electromagnéticas). El envío de átomos no corresponde a ninguna de las dos.
- d) Telecomunicaciones. Aunque la información se transmite de forma digital (en este caso el codec es el telegrafista) el usuario no dispone de medios que le permitan explotar esta circunstancia.
- e) Telemática. El uso de ordenadores en vez de dispositivos facsímil permite por ejemplo que el documento sea enviado y/o recibido a un servidor de fax de una red.
- f) Telemática. El usuario dispondrá normalmente de herramientas que le permitirán integrar la videoconferencia con su PC, pudiendo por ejemplo mostrar al usuario remoto documentos o compartir aplicaciones instaladas en su PC.

S3.-

Las capas de sesión y presentación han sido suprimidas. Además las dos primeras capas (física y de enlace) se han fundido en una nueva denominada host-red.

S4.-

Cálculo RDSI, base anual:

Costo conexión un día normal (L-V):

$$5,7 * 60 * (20 - 8) / 3 + 5,7 = 1373,7 \text{ pesetas}$$

Costo conexión un sábado:

$$5,7 * 60 * (14 - 8) / 3 + 5,7 = 689,7 \text{ pesetas}$$

$$\text{Laborables L-V del año: } 365 * 5/7 = 260,7 - 12 = 248,7$$

$$\text{Sábados del año: } 365/7 = 52,1$$

Costo 1 canal B:

$$248,7 * (1373,7) + 52,1 * (689,7) = 377572 \text{ pesetas/año}$$

$$\text{Dos canales B: } 755144 \text{ pesetas/año } 62929 \text{ pesetas/mes}$$

$$\text{Cuota fija: } 5843 * 2 \text{ accesos básicos} = 11686 \text{ pesetas}$$

Total al mes (cuota fija + conexión): **74615 pesetas**

Línea dedicada.

Probamos con la primera fórmula (menos de 4 Km):

$$74615 = 64458 + 4576 * n \quad (n = 0 \text{ a } 4, n^{\circ} \text{ de Km})$$

$$n = (74615 - 64458) / 4576 = 2,22 \text{ Km}$$

Por encima de 2,22 Km es más rentable utilizar RDSI

S5.-

Dado que la opción Novacom permanente es más cara y no aporta ventajas nos concentraremos para la comparación en el caso de Novacom conmutado. Además se nos dice que todas las conexiones son en ámbito metropolitano, por lo que el costo de cada canal B será de 16.000 Pts/mes. A esto hay que sumar la cuota fija de los dos accesos RDSI, por lo que el costo mensual total de la conexión será de:

$$11686 + 16000 * 2 = 43686 \text{ pesetas}$$

Resulta que el costo mínimo de una línea dedicada (distancia 0 Km) es de 64458 pesetas al mes, por lo que **la solución Novacom conmutada es más rentable que la línea dedicada para todas las distancias.**

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 mas 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 $75\ \Omega$ 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 $50\ \Omega$ 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 = 10^{12} 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

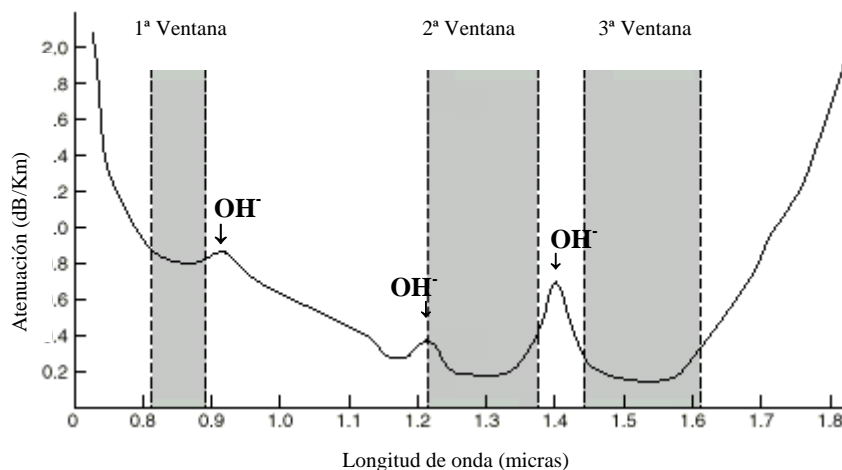


Figura 2.1.- Atenuación de la fibra de vidrio en función de la longitud de onda

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 está 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	Más 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 permitan 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 (64×1024) 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 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 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 $256 \times 8.000 = 2.048$ Kb/s (o también $64 \text{ Kb/s} \times 32 = 2.048 \text{ Kb/s}$). Cuando una línea E1 se utiliza para transportar voz se pueden multiplexar 30 conversaciones, equivalentes a $30 \times 64 \text{ Kb/s} = 1.920 \text{ Kb/s}$ 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 $24 \times 8 + 1 = 193$ bits, que emitidos 8.000 veces por segundo dan $193 \times 8.000 = 1.544 \text{ Kb/s}$.

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 ($2,048 \text{ Mb/s} \times 4 = 8,192 \text{ Mb/s}$) 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 'alinearmas' 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 mas 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 despilfarro 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.

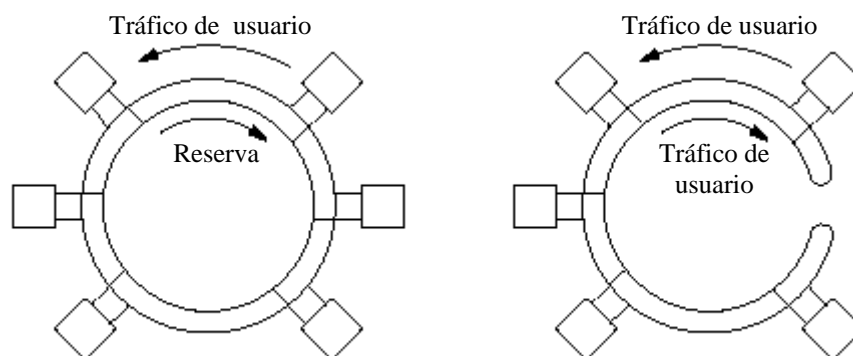


Figura 2.2.- Funcionamiento de un doble anillo en caso de avería. En el caso de la izquierda, en que el anillo está completo, se utiliza sólo una fibra para tráfico de usuario, la otra está de reserva. En el caso de la derecha, en que se ha producido un corte en el anillo, las dos fibras se emplean para 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 los 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 30×30 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 mas 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 le 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 mas 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 mas 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 mas 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 geoestacionaria a 180 en la banda C y 360 en las Ku y Ka. La distribución de bandas y espacio en la órbita geoestacionaria 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 geoestacionarios 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:
 - o 117 bins con S/R de 20 dB
 - o 88 bins con S/R de 15 dB
 - o 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:

- o La atenuación de la fibra multimodo en segunda ventana es de 1,5 dB/Km
- o Cada empalme introduce una atenuación de 0,2 dB
- o Cada pareja de conectores introduce una atenuación de 0,5 dB
- o 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:
 - o que no hay costos de mantenimiento,
 - o que se quiere amortizar la inversión en 20 años,
 - o que se tiene asegurada la contratación continuada de toda la capacidad existente
 - o 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:

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

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

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

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

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

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

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

Para que la transmisión sea posible $A_{\text{t}} \leq A_{\text{tp}}$

En el caso límite (distancia máxima): $A_{\text{t}} = A_{\text{tp}}$:

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

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

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

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

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:

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

(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>

3 LA CAPA DE ENLACE

Autor: Rogelio Montañana

3	LA CAPA DE ENLACE.....	3-1
3.1	INTRODUCCIÓN.....	3-2
3.2	Tramas.....	3-3
3.3	Control de flujo.....	3-4
3.4	Control de errores.....	3-4
3.4.1	Códigos correctores de errores.....	3-6
3.4.2	Códigos detectores de errores (CRC).....	3-7
3.5	PROTOCOLOS DE ENLACE ELEMENTALES.....	3-8
3.5.1	Protocolo de parada y espera.....	3-9
3.5.2	Acuse de recibo 'piggybacked'.....	3-9
3.6	PROTOCOLOS DE VENTANA DESLIZANTE.....	3-10
3.6.1	Protocolo de retroceso n.....	3-12
3.6.2	Protocolo con repetición selectiva.....	3-12
3.7	PROTOCOLOS DE NIVEL DE ENLACE REALES.....	3-13
3.7.1	HDLC - High-level Data Link Control.....	3-13
3.7.2	El nivel de enlace en la Internet.....	3-16
3.7.2.1	PPP (Point to Point Protocol).....	3-16
3.7.3	El nivel de enlace en Frame Relay.....	3-18
3.7.4	El nivel de enlace en ATM.....	3-18
3.7.4.1	Celdas de 48 bytes + cabecera.....	3-19
3.7.4.2	Transmisión de celdas.....	3-19
3.7.4.3	Recepción de celdas.....	3-20
3.8	EJERCICIOS.....	3-21
3.9	SOLUCIONES.....	3-24

3.1 INTRODUCCIÓN

La capa de enlace, que se sitúa inmediatamente encima de la capa física, se ocupa de suministrar un transporte de bits, normalmente fiable, a la capa de red. La capa de enlace solo se ocupa de equipos física y directamente conectados, sin tener conocimiento o ‘conciencia’ de la red en su conjunto. Esto no quiere decir que no pueda haber ningún dispositivo en el cable que conecta los dos equipos, puede haber amplificadores o repetidores; los amplificadores son dispositivos que amplifican la señal desde el punto de vista analógico, los repetidores interpretan bit a bit la información digital contenida en la señal y la regeneran de nuevo. Los amplificadores distorsionan ligeramente la señal, por lo que si se conectan muchos en serie la deformación puede llegar a ser excesiva (algo parecido a hacer una fotocopia de fotocopia muchas veces). En cambio los repetidores, al regenerar la señal digital original no introducen ninguna distorsión y por tanto por este lado se pueden encadenar en serie sin restricciones; sin embargo consideraciones del retardo introducido en la propagación de la señal también imponen un número máximo en este caso. En cualquier caso tanto los amplificadores como los repetidores son dispositivos que funcionan a nivel físico puesto que se limitan a reproducir la señal bit a bit sin alterarla ni interpretar su significado.

Un ejemplo de nivel de enlace podría ser una línea E3 que interconecta dos ordenadores y que transcurre por un sistema SDH. La línea atravesará típicamente una serie de repetidores, ADMs y probablemente cross-connect SDH; sin embargo desde el punto de vista de esos dos ordenadores todo será equivalente a una conexión E3 PDH tradicional.

Una característica importante de la capa de enlace es que los bits han de llegar a su destino en el mismo orden en que han salido; en algunos casos *puede haber errores o pérdida de bits, pero nunca debe producirse una reordenación en el camino.*

Las principales funciones que desarrolla la capa de enlace son las siguientes:

- Agrupar los bits en grupos discretos denominados tramas. Esto permite desarrollar de forma más eficiente el resto de funciones.
- Realizar la comprobación de errores mediante el código elegido, que puede ser corrector o simplemente detector. En el caso de código corrector se procede a corregir los errores, en el de un código detector la trama errónea se descarta y opcionalmente se pide retransmisión al emisor.
- Efectuar control de flujo, es decir pedir al emisor que baje el ritmo o deje momentáneamente de transmitir porque el receptor no es capaz de asimilarla información enviada.

No todas las funciones se implementan en todos los protocolos de enlace. La retransmisión de tramas erróneas y el control de flujo a menudo se implementan en las superiores (capa de red, de transporte, o incluso en la de aplicación).

La mayoría de las funciones del nivel de enlace se implementan en el hardware de los equipos. Esto hace que los protocolos de nivel de enlace se modifiquen poco con el tiempo.

Los tipos de servicio que la capa de enlace puede suministrar a la capa de red son normalmente los siguientes:

- Servicio no orientado a conexión y sin acuse de recibo
- Servicio no orientado a conexión con acuse de recibo
- Servicio orientado a conexión con acuse de recibo

En el primer caso el envío se hace ‘a la buena de dios’ sin esperar ninguna indicación del receptor sobre el éxito o fracaso de la operación. Este tipo de servicio es apropiado cuando la tasa de error es muy baja (redes locales o fibra óptica) y se deja la misión de comprobar la corrección de los datos transmitidos a las capas superiores (normalmente el nivel de transporte); se considera en estos casos que la probabilidad de error es tan baja que se pierde más tiempo haciendo comprobaciones inútiles que dejando esta tarea a las capas superiores. También se usa este tipo servicio cuando se quiere transmitir información en tiempo real (por ejemplo en una vídeoconferencia) y no se quiere sufrir el retraso que impondría un servicio más sofisticado en la capa de enlace (se supone que en este caso preferimos la pequeña tasa de error del medio

físico a cambio de minimizar el retardo, o dicho de otro modo si se hiciera reenvío en caso de error sería peor el remedio que la enfermedad).

En el segundo tipo de servicio se produce un acuse de recibo para cada trama enviada. De esta manera el emisor puede estar seguro de que ha llegado. Suele utilizarse en redes con mas tasa de error, por ejemplo redes inalámbricas.

El tercer servicio es el más seguro y sofisticado. El emisor y el receptor establecen una conexión explícita de antemano, las tramas a enviar se numeran y se aseguran ambos de que son recibidas todas correctamente en su destino y transmitidas a la capa de red una vez y sólo una.

En el servicio orientado a conexión se pueden distinguir tres fases: establecimiento de la conexión, envío de los datos, y terminación de la conexión. En la primera se establecen los contadores y buffers necesarios para la transmisión, en la segunda se envían los datos con las retransmisiones que sea preciso, y en la tercera se liberan los buffers y variables utilizadas.

3.2 TRAMAS

La capa de enlace agrupa los bits en paquetes discretos denominados tramas (frames) que son los que envía por la línea. A veces, como en el caso de SDH, el medio físico crea también sus propias tramas, que no tienen por que coincidir con las del nivel de enlace. Según el tipo de red la trama puede oscilar entre unos pocos y unos miles de bytes¹. La utilización de tramas simplifica el proceso de detección y eventual corrección de errores. Una buena parte de las tareas de la capa de enlace tiene que ver con la construcción e identificación de las tramas.

Para identificar el principio y final de una trama la capa de enlace puede usar varias técnicas; las mas normales son:

- Contador de caracteres
- Caracteres indicadores de inicio y final con caracteres de relleno
- Bits indicadores de inicio y final, con bits de relleno
- Violaciones de código a nivel físico

En el primer método se utiliza un campo en la cabecera de la trama para indicar el número de caracteres de ésta. Parece lo más sencillo e intuitivo, pero tiene un serio problema: si un error afecta precisamente a la parte de la trama que indica la longitud, o si por un error en la línea se envían bits de más o de menos, todas las tramas posteriores serán mal interpretadas.

El segundo método utiliza una secuencia especial de caracteres para marcar el inicio y final de cada trama, normalmente los caracteres ASCII DLE STX para el inicio y DLE ETX para el final (DLE es Data Link Escape, STX es Start of Text y ETX End of Text). De esta forma si ocurre un error o incidente grave el receptor sólo tiene que esperar a la siguiente secuencia DLE STX o DLE ETX para saber en que punto se encuentra.

Cuando se usa este sistema para transmitir ficheros binarios es posible que por puro azar aparezcan en el fichero secuencias DLE STX o DLE ETX, lo cual provocaría la interpretación incorrecta de un principio o final de trama por parte del receptor. Para evitar esto se utiliza una técnica conocida como *relleno de caracteres* ('character stuffing' en inglés): el emisor cuando ve que ha de transmitir un carácter DLE proveniente de la capa de red intercala en la trama otro carácter DLE; el receptor, cuando recibe dos DLE seguidos, ya sabe que ha de quitar un DLE y pasar el otro a la capa de red.

El principal problema que tiene el uso de DLE STX y DLE ETX es su dependencia del código de caracteres ASCII. Este método no resulta adecuado para transmitir otros códigos, especialmente cuando la longitud de carácter no es de 8 bits. Tampoco es posible enviar con este sistema tramas cuyo tamaño no sea múltiplo de ocho bits. Para evitar estos problemas se ha diseñado una técnica que podríamos

¹ Aunque al hablar de capacidades, caudales, velocidades, etc. siempre se hace referencia a bits por segundo, al hablar de tramas, paquetes, etc. se habla casi siempre en bytes, kilobytes, etc ; en estos casos los prefijos Kilo, Mega, etc. tienen el significado informático de 2^{10} , 2^{20} , etc.

considerar una generalización de la anterior, consistente en utilizar una determinada secuencia de bits para indicar el inicio de una trama. Generalmente se utiliza para este fin la secuencia de bits 01111110, que se conoce como byte indicador ('flag byte' o 'flag pattern'). El receptor esta permanentemente analizando la trama que recibe buscando en ella la presencia de un flag byte, y en cuanto lo detecta sabe que ha ocurrido un inicio (o final) de trama. Aunque el flag byte tiene ocho bits el receptor no realiza el análisis byte a byte sino bit a bit, es decir la secuencia 01111110 podría suceder 'a caballo' entre dos bytes y el receptor la interpretaría como flag byte; esto permite el envío de tramas cuya longitud no sea múltiplo de ocho.

Queda por resolver el problema de que los datos a transmitir contengan en sí mismos la secuencia 01111110; en este caso se utiliza la técnica conocida como relleno de bits o inserción de bit cero ('bit stuffing' o 'zero bit insertion'). Consiste en que el emisor, en cuanto detecta que el flujo de bits contiene cinco bits contiguos con valor 1, inserta automáticamente un bit con valor 0. El receptor por su parte realiza la función inversa: analiza el flujo de bits entrante y en cuanto detecta un 0 después de cinco unos contiguos lo suprime en la reconstrucción de la trama recibida. De esta forma la secuencia 01111110 no puede nunca aparecer como parte de los datos transmitidos mas que como delimitador de tramas. Si las cosas van mal y el receptor pierde noción de donde se encuentra bastará con que se ponga a la escucha de la secuencia 01111110 que le indicará el inicio o final de una trama.

La trama a transmitir incluye casi siempre, además de los datos, alguna información de control de errores, por ejemplo un código CRC como veremos más tarde. Es importante notar que el relleno de bits (o de bytes) debe aplicarse a la trama inmediatamente antes de transmitirla y después de haber calculado el CRC, ya que de lo contrario la trama no sería interpretada correctamente si el CRC contuviera por azar el carácter o secuencia delimitadora de trama.

El cuarto método de identificación de tramas, violaciones de código a nivel físico, se utiliza en determinados tipos de red local aprovechando el hecho de que determinadas secuencias de símbolos no están permitidas y por tanto no pueden ocurrir en los datos a transmitir. Este método está muy relacionado con las características del medio físico utilizado. Veremos algunos ejemplos de protocolos de enlace que utilizan este método cuando hablemos de redes locales en el capítulo 4.

3.3 CONTROL DE FLUJO

Cuando dos ordenadores se comunican generalmente han de adoptarse medidas para asegurar que el emisor no satura al receptor. Si la línea entre ellos es de baja capacidad probablemente el factor limitante será la conexión, pero si es un canal rápido (por ejemplo una red local) es posible que el emisor, si es un ordenador más rápido o está menos cargado que el receptor, envíe datos a un ritmo superior al que es capaz de asimilar éste. En este caso el nivel de enlace en el receptor utilizará los buffers que tenga disponibles para intentar no perder datos, pero si el ritmo acelerado sigue durante un tiempo suficiente se producirá antes o después una pérdida de tramas por desbordamiento. En estos casos es preciso habilitar mecanismos que permitan al receptor frenar al emisor, es decir ejercer **control de flujo** sobre él. El control de flujo puede implementarse en el nivel de enlace o en niveles superiores (por ejemplo el nivel de transporte). Es importante que el control de flujo se ejerza de forma que no produzca ineficiencias en la comunicación; por ejemplo en enlaces de área extensa, donde la capacidad es un bien muy costoso, es importante mantener el nivel de ocupación del enlace tan alto como sea posible sin incurrir por ello en pérdida de tramas.

3.4 CONTROL DE ERRORES

Por desgracia el medio de transmisión utilizado en redes de ordenadores introduce errores. La tasa de errores es función de múltiples factores, pero principalmente del medio de transmisión utilizado. La fibra óptica y las redes locales suelen tener las tasas más bajas², mientras que las transmisiones inalámbricas con equipos móviles (GSM o LANs inalámbricas) o sobre telefonía analógica suelen tener las más altas.

² Por ejemplo los estándares SONET/SDH requieren en fibra óptica una tasa de error o BER (Bit Error Rate) de 10^{-12} , es decir un bit erróneo cada 10^{12} bits transmitidos.

La disciplina que estudia los errores de transmisión desde el punto de vista matemático es la teoría de la codificación. En 1950 R. W. Hamming publicó un artículo donde establecía las bases de los códigos de detección y corrección de errores; vamos a ver ahora los aspectos fundamentales de este planteamiento.

La trama que se transmite de un ordenador a otro está formada por m bits de datos y r bits redundantes, de comprobación. La trama tiene pues una longitud $n = m + r$, y forma lo que en teoría de la codificación se denomina una **palabra codificada** o **codeword** de n bits.

Dadas dos codewords cualesquiera, por ejemplo 10001001 y 10110001 es fácil determinar en cuantos bits difieren aplicando la operación OR exclusivo entre ambas y contando el número de bits a 1 del resultado; por ejemplo en nuestro caso difieren en 3 bits. Este valor, el número de posiciones de bit en que dos codewords difieren, se denomina **distancia de Hamming**. Si dos codewords están separadas por una distancia d serán necesarias d conversiones de un bit (por ejemplo d errores de un bit) para transformar una en la otra.

En la transmisión de información generalmente los datos de usuario pueden adoptar cualquier valor, por lo que en la parte de datos de la trama hay 2^m valores posibles; pero debido a la manera como se calculan los r bits de comprobación no están permitidas las 2^n codewords que en principio podrían formar la trama. A partir del algoritmo utilizado para calcular los bits de comprobación es posible construir todas las codewords legales, y averiguar cuales son las dos que están a menor distancia. Esta es la distancia Hamming del código completo.

La distancia Hamming de un código determina su capacidad de detección y corrección de errores. Para detectar d errores (es decir, d bits erróneos en la misma trama) es preciso que la distancia sea como mínimo de $d + 1$; de esa manera la codeword errónea no coincidirá con ninguna otra codeword válida y el receptor puede detectar la anomalía. Si se quiere un código capaz de corregir d errores es preciso que la distancia Hamming sea como mínimo $2d + 1$, ya que entonces la codeword errónea recibida sigue estando más cerca de la codeword original que de cualquier otra. Así por ejemplo, si la distancia Hamming del código utilizado en la corrección de errores de un protocolo determinado es de 5, entonces el protocolo podrá corregir hasta 2 errores en una trama, y detectar hasta 4.

El ejemplo más sencillo de código de detección de errores es el bit de paridad. El bit de paridad se elige de forma que mantenga la paridad (par o impar) de la codeword. El código formado con un bit de paridad tiene una distancia de 2, ya que cambiando un bit de cualquier codeword el resultado es ilegal, pero cambiando dos vuelve a serlo. Con una distancia 2 es posible detectar errores de 1 bit, pero no es posible detectar errores múltiples, ni corregir errores de ningún tipo. A cambio tiene un overhead mínimo, ya que supone añadir solamente un bit a cada codeword. Por este motivo el bit de paridad se utiliza en situaciones donde la fiabilidad es muy alta y la codeword muy pequeña, como en algunos sistemas de memoria RAM o de grabación de datos en soporte magnético.

La *eficiencia* de un código viene dada por la relación m/n ; a la diferencia $1-m/n$ se la denomina *redundancia*. Por ejemplo al utilizar un bit de paridad para acceder a un byte de memoria se tiene una eficiencia de 0,8889 y una redundancia de 0,1111.

En esencia cualquier mecanismo de control de errores se basa en la inclusión de un cierto grado de redundancia, lo cual requiere un compromiso entre eficiencia y fiabilidad. Supongamos por ejemplo que deseamos transmitir una trama de 64 bits y utilizamos un bit de paridad; la eficiencia se reducirá en un 2% solamente y seremos capaces de detectar errores simples, pero los errores dobles pasarán desapercibidos; en caso de errores múltiples la probabilidad de que pasen desapercibidos es de 0,5, lo cual no es aceptable. Para mejorar la fiabilidad podemos introducir un bit de paridad cada ocho bits de datos; para esto imaginemos la trama como una matriz de 8 x 8 bits, a la cual añadimos una novena columna que son los bits de paridad; la transmisión se haría fila a fila, sin incluir la novena columna (los bits de paridad) que iría al final de la trama; el receptor reconstruiría la matriz 8 x 8 a partir de los bits recibidos y a continuación construiría la columna de bits de paridad, que luego compararía con la recibida; en caso de discrepancia se supondría un error y se pediría retransmisión. Con este sistema las probabilidades de detectar errores múltiples han aumentado, pero si los errores se producen a ráfagas (cosa muy normal en transmisión inalámbrica, por ejemplo) tendremos varios bits erróneos cerca, con lo que la probabilidad de que su bit de paridad detecte el error vuelve a ser de 0,5. Ahora bien, si en vez de calcular el bit de paridad para cada fila lo hacemos para cada columna tomaremos bits no contiguos de la trama, con lo que

la probabilidad de que un error a ráfagas pase desapercibido es mucho menor; tendrían que fallar dos bits de una misma columna y no fallar ningún otro bit, por ejemplo. Si estadísticamente la probabilidad de que un error en una columna pase desapercibido es de 0,5, la de que esta situación se de en las 8 columnas es de $0,5^8$, es decir, 0,0039. En este caso una elección inteligente de los bits de paridad ha permitido aumentar considerablemente la fiabilidad del código sin reducir su eficiencia.

El objetivo esencial de los códigos de detección o corrección de errores consiste en optimizar los algoritmos de cálculo de los bits de control para que sean capaces de detectar el máximo número de errores posible con un número razonable de bits adicionales. Las técnicas matemáticas en que se basan estos algoritmos han sido objeto de exhaustivos estudios por parte de especialistas en teoría de la codificación, y no son fácilmente mejorables; como consecuencia de esto los algoritmos de detección y corrección de errores son una parte bastante estable dentro de los sistemas de transmisión de datos.

Los códigos de corrección de errores se denominan también *corrección de errores hacia adelante* o FEC (*Forward Error Control*) y los de detección se llaman códigos de *corrección de errores hacia atrás* o por realimentación (*feedback* o *backward error control*).

3.4.1 Códigos correctores de errores

Los códigos de corrección de errores siempre tienen una eficiencia menor que los de detección para el mismo número de bits, y salvo que el medio de transmisión tenga muchos errores no salen rentables; por ejemplo, supongamos que tenemos una tasa de errores de 10^{-6} (un bit erróneo por millón) y queremos enviar tramas con 1000 bits de información útil; con corrección de errores necesitaremos 10 bits de comprobación por cada trama (eficiencia de 0,99); con detección de errores cada trama deberá llevar únicamente un bit de comprobación (0,999 de eficiencia) y tendremos que retransmitir una trama de cada 1,000 (0,999 de eficiencia) lo cual da una eficiencia total de 0,998 ($0,999 * 0,999$). Por este motivo los códigos correctores sólo se utilizan cuando el medio físico no es suficientemente fiable y no es posible emplear códigos detectores, como ocurre en los casos siguientes:

- El canal de comunicación es simplex, es decir la comunicación sólo es posible en un sentido; en este caso el receptor no dispone de un mecanismo que le permita pedir retransmisión.
- Se realiza una emisión broadcast o multicast; aunque fuera posible pedir retransmisión en este caso sería inaceptable que el emisor tuviera que atender a todas las solicitudes que se le planteen.
- El funcionamiento en tiempo real de la aplicación no toleraría el retardo introducido por un mecanismo de reenvío.

El más conocido y utilizado de los códigos correctores es el conocido como Reed-Solomon (RS), que se utiliza por ejemplo en las emisiones MPEG-2 de televisión digital; el uso de códigos RS representa un overhead del 10% aproximadamente, pero permite por ejemplo en el caso de transmisiones vía satélite reducir la tasa de error de 10^{-5} a 10^{-9} .

La capacidad reparadora de los códigos correctores disminuye cuando aparece una gran cantidad de errores contiguos. Por desgracia muchas fuentes de error tienen tendencia a producir errores a ráfagas (interferencias por arranque de motores, por ejemplo). Para aumentar la eficiencia de los códigos correctores se utiliza la técnica denominada interleaving consistente en calcular el código corrector a partir de una secuencia de bits que no corresponde con la secuencia a transmitir, sino que ha sido alterada de determinada forma; el receptor realizará una alteración siguiendo el mismo algoritmo antes de aplicar el código corrector; en caso de producirse un error a ráfagas durante la transmisión es muy probable que los bits erróneos no se encuentren contiguos en la secuencia alterada, con lo que la corrección podrá aplicarse de manera más efectiva. El inconveniente de aplicar interleaving a la información es que el receptor no puede entregar los bits a medida que los recibe, sino que ha de esperar a tener la secuencia completa sobre la que pueda verificar el código corrector antes de pasar los datos correspondientes; cuanto mayor sea el grado de interleaving mayor es el retraso producido por este factor. El retardo introducido por interleaving ha de ser entre 20 y 40 veces el de la ráfaga que se desea evitar. Teóricamente sería posible corregir un error a ráfagas de una duración arbitrariamente grande realizando un interleaving suficientemente grande.

Otra forma de explicar el interleaving es mediante la siguiente analogía: supongamos que tenemos un fax que por una avería tiene tendencia a omitir fragmentos de líneas de texto cuando éste está escrito en formato vertical (retrato). Es bastante probable que los fragmentos omitidos correspondan a palabras enteras, en cuyo caso será muy difícil para el receptor adivinar su significado. Pero si escribimos el texto en horizontal (apaisado) los errores afectarán a letras de líneas diferentes (y por tanto de palabras diferentes), con lo que el receptor podrá fácilmente deducir las letras que faltan por el contexto. Por otro lado, mientras que cuando se enviaba en formato vertical el receptor podía ir leyendo líneas a medida que aparecían, cuando se envía en formato horizontal el receptor no puede leer nada de la página hasta que ésta le llega en su totalidad (por tanto sufre un retardo mayor en la recepción de la información).

3.4.2 Códigos detectores de errores (CRC)

El algoritmo de detección de errores más utilizado en la práctica se basa en lo que se conoce como *códigos polinómicos* (también llamados *códigos de redundancia cíclica* o *CRC*, *Cyclic Redundancy Check*). La idea básica es la misma que en el caso de los bits de paridad: añadir a los datos a transmitir unos bits adicionales cuyo valor se calcula a partir de los datos; la trama así construida se envía, y el receptor separa los bits de datos de la parte CRC; a partir de los datos recalcula el CRC y compara con el valor recibido; si ambos no coinciden se supone que ha habido un error y se pide retransmisión.

La aritmética polinómica tiene unas propiedades singulares que la hacen especialmente fácil de programar en sistemas digitales, por lo que es posible implementarla directamente en hardware con lo que se consigue una eficiencia elevada, cosa importante para evitar que la comunicación se ralentice por el cálculo del CRC. Veamos algunas de estas propiedades:

Supongamos la siguiente suma de polinomios:

$$\begin{array}{rcl}
 & X^7 + x^4 + x^3 + x + 1 & \text{que equivale a: } 10011011 \\
 + & X^7 + x^6 + x^3 + x & \text{que equivale a: } 11001010 \\
 \hline
 & x^6 + x^4 + 1 & \text{que equivale a: } 01010001
 \end{array}$$

Obsérvese como no se arrastra valor a la unidad superior. En la práctica el resultado de la suma es equivalente a haber efectuado un OR EXCLUSIVO bit a bit entre las dos cadenas.

En el caso de la resta la situación es idéntica:

$$\begin{array}{rcl}
 & X^6 + x^4 + x^2 + 1 & 01010101 \\
 - & x^7 + x^5 + x^3 + x^2 + x + 1 & 10101111 \\
 \hline
 & x^7 + x^6 + x^5 + x^4 + x^3 + x & 11111010
 \end{array}$$

ya que al utilizar módulo 2 la operación de dos valores iguales siempre da 0 y dos diferentes da 1.

En el caso de la división la operación se hace como en binario con la única peculiaridad de que la resta se hace módulo 2, como acabamos de ver.

Veamos paso a paso como se utiliza todo esto en una transmisión de datos con un ejemplo concreto:

1. En primer lugar el emisor y el receptor acuerdan un generador polinómico común $G(x)$, por ejemplo $x^4 + x + 1$ (que representaremos como 10011 o g); el primero y último bits de un generador polinómico siempre deben ser 1. El CRC siempre tiene una longitud un bit menos que el generador polinómico utilizado, por lo que en nuestro caso será de 4 bits.
2. Supongamos ahora que el emisor desea transmitir la cadena $c1$, formada por los bits 1101011011, que podemos ver como un polinomio de grado 9 (los datos a transmitir siempre deben tener mas bits que el generador polinómico utilizado). El emisor añade cuatro bits (en principio a 0) al final de los datos a transmitir, formando la cadena $c2$ 110010110110000; esto equivale a multiplicar la cadena por 2^4

3. El emisor divide la cadena $c2$ por el generador polinómico acordado (10011) usando las reglas de división binaria módulo 2 que antes hemos mencionado, y calcula el resto r , que es en este caso 1110.
4. El emisor resta el resto r de la cadena $c2$, formando así la cadena $c3$ 11010110111110. Obsérvese que, como la resta es una operación XOR sobre los cuatro últimos bits, en la práctica la resta se hace sencillamente sustituyendo los cuatro últimos bits de $c2$ por r . Al restar al dividendo el resto el valor obtenido es divisible por g .
5. La cadena $c3$ es transmitida al receptor.
6. El receptor recibe la cadena $c3$ y la divide por g . Si el resultado no es cero la transmisión se considera errónea y se solicita retransmisión.

Este algoritmo, que en principio puede parecer extraño y arbitrario, tiene tres características interesantes:

- Da un resultado predecible y reproducible, por lo que aplicado sobre unos mismos datos siempre dará el mismo resultado,
- Las operaciones utilizadas (desplazamiento, XOR, etc.) lo hacen muy fácil de implementar en hardware, y
- Suministra un mecanismo extremadamente flexible y robusto para la detección de errores, a través de la elección del generador polinómico adecuado.

Los generadores polinómicos más utilizados forman parte de estándares internacionales, y son los siguientes:

$$\begin{array}{ll}
 \text{CRC-12:} & x^{12} + x^{11} + x^3 + x^2 + x + 1 \\
 \text{CRC-16:} & x^{16} + x^{15} + x^2 + 1 \\
 \text{CRC-CCITT:} & x^{16} + x^{12} + x^5 + 1 \\
 \text{CRC-32:} & x^{32} + x^{26} + x^{23} + x^{16} + x^{12} + x^{11} + x^{10} + x^8 + x^7 + x^5 + x^4 + x^2 + x + 1
 \end{array}$$

CRC-12 se utiliza en los códigos con longitud de carácter de 6 bits; CRC-16 y CRC-CCITT se utilizan en conexiones WAN, mientras que CRC-32 se utiliza en conexiones LAN.

En todos los generadores utilizados aparece $x+1$ como factor, ya que esto asegura la detección de todos los errores con un número impar de bits. Un código polinómico de r bits detectará todos los errores a ráfagas de longitud $\leq r$. Un generador como CRC-16 o CRC-CCITT detectará todos los errores simples y dobles, todos los errores con un número impar de bits, todos los errores a ráfagas de longitud 16 o menor, 99,997% de los errores a ráfagas de 17 bits y 99,998% de los errores a ráfagas de 18 o más bits.

Cabría pensar en la posibilidad de que un error alterara la trama de tal forma que el CRC de la trama errónea coincidiera con el de la trama correcta (después de todo la probabilidad de que una trama distinta tenga el mismo CRC es 1/65536 para CRCs de 16 bits); los algoritmos de cálculo de CRCs intentan conseguir que las otras posibles tramas con igual CRC se encuentren muy alejadas (en términos de distancia Hamming) por lo que tendría que producirse una gran cantidad de errores en la misma trama para que esta posibilidad pudiera darse. En todo caso, cualquier protocolo de nivel de enlace fallará si se produce un error que no pueda ser detectado por el CRC.

3.5 PROTOCOLOS DE ENLACE ELEMENTALES

La principal característica que diferencia los protocolos de nivel de enlace es su comportamiento frente a los errores. Cuando el receptor detecta una trama errónea puede hacer una de las dos cosas siguientes:

1. Descartar silenciosamente la trama errónea sin notificarlo a nadie.
2. Solicitar del emisor la retransmisión de la trama errónea.

En el primer caso, es decir cuando no se realiza retransmisión de tramas erróneas el protocolo de enlace es trivial, por lo que normalmente esta opción casi no se comenta al hablar del nivel de enlace y se le dedica poco o ningún espacio en los libros de texto. En cambio se suelen explicar con todo detalle las diversas variantes de protocolos de enlace con retransmisión. Esto provoca lógicamente que al hablar de protocolos a nivel de enlace casi siempre se piense exclusivamente en los que realizan retransmisión de tramas erróneas. Paradójicamente este tipo de protocolos de enlace es hoy en día la excepción y no la regla. Dada la elevada fiabilidad de la mayoría de los medios físicos actuales normalmente no es rentable solicitar comprobación y retransmisión de las tramas, ya que esto supondría realizar un proceso casi siempre inútil en cada nodo del trayecto. Será normalmente el protocolo de transporte el que se ocupe de solicitar la retransmisión en caso de error. En caso de error la información habrá viajado inútilmente hasta el host de destino, pero esta estrategia es más rentable cuando la tasa de errores es baja. En los casos en que la tasa de errores del medio físico es excesiva se prefiere incorporar en el nivel físico un mecanismo corrector de errores, lo cual se traduce en la práctica en un canal prácticamente libre de errores al nivel de enlace; esto es lo que ocurre por ejemplo en las comunicaciones por red conmutada vía módem gracias al estándar V.42, en las comunicaciones a través de redes GSM o en las transmisiones de televisión digital con el uso de códigos RS, como ya hemos comentado.

Hecha esta aclaración pasaremos ahora a comentar los diferentes tipos de protocolos de enlace con retransmisión.

3.5.1 Protocolo de parada y espera

Como caso más sencillo de protocolo con retransmisión tenemos el denominado de parada y espera, consistente en que el emisor espera confirmación o acuse de recibo después de cada envío y antes de efectuar el siguiente. El acuse de recibo, también llamado ACK (del inglés acknowledgement) sirve tanto para indicar que la trama ha llegado correctamente como para indicar que se está en condiciones de recibir la siguiente, es decir el protocolo incorpora también la función de control de flujo. Este tipo de protocolos donde el emisor espera una confirmación o acuse de recibo para cada dato enviado se denominan protocolos PAR (Positive Acknowledgement with Retransmission) o también ARQ (Automatic Repeat reQuest).

Cuando la trama recibida es errónea (cosa que el receptor podrá verificar gracias al CRC) no se produce ACK. Lo mismo sucede cuando la trama enviada se pierde por completo. En este caso el emisor, pasado un tiempo máximo de espera, reenvía la trama. Una optimización que se puede incorporar en el protocolo es el uso de acuse de recibo negativo o NAK (Negative Acknowledgement) cuando se recibe una trama errónea; de esta forma el emisor puede reenviar la trama sin esperar a agotar el tiempo de espera, con lo que se consigue una mayor utilización de la línea.

Supongamos que una de las veces lo que se pierde no es la trama enviada sino el mensaje de ACK; pasado el tiempo de espera el emisor concluirá erróneamente que la trama se ha perdido y la reenviará, llegando ésta duplicada al receptor; el receptor no tiene ningún mecanismo para detectar que la trama es un duplicado, por lo que pasará el duplicado al nivel de red, lo cual no está permitido en un protocolo de enlace. Una forma de que el receptor distinga los duplicados es numerar las tramas, por ejemplo con un campo de un bit podemos numerar las tramas en base 2 (0, 1, 0, 1, ...) que es suficiente para detectar los duplicados.

Aunque la transmisión de datos ocurre únicamente en un sentido, este protocolo requiere un canal dúplex para funcionar; como la comunicación no ocurre simultáneamente un canal semi-dúplex sería suficiente.

3.5.2 Acuse de recibo ‘piggybacked’

El protocolo de parada y espera que hemos visto transmitía datos en una sola dirección; el canal de retorno era utilizado únicamente para enviar los mensajes de acuse de recibo (ACK). Si tuviéramos que transmitir datos en ambas direcciones podríamos utilizar dos canales semi-dúplex con los protocolos anteriores, pero nos encontraríamos enviando en cada sentido tramas de datos mezcladas con tramas ACK.

La trama ACK contiene una cantidad mínima de información útil, pero ha de contener no obstante una serie de campos de control imprescindibles que ocupan mas bits que la propia información de ACK. Si se están transmitiendo datos en ambas direcciones resulta más eficiente, en vez de enviar el ACK solo en una trama, enviarlo dentro de una trama de datos; de esta forma el ACK viajará 'casi gratis' y se ahorrará el envío de una trama. Esta técnica se conoce con el nombre de *piggybacking* o *piggyback acknowledgement*; (en inglés piggyback significa llevar a alguien o algo a hombros o a cuestas).

Ahora bien, para 'montar' el ACK en una trama de datos es preciso que esta se envíe en un tiempo razonablemente corto respecto a cuando debería enviarse el ACK; de lo contrario el emisor, al ver que el ACK esperado no llega reenviará la trama, lo cual daría al traste con el pretendido beneficio del piggybacking; como no es posible saber de antemano cuando se va a enviar la siguiente trama de datos generalmente se adopta una solución salomónica: se espera un determinado tiempo y si el nivel de red no genera ningún paquete en ese tiempo se genera una trama ACK; en este caso el tiempo de espera debe ser sensiblemente inferior al timer de reenvío del emisor.

3.6 PROTOCOLOS DE VENTANA DESLIZANTE

Los protocolos de parada y espera son sencillos de implementar, pero son poco eficientes. Veamos un ejemplo.

Supongamos que utilizamos una línea de 64 Kb/s para enviar tramas de 640 bits de un ordenador A a otro B que se encuentra a una distancia de 2.000 Km. A tarda 10 ms en emitir cada trama (640/64000) o, dicho de otro modo, transmite 64 bits cada milisegundo. Por otro lado los bits tardan 10 ms en llegar de A a B (recordemos que la velocidad de las ondas electromagnéticas en materiales es de unos 200.000 Km/s); justo cuando llega a B el primer bit de la primera trama A termina de emitirla (en ese momento la trama esta 'en el cable'); diez milisegundos más tarde B recibe la trama en su totalidad, verifica el CRC y devuelve el ACK; suponiendo que el tiempo que tarda B en verificar el CRC y generar el ACK es despreciable la secuencia de acontecimientos es la siguiente:

<u>Instante (ms)</u>	<u>Suceso en A</u>	<u>Suceso en B</u>
0 ms	Emite primer bit de trama 1	Espera
10 ms	Emite último bit de trama 1; espera	Recibe primer bit de trama 1
20 ms	Espera	Recibe último bit de trama 1; envía ACK
30 ms	Recibe ACK; emite primer bit de trama 2	Espera
...

A partir de aquí el ciclo se repite. De cada 30 ms se está transmitiendo 10 ms y esperando 20 ms, es decir se está utilizando la línea con una eficiencia de $10/30 = 0,33 = 33\%$.

La eficiencia obtenida depende de tres parámetros: la velocidad de la línea, v , el tamaño de trama, t , y el tiempo de ida y vuelta también llamado 'round trip time'; en el caso normal de que el tiempo de ida y el de vuelta son iguales definimos τ como el tiempo de ida, por lo que el tiempo de ida y vuelta es de 2τ . Podemos derivar una expresión que nos permita calcular la eficiencia a partir de estos valores:

$$\text{Eficiencia} = \frac{t/v}{(t/v) + 2\tau}$$

Que aplicada al ejemplo anterior resulta:

$$\text{Eficiencia} = (640/64000) / (640/64000 + 2*0,01) = 0,01 / (0,01 + 0,02) = 0,01 / 0,03$$

Si en vez de una línea de 64 Kb/s hubiera sido una de 2 ,048 Mb/s la eficiencia habría sido del 1,5%. Es evidente que los protocolos de parada y espera tienen una baja eficiencia en algunos casos. El caso extremo de ineficiencia se da cuando se utilizan enlaces vía satélite, en los que el valor de 2τ puede llegar a ser de medio segundo. Para aprovechar mejor los enlaces con valores elevados del tiempo de ida y

vuelta hacen falta protocolos que permitan crear un 'pipeline', o dicho de otro modo tener varias tramas 'en ruta' por el canal de transmisión.

Al tener varias tramas simultáneamente pendientes de confirmación necesitamos un mecanismo que nos permita referirnos a cada una de ellas de manera no ambigua, ya que al recibir los ACK debemos saber a que trama se refieren. Para ello utilizamos un número de secuencia; sin embargo como el número de secuencia va a aparecer en todas las tramas y los mensajes ACK nos interesa que sea lo menor posible; por ejemplo con un contador de 3 bits podemos numerar las tramas módulo 8 (0,1,2,...,7) con lo que es posible enviar hasta siete tramas (0...6) antes de recibir el primer ACK; a partir de ese punto podemos enviar una nueva trama por cada ACK recibido. Esto es lo que se denomina un protocolo de *ventana deslizante*.

Podemos imaginar el funcionamiento del protocolo de ventana deslizante antes descrito como un círculo dividido en ocho sectores de 45° cada uno, numerados del 0 al 7; sobre el círculo hay una ventana giratoria que permite ver los sectores correspondientes a las tramas pendientes de confirmación; la ventana puede abrirse como máximo 315°, es decir permite ver hasta siete sectores correspondientes a las tramas enviadas pendientes de confirmación. Cuando se recibe un ACK se envía otra trama y la ventana gira un sector.

El protocolo de parada y espera se puede considerar como un protocolo de ventana deslizante en el que se utiliza un bit para el número de secuencia; en este caso el círculo estaría formado por dos sectores de 180° cada uno, y la ventana tendría una apertura de 180°.

Suponiendo un retardo nulo en el envío de los bits y en el proceso de las tramas en los respectivos sistemas, así como una longitud nula de las tramas ACK, el tamaño de ventana mínimo necesario W para poder llenar un canal de comunicación puede calcularse con la fórmula:

$$W = 2\tau * v/t + 1$$

Debiendo redondearse el valor al entero siguiente por encima. En la fórmula anterior 2τ es el tiempo (en segundos) que tarda una trama en hacer el viaje de ida y vuelta (round-trip time), v es la velocidad del canal de transmisión y t el tamaño de la trama a transmitir. Por ejemplo para el caso del ejemplo anterior donde $2\tau = 0,02$, $v = 64000$ y $t = 640$ obtenemos $W = 3$, por tanto la ventana mínima es 3; con una línea E1 ($v = 2048000$) $W = 65$.

La suposición de que los tiempos de proceso y la longitud de las tramas ACK son despreciables no es correcta, por lo que en la práctica se consigue una mejora en el rendimiento incluso para valores de W bastante superiores al calculado en la fórmula anterior.

Independientemente del tamaño de trama, velocidad de la línea y tiempo de ida y vuelta, un protocolo de parada y espera nunca puede conseguir un 100% de ocupación de una línea.

Cuando se utiliza un protocolo de ventana deslizante con ventana mayor que uno el emisor no actúa de forma sincronizada con el receptor; cuando el receptor detecta una trama defectuosa puede haber varias posteriores ya en camino, que llegarán irremediablemente a él, aún cuando reporte el problema inmediatamente. Existen dos posibles estrategias en este caso:

- El receptor ignora las tramas recibidas a partir de la errónea (inclusive) y solicita al emisor retransmisión de todas las tramas a partir de la errónea. Esta técnica se denomina *retroceso n*.
- El receptor descarta la trama errónea y pide retransmisión de ésta, pero acepta las tramas posteriores que hayan llegado correctamente. Esto se conoce como *repetición selectiva*.

Siguiendo con la representación en círculo de los números de secuencia podemos imaginar el comportamiento de retroceso n como una ventana de tamaño uno en el lado del receptor, es decir el receptor solo aceptará recibir las tramas en estricta secuencia e irá desplazando su ventana una posición cada vez. En el caso de repetición selectiva el receptor tiene la ventana abierta el mismo número de sectores que el emisor.

3.6.1 Protocolo de retroceso n

En retroceso n el receptor procesa las tramas en estricta secuencia, por lo que sólo necesita reservar espacio en buffers para una trama. En cambio en repetición selectiva el receptor ha de disponer de espacio en el buffer para almacenar todas las tramas de la ventana, ya que en caso de pedir retransmisión tendrá que intercalar en su sitio la trama retransmitida antes de pasar las siguientes a la capa de red (la capa de red debe recibir los paquetes estrictamente en orden).

En cualquiera de los dos casos el emisor deberá almacenar en su buffer todas las tramas que se encuentren dentro de la ventana, ya que en cualquier momento el receptor puede solicitar la retransmisión de alguna de ellas.

Con un número de secuencia de n bits se puede tener como máximo una ventana de $2^n - 1$ tramas, no de 2^n . Por ejemplo, con un número de secuencia de tres bits el emisor puede enviar como máximo siete tramas sin esperar contestación. De esta forma se garantiza que el número de trama recibido en dos ACK sucesivos siempre será distinto y no habrá duda posible en la detección de duplicados que pudieran producirse por la expiración prematura de timers; si se utilizara una ventana de 2^n se podrían producir conflictos; por ejemplo si tenemos un bit para el número de secuencia y permitimos una ventana de tamaño 2 en el emisor podría ocurrir lo siguiente:

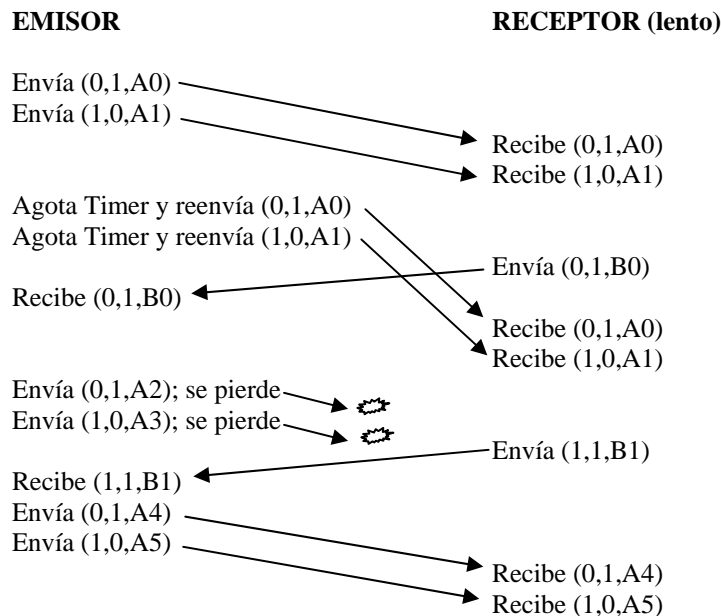


Figura 3.1.- Ejemplo del conflicto producido al utilizar una ventana de tamaño 2 con un número de secuencia de un bit. La notación utilizada corresponde a $(num_sec, num_ack, trama)$.

Con lo que el receptor obtendría duplicadas las tramas A0 y A1 sin posibilidad de detectarlo

3.6.2 Protocolo con repetición selectiva

La repetición selectiva aprovecha las tramas correctas que llegan después de la errónea, y pide al emisor que retransmita únicamente esta trama. Como los paquetes se han de transferir en orden a la capa de red cuando falla una trama el receptor ha de conservar en buffers todos los paquetes posteriores hasta conseguir correctamente la que falta; en la práctica esto requiere tener un buffer lo suficientemente grande para almacenar un número de tramas igual al tamaño de la ventana, ya que se podría perder la primera trama de la ventana y recibirse correctamente el resto, en cuyo caso habría de conservarlas hasta recibir correctamente la primera.

La posibilidad de una recepción no secuencial de tramas plantea algunos problemas nuevos. Por ejemplo, supongamos que con un número de secuencia de tres bits el emisor envía las tramas 0 a 6, las cuales son recibidas correctamente. Entonces el receptor realiza las siguientes acciones:

1. Las transmite a la capa de red,
2. Libera los buffers correspondientes
3. Avanza la ventana para poder recibir siete tramas más, cuyos números de secuencia podrán ser 7,0,1,2,3,4,5
4. Envía un ACK para las tramas 0 a 6 recibidas

Imaginemos ahora que el ACK no llega al emisor. Éste supondrá que ninguna de las tramas ha llegado, por lo que las reenviará todas de nuevo (tramas 0 a 6). De estas las tramas 0 a 5 se encuentran dentro de la ventana del receptor y son por tanto aceptadas; la trama 6 está fuera de rango y es ignorada. En procesamiento secuencial el receptor no aceptaría estas tramas si no recibiera antes la trama 7 pendiente, pero con retransmisión selectiva las tramas fuera de orden se aceptan y se pide retransmisión de la trama 7; una vez recibida ésta se pasaría a la capa de red seguida de las tramas 0 a 5 antes recibidas, que serían duplicados de las anteriores. Los duplicados no detectados serían pasados al nivel de red, con lo que el protocolo es erróneo.

La solución a este conflicto está en evitar que un mismo número de secuencia pueda aparecer en dos ventanas consecutivas. Por ejemplo con un número de secuencia de 4 bits (0-15) y tamaño de ventana 8 la ventana del receptor sería inicialmente 0-7, después 8-15, 0-7 y así sucesivamente. Al no coincidir ningún número de secuencia entre ventanas contiguas se puede efectuar el proceso no secuencial de tramas sin que ocurra el conflicto anterior. El valor máximo de la ventana para un protocolo de repetición selectiva en el caso general es $(MAX_SEQ+1)/2$.

Aunque el número de secuencia en repetición selectiva se duplica respecto a retroceso n el número de tramas que hay que mantener en el buffer no necesita ser superior al tamaño de ventana, ya que este será el número máximo de tramas que habrá que manejar en cualquier circunstancia.

Como es lógico la técnica de repetición selectiva da lugar a protocolos más complejos que la de retroceso n, y requiere mayor espacio de buffers en el receptor. Sin embargo, cuando las líneas de transmisión tienen una tasa de errores elevada la repetición selectiva da un mejor rendimiento, ya que permite aprovechar todas las tramas correctamente transmitidas. La decisión de cual utilizar se debería tomar valorando en cada caso la importancia de estos factores: complejidad, espacio en buffers, tasa de errores y eficiencia.

3.7 PROTOCOLOS DE NIVEL DE ENLACE REALES

Después de haber visto la teoría describiremos ahora algunos de los protocolos de enlace más comúnmente utilizados.

3.7.1 HDLC - High-level Data Link Control

Usando como base la técnica de ventana deslizante que hemos descrito IBM desarrolló en 1972 un protocolo de enlace denominado SDLC (Synchronous Data Link Control Protocol) para las redes SNA. Posteriormente IBM propuso SDLC para su estandarización a ANSI e ISO; cada uno de estos organismos estandarizó el protocolo introduciendo sus propias variantes sobre la propuesta inicial. En particular el protocolo desarrollado por ISO se denominó HDLC (High level Data Link Control) e introducía diversas mejoras sobre el protocolo originalmente desarrollado por IBM. La inmensa mayoría de los protocolos de enlace utilizados actualmente son subconjuntos del HDLC; una lista de los más representativos aparece en la tabla 3.1. Dada su importancia comentaremos ahora los aspectos más relevantes del protocolo HDLC.

Protocolo	Nombre completo	Utilización
HDLC	High level Data Link Control	Estándar ISO
ADCCP	Advanced Data Communications Control Procedure	Estándar ANSI
LLC	Logical Link Control	Estándar IEEE 802.2 para LANs
LAP-B	Link Access Procedure Balanced	X.25
LAP-D	Link Access Procedure D-channel	RDSI (Señalización)
LAP-F	Link Access Procedure for Frame Mode Bearer Services	Frame Relay
LAP-M	Link Access Procedure – Modem	Módems RTC (V.32, V.34, etc.)
PPP	Point to Point Protocol	Estándar Internet
SDLC	Synchronous Data Link Protocol	SNA (IBM)

Tabla 3.1.- Algunos miembros de la familia de protocolos de enlace HDLC

HDLC puede ofrecer dos tipos de servicio:

- No orientado a conexión y sin acuse de recibo. En este caso el receptor simplemente comprobará el CRC y descartará la trama si detecta que es errónea, pero no enviará ninguna notificación de este hecho al emisor. Como era de esperar en este caso el protocolo es muy simple.
- Orientado a conexión con acuse de recibo. En este caso se utilizará un mecanismo de ventana deslizante con retroceso n (o repetición selectiva en algunos casos). El número de secuencia es normalmente de tres bits, aunque algunas también se contempla la posibilidad de utilizar números de secuencia de 7 bits. En todos los casos el acuse de recibo viaja a ser posible en tramas de datos (ACK ‘piggybacked’).

Actualmente se utiliza casi siempre el servicio no orientado a conexión.

La estructura de la trama HDLC es la que aparece en la tabla 3.2.

Campo	Tamaño (bits)	Valor
Delimitador	8	01111110
Dirección	8	Variable
Control	8	Variable
Datos	≥ 0	Variable
Checksum	16	Variable
Delimitador	8	01111110

Tabla 3.2.- Estructura de trama de HDLC

La trama se delimita mediante la secuencia 01111110, y para asegurar la transparencia de datos se utiliza relleno de bits (bit stuffing), es decir, se intercala un bit a 0 cuando en la parte de datos aparece una secuencia de cinco bits a 1, procediendo de modo inverso en el lado receptor. En sistemas síncronos cuando la línea no está transmitiendo información útil se envía continuamente la secuencia 011111101111111011111110....

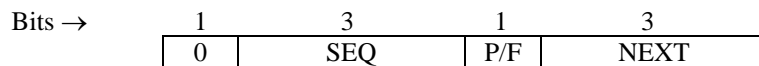
Cada trama puede tener cualquier longitud a partir de 32 bits (sin contar los delimitadores), pudiendo no ser múltiplo de 8, ya que no se presupone una estructura de bytes. Por esto se suele decir que HDLC es un protocolo *orientado al bit* (en contraste con los que requieren que la longitud de la trama sea múltiplo de 8, que se denominan *orientados al byte*).

El campo *checksum* es un CRC que utiliza el generador polinómico CRC-CCITT.

El campo *datos*, también llamado en ocasiones carga útil (*payload*) puede o no estar presente; puede contener cualquier información y tener cualquier longitud, si bien la eficiencia del checksum disminuye cuando la longitud aumenta.

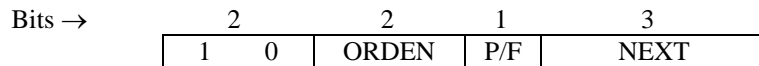
El campo *dirección* solo se utiliza en líneas multipunto. Las líneas multipunto son unas líneas hoy en día poco utilizadas en las que varios ordenadores o terminales comparten una misma línea física; dado que las líneas multipunto son a fin de cuentas un medio compartido para resolver el problema de acceso al medio se designa un ordenador que actúa como 'moderador' dando el turno de palabra a los demás. El campo dirección permite identificar a cual de todos los ordenadores o terminales que comparten la línea va dirigida la trama. Cuando se quiere enviar una trama a todas las estaciones (envío broadcast) se utiliza la dirección 11111111. En líneas punto a punto el campo dirección suele contener la dirección broadcast.

El campo *control* es realmente el corazón del protocolo. Cuando el primer bit es un cero indica que se trata de una trama de datos, también llamada de *información*. En ese caso la estructura de este campo es la siguiente:



- El subcampo SEQ contiene el número de secuencia de la trama.
- El subcampo P/F (Polling/Final) solo se utiliza en líneas multipunto y no lo comentaremos.
- El subcampo NEXT contiene el ACK 'piggybacked'; el convenio en este caso es que el ACK indica la siguiente trama que se espera recibir, no la última recibida (evidentemente se supone que esa trama habrá sido recibida correctamente).

Cuando el primer bit del campo control es un 1 y el segundo un 0 se trata de una trama de supervisión. Estas tramas se utilizan para enviar los ACK cuando no hay tráfico de datos suficiente y también para algunos mensajes de control. La estructura que tienen es la siguiente:



Según el valor del subcampo ORDEN las tramas de supervisión podrán enviar los siguientes cuatro comandos:

- **00** (Tipo 0): RECEIVE READY. Este es el nombre que recibe en el estándar el acuse de recibo (ACK). Este comando se utiliza cuando no hay tráfico de retorno suficiente para utilizar piggybacking.
- **01** (Tipo 1): REJECT. Corresponde al acuse de recibo negativo (NAK). Solicita retransmisión de una trama, y no acepta ninguna otra entretanto. Se utiliza cuando se emplea el mecanismo de retroceso n. La trama solicitada se especifica en el campo NEXT.
- **10** (Tipo 2): RECEIVE NOT READY. Indica un acuse de recibo (ACK) pero además solicita la suspensión del envío para evitar la saturación del receptor (control de flujo); el receptor enviará este mensaje cuando vea que tiene poco espacio para buffers. Para que la retransmisión se reanude el receptor deberá enviar más tarde un RECEIVE READY, REJECT o ciertas tramas de control.
- **11** (Tipo 3): SELECTIVE REJECT. Se utiliza para solicitar retransmisión de una trama determinada cuando se está empleando retransmisión selectiva. En este caso por tanto la ventana del emisor con un número de secuencia de tres bits no puede ser mayor de 4. Este mecanismo solo está previsto en HDLC y ADCCP, no en SDLC ni LAP-B.

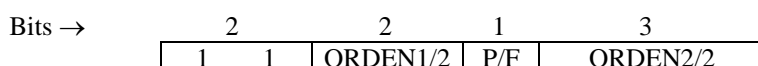
En todos los casos el subcampo NEXT indica la siguiente trama que se espera recibir (o la que no se espera recibir en el caso de RECEIVE NOT READY).

En HDLC y LAP-B existe un tipo de trama extendida en la que los números de secuencia son de 7 bits; en este caso es posible utilizar un tamaño de ventana de hasta 127 en la técnica de retroceso n o de 64 con la de repetición selectiva.

Existe en HDLC un tercer tipo de trama que es el que se da cuando los dos primeros bits son 1; este tipo de tramas se denomina no numeradas y se utilizan para dos funciones completamente diferentes:

- Establecer determinados parámetros de inicialización del protocolo.
- Cuando se utiliza el servicio no orientado a conexión, es decir sin ACK. En este caso no es necesario numerar las tramas ya que no se pedirá retransmisión en ningún caso, de ahí la denominación de trama *no numerada*.

La estructura del campo control en las tramas no numeradas es la siguiente:



En conjunto hay 5 bits que sirven para especificar diversos comandos que no detallaremos.

3.7.2 El nivel de enlace en la Internet

El modelo TCP/IP en sí mismo dice muy poco acerca del nivel de enlace. Esto es en parte consecuencia del principio básico de interoperabilidad que como hemos dicho estuvo presente en el diseño de TCP/IP. Durante muchos años TCP/IP no tuvo un protocolo de nivel de enlace propio o 'característico' y se ha limitado a transmitir datos utilizando otras redes de la mejor manera posible. Por ejemplo en la tabla 3.3 aparecen los estándares Internet que especifican el transporte de datagramas sobre algunas tecnologías de red muy conocidas. Resulta sorprendente que hasta 1990 no hubiera un protocolo estandarizado a nivel de enlace para el envío de datagramas sobre líneas punto a punto. Esto es lo que se intentó resolver con el protocolo PPP.

Medio	RFC	Año
X.25	877, 1356	1983
Ethernet	894	1984
802.x	1042	1988
FDDI	1188, 1390	1990
PPP	1171, 1663	1990
Frame Relay	1490	1993
ATM	1483, 1577	1994

Tabla 3.3.- Especificación del transporte de datagramas IP sobre diversas tecnologías

3.7.2.1 PPP (Point to Point Protocol)

PPP fue el desarrollo de un grupo de trabajo del IETF. El protocolo, elaborado en 1990, se encuentra especificado en los RFC 1661, 1662 y 1663.

PPP ha sido diseñado para ser muy flexible, por ello incluye un protocolo especial, denominado LCP (Link Control Protocol), que se ocupa de negociar una serie de parámetros en el momento de establecer la conexión con el sistema remoto.

Como puede verse en la tabla 3.4 la estructura de trama de PPP se basa en la de HDLC, salvo por el hecho de que se trata de un protocolo orientado a carácter, por lo que la longitud de la trama ha de ser un número entero de bytes

Campo	Tamaño (bytes)	Valor
Delimitador	1	01111110
Dirección	1	11111111
Control	1	00000011
Protocolo	1 ó 2	Protocolo
Datos	≥ 0	Variable
Checksum	2 ó 4	Variable
Delimitador	1	01111110

Tabla 3.4.- Estructura de una trama PPP

En función de las características del medio físico se aplicará relleno de bits, como en HDLC, o relleno de bytes (por ejemplo para transmisión por medios asíncronos). En cualquier caso el delimitador de trama es la secuencia 01111110.

El campo *dirección* no se utiliza. Siempre vale 11111111.

El campo *control* tiene por defecto el valor 00000011. Por defecto PPP suministra un servicio no orientado a conexión no fiable, es decir sin números de secuencia y acuses de recibo. Aunque no es lo normal, en el momento de establecer la conexión LCP puede negociar una transmisión fiable.

Salvo que se negocie una transmisión fiable los campos dirección y control contienen siempre la secuencia 1111111000000011. Para no transmitir estos dos bytes de información inútil en todas las tramas generalmente LCP negocia la supresión de estos dos bytes de las tramas al inicio de la sesión (salvo que se pida transmisión fiable).

El campo *protocolo* establece a que tipo de protocolo pertenece el paquete recibido de la capa de red. De esta forma PPP permite establecer una comunicación multiprotocolo, es decir puede utilizarse para transmitir paquetes pertenecientes a diferentes protocolos del nivel de red entre dos ordenadores simultáneamente. Entre las posibilidades se encuentra IP, IPX(Novell), Appletalk, DECNET, OSI y otros.

El campo *datos* es de una longitud variable hasta un máximo que negocia LCP al establecer la conexión; por defecto el tamaño máximo de trama es de 1500 bytes.

El campo *checksum* es normalmente de 2 bytes, pero puede ser de 4 si se negocia.

PPP puede utilizarse sobre medios físicos muy diversos, por ejemplo conexiones mediante módem/RTC, RDSI, líneas dedicadas, o incluso por conexiones SONET/SDH de alta velocidad (155 o 622 Mb/s por ejemplo).

Igual que ocurre en la vida real, la negociación entre dos LCPs puede dar lugar a que todos los valores propuestos sean aceptados por la otra parte, o sólo algunos de ellos. El protocolo establece mecanismos que permiten a los LCPs dialogar para llegar a un consenso en caso de discrepancia.

Existe otro componente de PPP que es el NCP (Network Control Protocol). Este se encarga de negociar los parámetros específicos para cada protocolo utilizado. Por ejemplo, en el caso de una conexión IP desde un usuario conectado vía módem le asigna dinámicamente una dirección IP; esto es especialmente útil cuando (como normalmente ocurre) el número de direcciones IP disponibles es menor que el número de usuarios del servicio (aunque por supuesto el número de direcciones IP disponibles debe ser suficiente para poder asignar una diferente a cada usuario simultáneo).

LCP permite utilizar diversos protocolos de autenticación, es decir que permiten validar al ordenador que llama (mediante el uso de claves tipo usuario/password). Esto resulta especialmente útil en el caso de conexiones por RTC, por ejemplo para proveedores de servicios Internet que han de facturar a sus usuarios en función del tiempo de conexión. El protocolo de autenticación más utilizado, conocido como CHAP (Challenge Handshake Protocol) utiliza el siguiente mecanismo:

1. El usuario se identifica ante el servidor con su código de usuario correspondiente.

2. El servidor envía al usuario una secuencia de caracteres arbitrariamente generada que el usuario debe transformar mediante un algoritmo de encriptado, usando como clave de encriptado su password.
3. Entretanto el servidor realiza el mismo proceso, es decir encripta la secuencia de caracteres seleccionada utilizando como clave de encriptado la password del usuario que se intenta identificar.
4. El usuario envía al servidor la secuencia encriptada y éste la compara con la suya; si ambas coinciden el servidor concluye que el usuario se ha identificado satisfactoriamente.

El uso de CHAP permite una identificación segura del usuario sin tener que enviar passwords por la red, evitando así los problemas de seguridad que esto supondría.

3.7.3 El nivel de enlace en Frame Relay

Frame Relay utiliza a nivel de enlace el protocolo denominado LAPF (Link Access Procedure for Frame-Mode Bearer Services, que podemos traducir como 'procedimiento de acceso al enlace para servicios portadores en modo trama'). LAPF es una variante simplificada de HDLC que suprime la parte correspondiente al reenvío de tramas en caso de error; se construye un CRC que permite al destinatario comprobar que la trama ha llegado correctamente, pero si detecta algún error descarta silenciosamente la trama sin informar de ello al emisor (se confía en que los niveles superiores se ocuparán de ello); además LAPF requiere que la longitud de la trama a transmitir sea siempre un número entero de octetos. En general LAPF es bastante similar a PPP.

LAPF practica el relleno de bits para conseguir la transparencia de los datos. Existen dos tipos de trama, la de control y la normal que es la que se utiliza para enviar datos. La estructura de una trama LAPF normal es la que aparece en la tabla 3.5:

Campo	Tamaño (bytes)	Valor
Delimitador	1	01111110
Dirección	2	Variable
Datos	0-8188	Variable
Checksum	2	Variable
Delimitador	1	01111110

Tabla 3.5.- Estructura de una trama LAPF (Frame Relay) normal

La esencia del funcionamiento de Frame Relay se encuentra en el campo Dirección, cuya estructura describiremos cuando volvamos a hablar de Frame Relay en el nivel de red.

3.7.4 El nivel de enlace en ATM

Como ya comentamos en el capítulo 1, lo que para nuestro modelo híbrido OSI-TCP/IP es el nivel de enlace corresponde en el modelo ATM a lo que se denomina la subcapa TC (Transmission Convergence, convergencia de la transmisión) y que en dicho modelo se incluye como parte de la capa física. La tarea fundamental de la subcapa TC es la obtención de las celdas provenientes de la capa ATM (capa de red) y su transformación en una secuencia de bits que pasa a la subcapa PMD (Physical Media Dependent) la cual los transmite por el medio físico, realizando por tanto la subcapa PMD la función del nivel físico en nuestro modelo.

3.7.4.1 Celdas de 48 bytes + cabecera

Merece la pena detenernos un momento a comentar la forma como se llegó a la decisión sobre el tamaño de las celdas ATM, ya que refleja el mecanismo que a menudo se sigue en la elaboración de estándares internacionales en materia de comunicaciones.

En el comité de la CCITT que elaboraba los estándares ATM existían dos grupos claramente diferenciados. Por un lado estaban los fabricantes de ordenadores y las empresas y organismos interesados en usar ATM para transmitir datos; estos eran reacios a utilizar un tamaño de celda pequeño, ya que esto introduce un elevado costo de proceso y una pérdida considerable de capacidad debido a las cabeceras que necesariamente ha de llevar cada celda. Este grupo proponía un tamaño de celda de 128 bytes

En la postura contraria se encontraban las PTTs europeas, cuyo objetivo era utilizar ATM para transmitir conversaciones telefónicas. Además de utilizar la técnica habitual PCM para digitalizar una conversación telefónica en un canal de 64 Kb/s, en ATM es bastante frecuente utilizar técnicas de compresión (por ejemplo la denominada ADPCM) que permiten meter el canal habitual en tan solo 32, o incluso 24 Kb/s. De esta forma es posible aprovechar aun mas la capacidad disponible.

Las PTTs proponían utilizar celdas de 16 bytes, ya que así una conversación podría generar una celda cada 2 ms si se usaba PCM, o cada 4 o 6 ms si se empleaba ADPCM. Con celdas de 128 bytes como proponían los fabricantes de ordenadores costaría 16 ms llenar una celda con una conversación PCM, y 32 o 48 ms con ADPCM; desde el punto de vista de los operadores europeos esto planteaba un problema importante, ya que el tiempo de llenado de la celda aumenta el retardo en la comunicación; cuando el retardo total extremo a extremo es mayor de 20 ms el efecto del eco producido es perceptible, ya que el retardo es equivalente al de una conexión de larga distancia; por tanto es preciso instalar costosos equipos de cancelación de eco.

Las compañías telefónicas estadounidenses no tenían ningún problema con la utilización de celdas de 128 bytes, ya que con distancias de miles de kilómetros y retardos de más de 30 ms en las comunicaciones costa a costa estaban ya acostumbrados desde hacía tiempo a instalar canceladores de eco en sus líneas. Pero las PTTs europeas, al trabajar con distancias menores de 2.000 Km, no han instalado canceladores de eco y en caso de haber optado por celdas de 128 bytes se habrían visto obligadas a hacer costosas inversiones, o a renunciar a la posibilidad de utilizar sistemas de compresión para transmitir la voz.

Después de muchas negociaciones cada bando cedió un poco en sus pretensiones. Las PTT accedieron a subir a 32 bytes el tamaño de celda, mientras que los fabricantes de ordenadores bajaron a 64 bytes. En ese momento la CCITT decidió zanjar la discusión partiendo la diferencia y fijando la celda en 48 bytes (más cabecera). Así utilizando ADPCM a 24 Kb/s el retardo puede llegar a ser de 18ms, que esta muy cerca del límite de 20 ms para que se produzca el eco (hay que tomar en cuenta que además habrá alguna longitud de cable cuyo retardo también influye).

3.7.4.2 Transmisión de celdas

Cada celda ATM tiene 5 bytes de cabecera, el último de los cuales es un checksum de los otros cuatro. La subcapa TC se ocupa de calcular el valor de dicho byte utilizando el polinomio generador $x^8 + x^2 + x + 1$. Este campo checksum se denomina HEC (Header Error Control).

La razón de hacer checksum de la cabecera únicamente es acelerar el proceso de cálculo; se supone que los niveles superiores harán corrección de errores si lo consideran apropiado (algunas aplicaciones, como el vídeo o audio, pueden soportar sin problemas una pequeña tasa de errores). También debemos tomar en cuenta el hecho de que ATM se diseñó pensando en las fibras ópticas, que son un medio de transmisión altamente fiable. Hay estudios que demuestran que la gran mayoría de los (ya pocos) errores que se producen en fibras ópticas son errores simples. El HEC detecta todos los errores simples y el 90% de los errores múltiples.

Una vez está en su sitio el HEC la celda está lista para transmisión. Existen dos tipos de medios de transmisión, los asíncronos y los síncronos. Los asíncronos simplemente transmiten cada celda cuando está preparada. Los síncronos por el contrario tienen que transmitir celdas con una periodicidad fija, y en

caso de no haber celdas útiles preparadas envían celdas de relleno o inútiles (también llamadas 'idle' cells).

Otro tipo de celdas 'anormales' (es decir, sin datos) son las denominadas celdas OAM (Operation And Maintenance). Estas son utilizadas por los conmutadores ATM para intercambiar información de control sobre la red, con la que es posible hacer labores de mantenimiento, tales como gestión de averías y de rendimiento. Sirven también para transmitir información del estado de la red, por ejemplo del grado de congestión. También se utilizan celdas OAM para 'saltar' el espacio ocupado por la información de control de una trama SONET/SDH.

3.7.4.3 Recepción de celdas

En el lado receptor la subcapa TC ha de tomar el flujo de bits entrante, localizar el principio y final de cada celda, verificar el HEC (y descartar las celdas inválidas), procesar las celdas OAM y las celdas inútiles, y pasar a la capa ATM las celdas de datos.

La detección del principio y final de cada celda se hace por mecanismos completamente distintos a los utilizados en HDLC. No existe ninguna secuencia de bits característica del principio y final de cada celda, pero si se sabe que cada celda ocupa exactamente $53 \times 8 = 424$ bits, por lo que una vez localizada una será fácil encontrar las siguientes. La clave para encontrar la primera celda está en el HEC: en recepción la subcapa TC captura 40 bits de la secuencia de entrada y parte de la hipótesis de que sea un principio de celda válido; para comprobarlo calcula el HEC aplicando el polinomio sobre los cuatro primeros bytes y comparando el resultado con el quinto; si el cálculo no es correcto desplaza la secuencia un bit y repite el cálculo; repitiendo este proceso como máximo 424 veces el TC localiza finalmente el principio de una celda, y a partir de ella todas las que le siguen.

Con un HEC de tan solo 8 bits la probabilidad de que un conjunto de bits elegido al azar resulte ser un HEC válido es de $1/256$, lo cual no es despreciable. Por ello el receptor cuando localiza un HEC válido, para asegurarse de que el resultado no ha sido fruto de la casualidad, repite el cálculo con el HEC siguiente (53 bytes después); haciendo esta comprobación con varias celdas sucesivas se puede reducir a un nivel despreciable la probabilidad de que el acierto haya sido pura casualidad. Por ejemplo si el HEC obtenido es correcto en cinco celdas consecutivas la probabilidad de que esto sea fruto de la casualidad es de $1/256^5$, o sea 10^{-12} aproximadamente.

Una vez localizado el principio de una celda el receptor ya puede sin problemas localizar todas las demás por su posición relativa, siempre que se mantenga el sincronismo. Podría ocurrir que como consecuencia de un error se introdujera o eliminara un bit en la secuencia, con lo que el receptor perdería el sincronismo. En tal caso el primer síntoma sería un HEC erróneo, pero un HEC erróneo también puede producirse por un bit erróneo, cosa más normal que un bit de más o de menos. Por esto cuando la TC detecta un HEC erróneo no supone inmediatamente que ha perdido el sincronismo; en principio considera que ha sido un bit erróneo, y se pone alerta ante la posibilidad de que la siguiente celda dé también un HEC erróneo, en cuyo caso la sospecha de pérdida de sincronismo crece. Si varias celdas consecutivas tienen un HEC erróneo la TC supone que ha perdido el sincronismo y empieza de nuevo el proceso antes descrito de detección de principio de celda.

Cabe pensar en la posibilidad de que un usuario genere, con o sin intención, flujos de datos con secuencias de 5 bytes que al incluirlos en celdas ATM contuvieran sistemáticamente HECs válidos; entonces la TC podría interpretar erróneamente la cabecera de celdas, y por tanto los datos. Para evitar esta posibilidad se altera el orden de los datos a enviar antes de transmitirlos de acuerdo con un patrón preestablecido; en el lado del receptor se aplica a los datos recibidos un patrón simétrico de reordenación, de forma que los datos se regeneran en el mismo orden en el que el usuario los envió. Este proceso, denominado 'scrambling' se realiza de forma que sea transparente y no afecte a los datos enviados por el usuario.

3.8 EJERCICIOS

1. Indique si es verdadera o falsa cada una de las siguientes afirmaciones:
 - a) En el funcionamiento normal de PPP en caso de detectar un error en el CRC el receptor pide retransmisión de la trama correspondiente.
 - b) En los protocolos a nivel de enlace las tramas siempre se numeran, aun cuando el protocolo no contemple la posibilidad de retransmisión en caso de pérdida o error en la trama.
 - c) Los protocolos de ventana deslizante que utilizan repetición selectiva son mas eficientes que los de retroceso n, pero requieren un mayor espacio para buffers en el lado del transmisor.
 - d) La decisión de fijar el tamaño de la celda ATM en 53 bytes se tomó en base a razones fundamentalmente políticas, no atendiendo a criterios técnicos.

2. Cuando el medio de transmisión tiene muchos errores es conveniente enviar tramas pequeñas, para reducir la cantidad de datos transmitidos; por el contrario cuando hay pocos errores es mejor utilizar tramas grandes, para reducir la cantidad de cabeceras. A la vista de esto cabría deducir que ATM que tiene una trama pequeña (tamaño de celda 53 bytes) fue diseñado para medios con muchos errores. Es correcta esta conclusión?

3. Se ha de transmitir mediante el protocolo HDLC la siguiente secuencia de bits:

01101111011111011111100

Diga cual sería la cadena de bits que realmente se transmitiría en el campo de datos de la trama. ¿Plantearía algún problema el hecho de que la longitud de la cadena a transmitir (22 bits) no sea un número entero de octetos?

4. Los CRCs utilizados en líneas WAN son normalmente de 16 bits. Calcule la probabilidad de que una cadena de 16 bits elegida al azar sea un CRC correcto para una trama.
5. Deduzca una expresión que permita calcular el tamaño de ventana mínimo necesario para poder aprovechar completamente una línea de transmisión con una capacidad de v bits por segundo, un tamaño de trama de t bits y una longitud de l Kilómetros. El medio de transmisión es fibra óptica. Suponga que los tiempos de proceso de las tramas son despreciables, así como la longitud de las tramas ACK. Suponga también que la contribución al tiempo de propagación de los equipos intermedios (repetidores, amplificadores, etc.) es despreciable. Utilice dicha fórmula para calcular el tamaño de ventana mínimo para una línea E1 con tramas de 2000 bits y una distancia de 200 Km.
6. Se quiere establecer un enlace E1 entre dos equipos mediante fibra óptica utilizando el protocolo HDLC con retroceso n y trama normal (no extendida). Se sabe que todas las tramas tendrán un tamaño (incluida la información de control) de 1 KByte. Suponiendo que todo el retardo se debe a la transmisión de la señal por la fibra diga cual será la distancia máxima a la que el enlace podrá operar al 100% de su capacidad. Considere despreciables los tiempos de generación de tramas y acuses de recibo (ACKs).
7. La red académica y de investigación de la Comunidad Valenciana se conecta a Internet mediante un PVC ATM suministrado por el servicio Gigacom de Telefónica. El equipo que se conecta físicamente a la línea OC3 de Telefónica es un conmutador ATM marca Cisco modelo Lightstream 1010, propiedad de la Universidad de Valencia, que comunica con otro conmutador ATM, este ya de

la red Gigacom; a partir de ahí la red Gigacom se ocupa de encaminar las celdas correctamente hacia su destino, en el otro extremo del PVC.

En el conmutador ATM de la Universidad de Valencia el comando SHOW INTERFACE muestra una serie de contadores que permiten averiguar, entre otras cosas, el estado de la conexión ATM a nivel de enlace. La ejecución de dicho comando en la consola del conmutador ha dado el siguiente resultado:

SHOW INTERFACE ATM0/1/2

```
ATM0/1/2 is up, line protocol is up
Hardware is oc3suni
Description: Linea de acceso con RedIRIS (Servicio GIGACOM)
MTU 4470 bytes, sub MTU 0, BW 156250 Kbit, DLY 0 usec, rely 255/255, load 1/255
Encapsulation ATM, loopback not set, keepalive not set
Last input 00:00:00, output 00:00:00, output hang never
Last clearing of "show interface" counters 4h
Queueing strategy: fifo
Output queue 0/40, 0 drops; input queue 0/75, 0 drops
1 minute input rate 3131000 bits/sec, 7381 packets/sec
1 minute output rate 748000 bits/sec, 1768 packets/sec
-> 59253444 packets input, 3140432532 bytes, 0 no buffer
   Received 0 broadcasts, 0 runts, 0 giants
-> 22 input errors, 23 CRC, 0 frame, 0 overrun, 0 ignored, 0 abort
   45065854 packets output, 2388490262 bytes, 0 underruns
   0 output errors, 0 collisions, 0 interface resets
   0 output buffer failures, 0 output buffers swapped out
```

Como puede ver por el campo 'Last clearing of "show interface" counters' los contadores llevan 4 horas sin ser puestos a cero. En el campo 'packets input' se indica el número de celdas ATM que han entrado por esa interfaz en ese tiempo, y en el campo 'CRC' aparece el número de errores de CRC que han ocurrido (obviamente el CRC solo se puede comprobar en el sentido entrante).

- a) Calcule a partir de estos datos el BER (Bit Error Rate) correspondiente al enlace físico entre el conmutador ATM de la Universidad de Valencia y el que le da acceso en Telefónica al servicio Gigacom.
- b) Usando como muestra este período de 4 horas calcule el número medio de celdas por hora que entran en la Comunidad Valenciana con un valor erróneo en el campo payload sin ser detectadas.

Suponga en todo momento que los bits erróneos se reparten de forma perfectamente homogénea en el flujo de bits transmitidos.

8. Suponga que tiene que transmitir un fichero de 1 MByte de un host a otro a través de una línea de 64 Kb/s. Cada octeto del fichero tiene el código decimal 80 (carácter ASCII 'P'). De alguna manera ha conseguido diseñar un protocolo que le permite transmitir el fichero en tramas HDLC, enviando en cada trama 2000 bits de información útil (en el campo datos), sin tener que añadir información de control adicional para los niveles superiores al de enlace. Calcule el número de tramas que ha de transmitir, la cantidad total de bits transmitidos y el tiempo que dura la transmisión. Suponga que la línea no tiene errores y que el tamaño de ventana utilizado es lo bastante grande como para que el emisor no suspenda la transmisión mientras espera recibir los ACK.

Suponga que tiene que transmitir otro fichero cuyos octetos contienen el código ASCII 231 (decimal). Cambiarían en algo los cálculos anteriores?

Suponga ahora que los ordenadores utilizan el código EBCDIC, en vez del código ASCII. Cambiarían en algo los cálculos? (Aunque sea código EBCDIC los octetos del fichero siguen conteniendo el valor 80, o 231 según el caso).

9. Una empresa de comunicaciones encarga a un programador diseñar un protocolo de enlace, de parada y espera, utilizando tramas con formato HDLC estándar, que sirva tanto para transmisión por fibra óptica como por GSM. Los expertos en fibras ópticas le aconsejan utilizar tramas lo más grande

posibles, ya que así se reducirá el overhead debido a la información de control; por el contrario, los responsables de transmisión GSM piden que las tramas sean pequeñas, pues de lo contrario la probabilidad de tramas erróneas aumenta, se producirán muchas retransmisiones y la eficiencia disminuirá.

Al recibir consejos tan contradictorios el programador decide utilizar un algoritmo autoadaptativo que empiece utilizando un tamaño de trama intermedio y analice las retransmisiones producidas; a partir de ese dato calculará la tasa de error o BER (Bit Error Rate) y ajustará el tamaño de trama al valor óptimo según las circunstancias en cada momento.

Deduzca una fórmula que permita al programador calcular el tamaño de trama óptimo en función del BER. Aplique entonces dicha fórmula para calcular el tamaño de trama óptimo para un BER de 10^{-3} . Por tamaño de trama óptimo se entiende aquel que de una mayor eficiencia de transferencia neta.

Haga las siguientes suposiciones:

- El emisor siempre dispone de datos a enviar.
- No se produce nunca relleno de bits.
- Los tiempos de generación, transmisión y propagación de las tramas (tanto de datos como de ACK) y de sus checksum se consideran despreciables.
- Considere que los bits erróneos se distribuyen de forma perfectamente homogénea en el flujo de bits transmitidos.

Discuta o comente de forma *cualitativa*, que influencia tendría en el tamaño de trama óptimo la supresión de la suposición c), es decir, la consideración de los tiempos de transmisión y propagación de las tramas (el tiempo de transmisión es lo que tarda el emisor en enviar la trama, el tiempo de propagación es lo que tarda el primer bit de ésta en llegar al receptor). Si para aumentar la eficiencia el programador decidiera utilizar un protocolo retroceso n con ventana 7 en el emisor cual sería, también de forma cualitativa, la consecuencia en el tamaño de trama óptimo.

Discuta o comente de forma *cualitativa* que influencia tendría en el tamaño de trama óptimo la supresión de la suposición d), es decir, el tomar en consideración el reparto no homogéneo de los bits erróneos (como de hecho ocurre en la realidad).

Suponga ahora que los bits erróneos se producen según una distribución de Poisson. Deduzca la fórmula que permita calcular el tamaño de trama óptimo en este caso. Aplíquela al caso de un BER de 10^{-3} y compare el resultado con el obtenido anteriormente.

INFORMACIÓN SUPLEMENTARIA:

- El BER de un canal de comunicación se define como:

$$\text{BER} = \frac{\text{bits erróneos transmitidos}}{\text{bits totales transmitidos}}$$

- En HDLC un mismo delimitador (01111110) puede ser simultáneamente final de una trama y principio de la siguiente.

3.9 SOLUCIONES

S1.-

- a) **Falsa.** Por defecto PPP no suministra transmisión fiable, con lo que si hay un error en el CRC la trama es simplemente descartada y no retransmitida.
- b) **Falsa.** Si no se prevé realizar retransmisiones no es necesario numerar las tramas, y hacerlo sería una tarea inútil. Por ejemplo el modo normal de funcionamiento de PPP no efectúa retransmisiones y utiliza el valor 00000011 en el campo control en todas las tramas, sin numerarlas. Por esto cuando una trama tiene este valor en el campo control se la denomina trama 'no numerada'.
- c) **Falsa.** En el transmisor ambos tipos de protocolo requieren el mismo espacio en buffers
- d) **Verdadera.** El valor de 53 bytes (48 + cabecera) lo adoptó la ITU como solución de compromiso entre el requerimiento planteado por las empresas de telecomunicaciones europeas (PTTs), que querían un tamaño de celda pequeño, y los fabricantes de equipos de comunicaciones y ordenadores que preferían uno grande.

S2.-

Desde luego que no. ATM fue diseñado pensando en el uso de medios de transmisión altamente fiables, hasta el punto de que no se verifican errores de transmisión salvo en la información de cabecera, que se considera crítica. El tamaño de celda de ATM se eligió pequeño para poder 'colar' con facilidad tráfico de alta prioridad (por ejemplo tráfico en tiempo real) que pueda aparecer en una línea de transmisión ocupada con tráfico menos urgente.

S3.-

El emisor intercala un bit a cero siempre que en el flujo de datos a enviar encuentra cinco unos seguidos (independientemente de cual sea el valor del siguiente bit en el flujo). Por tanto la cadena transmitida sería:

01101111011111**00**11111**0**100

(donde se han marcado en negrita los bits de relleno). No es problema que la cadena no sea un número entero de octetos, ya que HDLC es un protocolo orientado al bit.

S4.-

La probabilidad es de 1 en 65536 (2^{16}), es decir de 0,0000153.

S5.-

Para tener la línea siempre ocupada es preciso tener un tamaño de ventana que nos permita enviar datos durante el tiempo de ida y vuelta (2τ) igual a dos veces el tiempo de propagación (τ), sin esperar a un ACK. Como la velocidad de la luz en la fibra óptica es de aproximadamente 200.000 Km/s el valor de 2τ en segundos lo podemos calcular como:

$$2\tau = 2 * l / 200000$$

donde l es la longitud de la fibra en kilómetros.

El número de bits que se pueden transmitir en ese intervalo de tiempo será $v * 2\tau$, por lo que el número de tramas necesario será igual a $(v * 2\tau) / t$, redondeado al valor entero superior. Sin embargo no hemos tomado en consideración hasta aquí el hecho de que el ACK no se genera en cuanto llega el primer bit de la trama, sino cuando llega el último. Esto hace que el tamaño de ventana mínimo para conseguir que la línea no pare sea uno mas que el número de tramas necesarias para 'llenar' de datos la línea. Resumiendo:

$$\text{Tamaño de ventana} = (v * 2 * l) / (200000 * t) + 1$$

Debiendo redondearse al entero inmediato superior.

Para una línea E1 ($v = 2,048 \text{ Mb/s}$) con tramas de 2000 bits y una distancia de 200 Km será:

$$2048000 * 2 * 200 / (200000 * 2000) + 1 = 3,048$$

El tamaño mínimo de ventana en este caso sería **4**.

S6.-

La trama normal HDLC utiliza tres bits del campo control para el número de secuencia, por lo que éste puede tomar 8 valores (entre 0 y 7). Al utilizar retroceso n el máximo tamaño de ventana es uno menos que el número de secuencia, o sea 7 en este caso.

La distancia máxima a la que el enlace podrá operar al 100 % de eficiencia será aquella que permita tener en el 'cable' tres tramas de datos, ya que así aseguramos poder 'llenar' de datos el cable (tres tramas en cada sentido) y tener una trama mas para el ACK, por las razones expuestas en el problema 5.

El tiempo que tarda en transmitirse una trama de 1 Kbyte (8192 bits) es:

$$(8192 \text{ bits}) / (2048000 \text{ bits/s}) = 0,004 \text{ s} = 4 \text{ milisegundos}$$

Así pues, la distancia para que quepan 3 tramas será la correspondiente a un tiempo de propagación de 12 milisegundos, o sea:

$$200000 \text{ Km/s} * 0,012 \text{ s} = \mathbf{2400 \text{ Km}}$$

S7.-

- a) La única parte de las celdas ATM que contiene un CRC son los 5 bytes de la cabecera (el quinto byte es un CRC de los otros cuatro). La probabilidad de que haya algún bit erróneo en la cabecera es 40 veces superior al BER, por tanto:

$$\text{BER} = (\text{Errores_CRC} / \text{total_de_celdas}) / 40 = (23 / 59253444) / 40 = \mathbf{9,7 \times 10^{-9}}$$

- b) Total de celdas que entran por hora: $59253444 / 4 = 14,813 \times 10^6$

El campo payload no contiene CRC. Por tanto todas las celdas erróneas serán aceptadas. Como el campo payload tiene un tamaño de 48 bytes la proporción de celdas con el payload erróneo será $48*8=384$ veces superior al BER.

$$\text{Celdas con el payload erróneo aceptadas por hora: } 14,813 \times 10^6 \times 9,7 \times 10^{-9} \times 384 = \mathbf{55}$$

Los datos mostrados en este ejercicio fueron obtenidos de un caso real. Después de muchas averiguaciones se descubrió que había una avería en el conversor de fibra multimodo-monomodo conectado a esta interfaz. Desde que se resolvió ese problema la tasa de error es prácticamente cero, como es normal.

S8.-

$$1 \text{ MByte} = 1024 * 1024 * 8 = 8388608 \text{ bits}$$

$$\text{Tramas transmitidas: } 8388608 / 2000 = 4194,3 = \mathbf{4195 \text{ tramas}}$$

Serán 4194 tramas de 2000 bits y una de 608 bits.

Bits transmitidos: Como nos dicen que el emisor transmite de forma continuada suponemos que solo hay un delimitador entre trama y trama, con lo que la información de control es 40 bits por trama:

Información de control: $40 * 4195 =$	167800
Delimitador del final:	8
Datos:	8388608
TOTAL:	8556416

$$\text{Tiempo de transmisión: } 8556416 / 64000 = \mathbf{133,69 \text{ segundos}}$$

Con el carácter ASCII 231 (11100111) es preciso hacer relleno de bits en la unión entre cada carácter y el siguiente (111001111100111...); por tanto las tramas de 2000 bits (250 caracteres) llevarán 249 bits de relleno y la de 608 (76 caracteres) llevará 75.

El número de tramas será el mismo que en el caso anterior.

El número de bits de relleno será:

$$4194 * 249 + 75 = 1044381$$

$$\text{El número de bits transmitidos en este caso será: } 8556416 + 1044381 = \mathbf{9600797}$$

$$\text{Y el tiempo de transmisión: } 9600797 / 64000 = \mathbf{150,01 \text{ segundos}}$$

El uso de código EBCDIC no cambiaría los resultados anteriores, ya que el relleno de bits se haría de la misma forma en ambos casos independientemente del código utilizado.

S9.-

Vamos a deducir la fórmula para calcular el tamaño de trama óptimo en función del BER y de la información de overhead.

- **t** : longitud total de la trama
- **ov**: información de overhead (flag, dirección, control y checksum)
- **BER**: Bit Error Rate
- **E_{ov}** : eficiencia de la transferencia tomando en cuenta solamente el overhead, suponiendo una línea sin errores, BER = 0)
- **E_{BER}** : eficiencia de la transferencia tomando en cuenta únicamente la tasa de error, suponiendo un protocolo sin overhead, ov = 0)
- **E** = eficiencia real (tomando en cuenta overhead y errores)

La parte de datos de la trama (parte útil) es $t - ov$; por tanto E_{ov} será:

$$E_{ov} = \frac{t - ov}{t} = 1 - \frac{ov}{t}$$

BER es la probabilidad de que un bit sea erróneo; por tanto la probabilidad de que haya un bit erróneo en una trama es $t \cdot \text{BER}$, por lo que E_{BER} será:

$$E_{\text{BER}} = 1 - t \cdot \text{BER}$$

La eficiencia real tomando estos factores en cuenta será pues el producto de las dos expresiones anteriores:

$$E = E_{\text{ov}} \cdot E_{\text{BER}} = \left(1 - \frac{\text{ov}}{t}\right) \cdot (1 - t \cdot \text{BER}) = 1 + \text{ov} \cdot \text{BER} - \text{BER} \cdot t - \frac{\text{ov}}{t}$$

Para calcular el tamaño de trama que da una eficiencia máxima derivamos E respecto de t e igualamos a cero:

$$\frac{dE}{dt} = -\text{BER} + \frac{\text{ov}}{t^2} = 0$$

$$\frac{\text{ov}}{t^2} = \text{BER}$$

$$t = \text{SQRT}(\text{ov}/\text{BER})$$

Para saber si se trata de un máximo o de un mínimo calculamos la segunda derivada:

$$\frac{d^2E}{dt^2} = -2 \frac{\text{ov}}{t^3}$$

y vemos que es negativa para todo valor positivo de ov y t ; se trata por tanto de un máximo.

Con $\text{BER} = 10^{-3}$ y $\text{ov} = 40$ bits (HDLC) obtenemos:

$$t = \text{SQRT}(40 \cdot 1000) = \mathbf{200 \text{ bits}}$$

La eficiencia será en este caso:

$$E(t=200) = (1 - 40/200) \cdot (1 - 200 \cdot 10^{-3}) = 0,8 \cdot 0,8 = 0,64 = \mathbf{64\%}$$

Para comprobar que es un máximo calculemos la eficiencia para 199 y 201 bits:

$$E(199) = 0,79899 \cdot 0,801 = 0,63999$$

$$E(201) = 0,80099 \cdot 0,799 = 0,63999$$

Al ser el tiempo de proceso y de envío mayores que cero se producen esperas en la línea que reducen la eficiencia. El tiempo de envío tiene dos componentes: el **tiempo de transmisión** (lo que se tarda en enviar la trama) que depende de la velocidad de la línea y la longitud de la trama, y el **tiempo de propagación o retardo** (lo que tardan cada bit en llegar al destino una vez puesto en la línea) que depende de la distancia y de los equipos intermedios; el tiempo de transmisión es directamente proporcional al tamaño de la trama para una velocidad dada, por lo que *no afecta el tamaño óptimo*; el tiempo de propagación es el causante de las esperas por ACKs en un protocolo de parada y espera como el que nos ocupa, y es independiente del tamaño de trama, por lo que con un tamaño de trama mayor se tendrá menos tiempo de espera y mejorará la eficiencia; por tanto *tenderá a incrementar el tamaño de trama óptimo*. El tiempo de proceso tendrá una componente proporcional al tamaño de trama y una constante (cálculo del checksum, construcción de cabeceras, etc.); de manera análoga a

lo ocurrido con el tiempo de transmisión la parte proporcional no influirá en el tamaño óptimo, mientras que la consideración de la parte constante tenderá de nuevo a *incrementar el tamaño óptimo de la trama*.

Con un protocolo de ventana deslizante de tamaño 7 se produce un pipeline en la línea, con lo que el tiempo de propagación y el tiempo de transmisión se solapan; de esta forma se pueden reducir (o incluso eliminar) las esperas en la línea. Esto tenderá a reducir el tamaño de trama óptimo respecto a un protocolo de parada y espera. Por otro lado, el hecho de funcionar con retroceso n también provoca que el tamaño de trama óptimo sea menor ya que en caso de producirse un error se habrán de retransmitir normalmente varias tramas (hasta 7 en el caso mas desfavorable).

El reparto no homogéneo de los bits erróneos supone que estos se concentren en algun caso; habrá entonces alguna trama que tendrá más bits erróneos de lo que le corresponde, y a cambio alguna trama tendrá menos bits erróneos que los que en principio le corresponderían. Esto hace que de vez en cuando una trama que en principio debería tener un error sea correcta. El efecto será equivalente a una reducción del BER, por lo que *el tamaño de trama óptimo aumentará*.

Suponiendo que los bits erróneos se dan según una distribución de Poisson la probabilidad de que una trama de longitud t bits tenga exactamente r bits erróneos es:

$$p(x=r) = \frac{(t \cdot \text{BER})^r}{r!} e^{-t \cdot \text{BER}}$$

La probabilidad para $r = 0$ (trama correcta) es:

$$p(x=0) = e^{-t \cdot \text{BER}}$$

Con lo que:

$$E_{\text{BER}} = e^{-t \cdot \text{BER}}$$

$$E = E_{\text{ov}} \cdot E_{\text{BER}} = (1 - \text{ov}/t) \cdot e^{-t \cdot \text{BER}}$$

Para calcular el valor de t que maximiza E derivamos e igualamos a cero:

$$\frac{dE}{dt} = \frac{\text{ov}}{t^2} e^{-t \cdot \text{BER}} + \left(1 - \frac{\text{ov}}{t}\right) (-\text{BER}) \cdot e^{-t \cdot \text{BER}} = 0$$

$$\left(\frac{\text{ov}}{t^2} - \text{BER} + \frac{\text{BER} \cdot \text{ov}}{t} \right) \cdot e^{-t \cdot \text{BER}} = 0$$

$$\left(\frac{\text{ov}}{t^2} - \text{BER} + \frac{\text{BER} \cdot \text{ov}}{t} \right) = 0$$

$$\text{BER} \cdot t^2 - (\text{BER} \cdot \text{ov}) \cdot t - \text{ov} = 0$$

$$t = \frac{\text{BER} \cdot \text{ov} \pm \text{SQRT}((\text{BER} \cdot \text{ov})^2 + 4 \cdot \text{BER} \cdot \text{ov})}{2 \cdot \text{BER}}$$

La solución negativa da $t < 0$, por lo que es absurda y se descarta.

$$t = \frac{\text{BER} \cdot \text{ov} + \text{BER} \cdot \text{ov} \cdot \text{SQRT}(1 + 4/(\text{BER} \cdot \text{ov}))}{2 \cdot \text{BER}}$$

Dividiendo todo por BER :

$$t = \frac{ov + ov * \text{SQRT}(1 + 4/(BER * ov))}{2}$$

Para $ov = 40$ bits y $BER = 10^{-3}$ obtenemos:

$$t = 220,998 = \mathbf{221 \text{ bits}}; \quad E = 0,656610 = \mathbf{65,66 \%}$$

Comprobamos pues que el tamaño de trama y la eficiencia óptimos son algo mayores que los calculados antes con la suposición simplista.

Como normalmente $BER \ll 1$, entonces $4/(BER * ov) \gg 1$ por lo que se puede realizar la siguiente aproximación:

$$t = \frac{ov + ov * \text{SQRT}(4/(BER * ov))}{2 * BER} = \mathbf{ov/2 + \text{SQRT}(ov/BER)}$$

Para BER pequeño el término predominante es el segundo, con lo que la solución tiende a la obtenida inicialmente conforme el valor de BER se reduce; como era de esperar cuanto mas pequeño es BER menor es el error introducido por la suposición del reparto homogéneo.

Con esta fórmula simplificada obtenemos para $ov = 40$ bits y $BER = 10^{-3}$ los valores:

$$t = \mathbf{220 \text{ bits}}; \quad E = 0,6566 = \mathbf{65,66 \%}$$

Para $t = 200$ obtenemos $E = 0,6550$

4 REDES LOCALES

Autor: Rogelio Montañana

4	REDES LOCALES	4-1
4.1	INTRODUCCIÓN.....	4-3
4.2	PROTOCOLOS DE ACCESO MÚLTIPLE	4-3
4.2.1	Protocolos sin detección de portadora: ALOHA	4-3
4.2.1.1	Aloha ranurado	4-4
4.2.2	Protocolos con detección de portadora	4-5
4.2.2.1	CSMA 1-persistente	4-5
4.2.2.2	CSMA no persistente.....	4-5
4.2.2.3	CSMA p-persistente	4-6
4.2.2.4	CSMA con detección de colisión.....	4-6
4.2.3	Protocolos sin colisiones	4-6
4.2.3.1	Protocolo bitmap.....	4-7
4.2.3.2	Protocolo de cuenta atrás binaria	4-7
4.2.4	Protocolos de contención limitada.....	4-8
4.2.5	Protocolos de redes inalámbricas.....	4-9
4.2.5.1	MACA	4-9
4.3	REDES LOCALES Y ESTÁNDARES.....	4-10
4.4	ETHERNET	4-12
4.4.1	Historia de Ethernet.....	4-12
4.4.1.1	El Nacimiento	4-12
4.4.1.2	La alianza DIX.....	4-13
4.4.1.3	Las relaciones con IEEE y la estandarización	4-15
4.4.1.4	Nuevos tipos de cables	4-17
4.4.1.5	El cable de pares trenzados y el cableado estructurado	4-17
4.4.1.6	Puentes y conmutadores	4-18
4.4.1.7	Ethernet rápida.....	4-19
4.4.2	El medio físico.....	4-22
4.4.2.1	Cables de cobre.....	4-22
4.4.2.2	Fibras ópticas.....	4-23
4.4.2.3	Gigabit Ethernet y el retardo en modo diferencial	4-25
4.4.2.4	Códigos.....	4-27
4.4.2.5	Fiabilidad	4-29
4.4.3	Funcionamiento de Ethernet	4-30
4.4.3.1	Topología.....	4-30
4.4.3.2	Direcciones IEEE	4-32
4.4.3.3	La trama Ethernet	4-33
4.4.3.4	Colisiones	4-34
4.4.4	Rendimiento de Ethernet	4-36
4.4.4.1	Tasa de colisiones y rendimiento.....	4-36
4.4.4.2	Capacidad de Ethernet: mitos y realidades	4-37
4.4.4.3	Excesivas colisiones y colisiones tardías.....	4-40
4.4.4.4	Reparto no equilibrado de recursos y Efecto captura	4-41
4.4.5	Comparación con otras tecnologías	4-42
4.4.6	Futuro	4-43
4.4.7	Ethernet isócrona	4-45
4.5	ESTÁNDAR IEEE 802.5: TOKEN RING.....	4-45
4.5.1	El protocolo de subcapa MAC de Token Ring	4-46
4.5.2	Mantenimiento del anillo.....	4-49
4.6	FDDI (ANSI X3T9.5)	4-49
4.7	ESTÁNDAR IEEE 802.2: LLC.....	4-50
4.8	OTRAS REDES LOCALES	4-53
4.8.1	ESTÁNDAR IEEE 802.4: TOKEN BUS.....	4-53
4.8.2	Estándar IEEE 802.12: 100VG-AnyLAN	4-53
4.8.3	HIPPI - High Performance Parallel Interface (ANSI X3T9.3)	4-54

4.8.4	Fibre Channel (ANSI X3T11)	4-55
4.8.5	Estándar IEEE 802.6: MAN DQDB	4-56
4.9	REDES DE SATÉLITES	4-56
4.9.1	Polling	4-57
4.9.2	ALOHA	4-57
4.9.3	FDM	4-58
4.9.4	TDM	4-58
4.9.5	CDMA	4-59
4.10	REFERENCIAS	4-59
4.11	EJERCICIOS	4-60
4.12	SOLUCIONES	4-63

4.1 INTRODUCCIÓN

En el capítulo 1 vimos que las redes podían por su tecnología clasificarse en redes broadcast y redes formadas por enlaces punto a punto. En este último caso la información se envía al ordenador situado al otro lado del enlace, que está claramente identificado y el medio de transmisión normalmente está siempre disponible. Todos los protocolos de nivel de enlace que hemos visto en el capítulo anterior parten de estas dos suposiciones; a lo sumo en el caso de una conexión semi-dúplex el uso del canal se ha de alternar entre los dos ordenadores participantes.

En las redes broadcast hay una complejidad añadida. Dado que el canal de comunicación es compartido entre varios ordenadores, es preciso habilitar mecanismos que permitan a cada uno de ellos utilizarlo para enviar sus tramas al ordenador de destino. El hecho de compartir el canal generará conflictos o incluso pérdida de tramas en algunos casos; los protocolos deberán establecer los mecanismos adecuados para resolver dichos conflictos y permitir que los ordenadores retransmitan en caso necesario las tramas que no hayan podido ser enviadas correctamente.

Debido a esta característica singular de las redes broadcast la capa de enlace tiene en ellas una complejidad mayor que en las redes punto a punto, por lo que el modelo OSI se suele dividir en este caso en dos subcapas: la inferior, que se ocupa de controlar esta nueva función de acceso al medio de transmisión que hemos comentado, se denomina subcapa MAC (Media Access Control); la superior, conocida como subcapa LLC (Logical Link Control) corresponde a las funciones de la capa de enlace comunes a todo tipo de redes como las que hemos visto en el capítulo anterior.

Aunque siguiendo en sentido ascendente el modelo OSI la subcapa MAC es previa a la subcapa LLC nosotros las veremos en orden inverso como hacen muchos libros de texto, porque resulta más fácil comprender primero el funcionamiento entre dos ordenadores unidos por un enlace punto a punto y abordar luego el problema más complejo de una comunicación entre múltiples ordenadores de una red broadcast.

Aunque la mayoría de las redes broadcast son redes locales y viceversa, existen algunas excepciones. Por ejemplo las redes vía satélite, que evidentemente no son redes locales, son redes broadcast. Inversamente las redes locales basadas en conmutación (por ejemplo HIPPI) no emplean un medio broadcast. En este capítulo abarcaremos tanto las redes locales utilicen o no un medio broadcast como las redes broadcast sean o no redes locales. Además en lo relativo a las redes locales abarcaremos no sólo el nivel de enlace sino también el nivel físico característico de cada una de ellas. Por último diremos también que no hablaremos en este capítulo de las redes locales basadas en ATM ya que eso corresponde claramente al nivel de red, que abordaremos en el capítulo correspondiente.

4.2 PROTOCOLOS DE ACCESO MÚLTIPLE

4.2.1 Protocolos sin detección de portadora: ALOHA

En 1970, cuando la red ARPANET solo llevaba unos meses en funcionamiento, un equipo de la Universidad de Hawai, dirigido por Norm Abramson, quería poner en marcha una red para interconectar terminales ubicados en las islas de Kauai, Maui y Hawaii, con un ordenador situado en Honolulu, en la isla de Oahu. Lo normal habría sido utilizar enlaces telefónicos, pero la baja calidad y el elevado costo de las líneas hacían prohibitiva esta opción (por aquel entonces AT&T aún disfrutaba del monopolio de la telefonía en los Estados Unidos, lo cual no le estimulaba a bajar precios).

Abramson y su equipo estaban decididos a llevar a cabo su proyecto a toda costa, pero no a cualquier costo. Consiguieron varios transmisores de radio taxis viejos y construyeron módems de forma artesanal. Con esto pusieron en marcha una red de radioenlaces entre las islas. Si se hubiera asignado un canal diferente para la comunicación en cada sentido entre Oahu y las otras tres islas habrían hecho falta seis canales; en vez de eso asignaron solamente dos: uno a 413,475 MHz para las transmisiones de Oahu a las demás islas y otro a 407,350 MHz para el sentido inverso. Cada canal tenía un ancho de banda de 100

KHz y una capacidad de 9,6 Kb/s. En caso de haber creado seis canales en el mismo ancho de banda la capacidad de cada uno habría sido proporcionalmente menor; creando solo dos se disponía de una mayor capacidad a costa de tener que compartirlas entre las tres islas. Las transmisiones desde Oahu no planteaban problemas pues había un único emisor. Sin embargo el canal de retorno era compartido por tres emisores (Kauai, Maui y Hawaii), por lo que podía suceder que dos emisores transmitieran simultáneamente, con lo que se producía una **colisión** con lo que ambas tramas se perdían; había pues que establecer reglas que especificaran como se resolvía una situación de este tipo; estas reglas es lo que denominamos un protocolo de acceso al medio o protocolo MAC (Media Access Control).

La solución que adoptó Abramson fue muy simple. Cuando un emisor quiere transmitir una trama simplemente la emite, sin preocuparse en ningún momento de si el canal está libre; una vez ha terminado se pone a la escucha, esperando recibir confirmación de que la información ha sido recibida correctamente por el destinatario, cosa que éste puede comprobar mediante el CRC de la trama. Si pasado un tiempo razonable no se recibe confirmación el emisor supone que ha ocurrido una colisión; en este caso espera un tiempo aleatorio (para no colisionar nuevamente) y a continuación reenvía la trama.

Este protocolo MAC, que fue el primero en implementarse, se denominó **Aloha**. La red creada por Abramson en Hawaii se denominó ALOHANET. Aloha es una palabra Hawaiana que se utiliza para saludar, tanto al llegar como al despedirse. Seguramente esta ambigüedad pareció apropiada a sus inventores para indicar el carácter multidireccional o *broadcast* de la transmisión, por contraste con los enlaces punto a punto utilizados hasta entonces donde se sabe con certeza si la información va o viene.

En el protocolo Aloha original la emisión de tramas por parte de cada ordenador o estación se hace de forma completamente caótica y basta que dos tramas colisionen o se solapen solamente en un bit para que ambas sean completamente inútiles, a pesar de lo cual tanto la primera como la segunda serán irremediablemente transmitidas, ya que los emisores sólo se percatarán del problema después de haber terminado la transmisión; además la segunda trama podría colisionar con una tercera, y así sucesivamente; en una red Aloha cuando el tráfico crece las colisiones aumentan de manera no lineal y el rendimiento decae rápidamente.

4.2.1.1 Aloha ranurado

En 1972 Roberts propuso una mejora al protocolo Aloha que consistía en dividir el tiempo para la emisión de tramas en intervalos de duración constante. De alguna manera las estaciones estarían sincronizadas y todas sabrían cuando empezaba cada intervalo. Esto reduce la probabilidad de colisión, ya que al menos limita su efecto a un intervalo concreto (no se pueden 'encadenar' colisiones). A esta versión mejorada de Aloha se la denomina **Aloha ranurado**, porque utiliza tiempo ranurado o a intervalos. Por contraposición al Aloha original, con tiempo aleatorio, se le suele denominar Aloha *puro*.

La eficiencia de un sistema Aloha se puede estimar fácilmente si se supone que los emisores transmiten las tramas de acuerdo con una distribución de Poisson. En ese caso se puede demostrar con un razonamiento matemático-estadístico simple que el rendimiento máximo de un Aloha puro es del 18,4 %, y que esta eficiencia se consigue con una utilización del canal del 50%. Es decir que por ejemplo un canal de 10 Mb/s funcionando con Aloha puro daría su máxima eficiencia cuando las estaciones estuvieran enviando un tráfico de 5 Mb/s, del cual se transmitirían correctamente 1.84 Mb/s y los restantes 3,16 Mb/s se perderían por colisiones; si el nivel de utilización pasa del 50% el caudal útil transmitido disminuye. Para un Aloha ranurado, también con una distribución de Poisson, Abramson dedujo que la eficiencia máxima es justamente el doble, del 36,8 % y se consigue con una utilización del 100%. Así por ejemplo en un canal de 10 Mb/s con Aloha ranurado el máximo caudal útil que podría obtenerse es de 3,68 Mb/s y para ello sería preciso inyectar en la red 10 Mb/s de tráfico.

Los valores de eficiencia antes mencionados y la mayoría de las simulaciones que se han hecho de tráfico en redes locales se basan en la hipótesis de que las estaciones transmiten de acuerdo con una distribución de Poisson. La distribución de Poisson se utiliza en estadística para estudiar la probabilidad de eventos discretos que suceden de forma aleatoria entre la población y que pueden tener dos posibles valores o estados, por ejemplo la probabilidad de avería de un componente (bombilla fundida, pinchazo, etc.). En realidad la utilización de distribuciones de Poisson en las simulaciones de redes locales se debe más a la simplificación que esto introduce en el tratamiento matemático correspondiente que al parecido que dichas distribuciones puedan tener con la realidad. Hoy en día está universalmente aceptado que la

distribución de Poisson no representa adecuadamente el comportamiento del tráfico en redes locales, el cual corresponde a lo que los matemáticos denominan un proceso auto-similar o de tipo fractal en el que no se siguen patrones de distribución puramente aleatorios. Podemos comprender esto fácilmente de forma intuitiva si pensamos que en cualquier red local hay algunos ordenadores (por ejemplo servidores) que transmiten mucho más que otros, por lo que el tráfico no se genera de forma aleatoria. Una consecuencia de esta distribución menos aleatoria del tráfico es que la eficiencia de las redes locales suele ser mayor en la práctica de lo que cabría esperar según las simulaciones basadas en distribuciones de Poisson, ya que cualquier cambio que reduzca la aleatoriedad y aumente el orden redundará en beneficio de la eficiencia, de la misma forma que con Aloha ranurado se mejoraba el rendimiento al imponer un cierto orden frente a Aloha puro. Conviene por tanto no tomar demasiado en serio los estudios puramente teóricos sobre rendimiento de redes locales. Comentaremos de paso que actualmente se acepta que el tráfico en Internet corresponde también a procesos auto-similares, por lo que las simulaciones de tráfico Internet basadas en distribuciones de Poisson deberían también tomarse en consideración con gran cautela.

Los protocolos Aloha aún se utilizan hoy en día (normalmente Aloha ranurado) en situaciones donde no es posible o no es práctico detectar las colisiones en tiempo real, por ejemplo algunas redes de satélite o el canal de acceso aleatorio que se utiliza en las redes GSM para acceder al canal de control.

4.2.2 Protocolos con detección de portadora

En Aloha las estaciones se ponen a transmitir sin preguntar antes si el canal está libre. Veamos ahora protocolos más 'diplomáticos', que antes de transmitir miran si alguien ya lo está haciendo. Esto permite hacer un uso más eficiente del canal y llegar a mayores grados de ocupación, ya que no se interrumpe la transmisión en curso. Estos protocolos se denominan de acceso múltiple con detección de portadora o **CSMA** (*Carrier Sense Multiple Access*); la denominación 'detección de portadora' hace referencia a esa consulta previa sobre la ocupación del canal.

4.2.2.1 CSMA 1-persistente

En su nivel más primitivo el protocolo CSMA hace lo siguiente: cuando tiene una trama que enviar primero escucha el canal para saber si está libre; si lo está envía la trama; en caso contrario espera a que se libere y en ese momento la envía. Este protocolo se denomina *CSMA 1-persistente* porque hay una probabilidad 1 (es decir certeza) de que la trama se transmita cuando el canal esté libre.

En una situación real con tráfico intenso es muy posible que cuando un ordenador termine de transmitir haya varios esperando para enviar su trama; con CSMA 1-persistente todas esas tramas serán emitidas a la vez y colisionarán, pudiéndose repetir el proceso varias veces con la consiguiente degradación del rendimiento. En realidad la colisión ocurre aunque no empiecen a transmitir exactamente a la vez: basta con que dos ordenadores empiecen a transmitir con una diferencia de tiempos menor que la distancia que los separa, ya que en tal caso ambos detectarán el canal libre en el momento de iniciar la transmisión; por ejemplo, supongamos dos ordenadores unidos por un cable de un kilómetro de longitud, con lo que la señal tardará unos 5 μ s en llegar de uno al otro; si la diferencia de tiempo con la que ambos empiezan a transmitir es menor de 5 μ s se producirá una colisión, pues el segundo no habrá recibido la señal del primero a tiempo de evitarla. En este tipo de redes el retardo de propagación de la señal puede tener un efecto importante en el rendimiento.

A pesar de sus inconvenientes el CSMA 1-persistente supone un avance respecto al ALOHA ranurado, ya que toma la precaución de averiguar antes si el canal está disponible, con lo que se evitan un buen número de colisiones. Suponiendo una distribución de Poisson la máxima eficiencia puede llegar al 55% aproximadamente, obteniéndose ésta con un grado de ocupación del 100%.

4.2.2.2 CSMA no persistente

En un intento por resolver el problema de colisiones de CSMA 1-persistente podemos adoptar la estrategia siguiente: antes de enviar escuchamos, si el canal está libre transmitimos, pero si está ocupado, en vez de estar a la escucha, pendientes de usarlo en cuanto se libere, esperamos un tiempo aleatorio

después del cual repetimos el proceso; a este protocolo se le denomina *CSMA no persistente*. Este protocolo tiene una menor eficiencia que CSMA 1-persistente para tráfico moderado, pues introduce una mayor latencia; sin embargo se comporta mejor en situaciones de tráfico intenso ya que evita las colisiones producidas por las estaciones que se encuentran a la espera de que termine la transmisión de una trama en un momento dado.

4.2.2.3 CSMA p-persistente

CSMA p-persistente intenta combinar las ventajas de CSMA 1-persistente y CSMA no persistente. Este protocolo se aplica con tiempo ranurado o a intervalos y funciona de la siguiente manera: cuando el ordenador tiene algo que enviar primero escucha el canal, si está libre transmite, en caso contrario espera; cuando el canal se libera transmite con una probabilidad p (o no transmite con una probabilidad $q=1-p$); si no transmite en el primer intervalo el proceso se repite en el siguiente, es decir transmite con una probabilidad p , o no transmite con una probabilidad q . El proceso se repite hasta que finalmente la trama es transmitida o bien otro ordenador utiliza el canal, en cuyo caso espera un tiempo aleatorio y empieza de nuevo el proceso desde el principio.

Ajustando el valor del parámetro p el funcionamiento de este protocolo se puede regular en todo el rango entre el de CSMA 1-persistente y el de CSMA no persistente. Su eficiencia es en general superior a la de ambos.

4.2.2.4 CSMA con detección de colisión

En los protocolos que hemos descrito hasta ahora una vez se había empezado a transmitir una trama el ordenador seguía transmitiendo aun cuando detectara una colisión. En ese caso sería lógico y más eficiente parar de transmitir, ya que la trama será errónea e inútil. Esta mejora es la que incorporan los protocolos conocidos como **CSMA/CD** (Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection, acceso múltiple detección de portadora con detección de colisiones) que se utiliza en la red local IEEE 802.3, también conocida como Ethernet, en sus múltiples variantes.

En una red CSMA/CD la única circunstancia en la que puede producirse una colisión es cuando dos ordenadores empiezan a transmitir a la vez, o con una diferencia de tiempo lo bastante pequeña como para que la señal de uno no haya podido llegar al otro antes de que éste empiece a transmitir. Supongamos que tenemos dos ordenadores A y B situados en extremos opuestos de la red y que la señal tarda un tiempo τ en propagarse de uno a otro extremo a otro; cabría pensar que si A empieza a transmitir pasado ese tiempo τ ya puede estar seguro de que no observará colisiones, ya que su señal ha llegado al otro extremo de la red; pero en el caso más desfavorable B podría haber empezado a transmitir justo en el instante $\tau-\epsilon$, o sea inmediatamente antes de que le haya llegado la trama de A; por lo que sólo después de un tiempo 2τ puede A estar seguro de no colisionar con ninguna otra estación, habiéndose entonces ‘apoderado’ del canal de transmisión. Dado que el período de incertidumbre en CSMA/CD se reduce a ese intervalo 2τ estas redes se suelen modelar como un sistema ALOHA ranurado con intervalos de tamaño 2τ .

4.2.3 Protocolos sin colisiones

En cualquiera de los protocolos que hemos visto hasta ahora puede haber competencia entre ordenadores por acceder al medio. Dicha competencia produce colisiones, que en la práctica suponen una disminución del rendimiento ya que las transmisiones que se producen durante la colisión son inútiles; estos efectos se agravan a medida que aumenta el tráfico en la red, ya que la probabilidad de colisiones aumenta. Las cosas mejoran a medida que refinamos el protocolo, pero incluso con CSMA/CD cuando la ocupación del canal es elevada el rendimiento empieza a bajar.

Vamos a estudiar ahora protocolos que por su funcionamiento no tienen colisiones, y que suelen tener por tanto una mayor eficiencia cuando la carga de la red es elevada.

4.2.3.1 Protocolo bitmap

Si los protocolos basados en colisiones se parecen a una reunión de vecinos donde el orden es casi nulo, el protocolo bitmap se asemeja a una sesión del parlamento (sin presidente), donde cada representante solicita turno de palabra de acuerdo con unas rígidas reglas.

Supongamos que la red tiene N ordenadores, numerados de 0 a $N-1$. Para empezar a funcionar establecemos una ronda 'exploratoria' de N intervalos en la que por riguroso turno cada ordenador, empezando por el 0, tiene la posibilidad de enviar un bit con el valor 1 ó 0 para indicar si tiene alguna trama que transmitir. Pasados N intervalos todos los ordenadores han podido manifestar su situación, y todos saben quien tiene tramas para transmitir.

Supongamos que tenemos 8 ordenadores, y que después de la ronda inicial sabemos que los ordenadores 1, 3 y 7 tienen tramas para transmitir. A continuación toma la palabra el ordenador 1, que transmite la trama que tenía pendiente. Después vendrá el 3 y por último el 7. Agotados los turnos que había solicitados se inicia otra ronda de sondeo para saber quien tiene tramas pendientes de transmitir, y así sucesivamente.

Puede suceder que a algún ordenador le surja la necesidad de transmitir una trama justo después de haber dejado pasar su turno; en tal caso tendrá que esperar a la siguiente vuelta.

Desde el punto de vista del rendimiento este protocolo genera una trama adicional de N bits. Si la red no tiene tráfico se generará una trama bitmap que estará continuamente dando vueltas por la red. Si la carga en la red es baja (una trama transmitida por vuelta) la eficiencia es $d/(N+d)$, donde d es el tamaño de la trama de información transmitida y N el número de ordenadores. Si la red está saturada cada ordenador tendrá una trama que enviar y la eficiencia será $Nd/(Nd+N)$, o sea $d/(d+1)$. Vemos pues que el rendimiento de este protocolo aumenta a medida que lo hace el tráfico en la red, justo lo contrario de lo que ocurría con los protocolos basados en colisiones.

Además de la eficiencia global del protocolo podemos analizar la calidad de servicio que cada ordenador percibe. En principio cuando un ordenador quiere enviar algo, suponiendo que la red esté muy poco cargada tendrá que esperar una media de $N/2$ turnos para poder expresar su deseo, en ese instante reserva su 'plaza'. Si se trata del ordenador 0 tendrá además que esperar N intervalos más para que se efectúe la ronda y se transmita su trama, lo cual da un tiempo de respuesta de $1,5N$ intervalos. En cambio si se trata del ordenador N la trama se transmitirá inmediatamente; suponemos que al estar la red muy poco cargada nadie mas reserva sitio, por lo que al terminar la ronda exploratoria se va directamente a satisfacer la petición, por tanto el tiempo de respuesta es de $0,5N$ intervalos. Vemos pues que en situaciones de poco tráfico el protocolo bitmap no da un trato equitativo, sino que favorece a los ordenadores con dirección elevada. En cambio en situaciones de saturación este efecto desaparece, ya que si todos los ordenadores tienen tramas que enviar cada uno podrá transmitir una trama cada vez.

En situaciones de saturación donde todos los ordenadores tienen tramas que transmitir, y suponiendo que todas las tramas tienen el mismo tamaño el protocolo bitmap produce un reparto equitativo, por lo que resulta equivalente a utilizar multiplexación por división en el tiempo para repartir el canal entre los ordenadores de la red.

Resumiendo, el protocolo bitmap resulta más eficiente y más homogéneo en su comportamiento a medida que la carga de la red aumenta.

Los protocolos como el que hemos descrito, en los que se emite un paquete indicando el deseo de transmitir información, se denominan *protocolos de reserva*.

4.2.3.2 Protocolo de cuenta atrás binaria

El protocolo bitmap requiere reservar un intervalo de un bit para cada ordenador. Con un número elevado de ordenadores esto puede suponer un costo elevado que lo haga impracticable. Veremos ahora una alternativa que resuelve ese inconveniente, el protocolo denominado *cuenta atrás binaria*.

Supongamos que tenemos una red con 16 ordenadores. Cada uno recibirá una dirección codificada en 4 bits. Supongamos ahora que los ordenadores 0010, 0100, 1001 y 1010 desean transmitir tramas. El protocolo de cuenta atrás binaria procede de la siguiente forma:

1. En el primer intervalo los cuatro ordenadores que desean transmitir envían a la red el primer bit de su dirección; el medio de transmisión está diseñado de tal forma que retransmite el OR de todos los bits transmitidos, es decir en este caso los cuatro ordenadores reciben un 1.
2. Al haber recibido un 1 los ordenadores 0010 y 0100 (que tienen un 0 en su primer bit) reconocen que hay ordenadores superiores a ellos en la competición y se retiran; los dos 'finalistas' envían a la red su segundo bit, que es cero para ambos; la red retransmite un cero.
3. Al haber recibido un cero los dos ordenadores siguen compitiendo y envían su tercer bit, un cero para 1001 y un 1 para 1010; la red retransmite un 1 y el ordenador 1001 se retira al ver que hay uno que le supera.
4. El ordenador ganador, el 1010, envía su trama.

El proceso se repite para los tres ordenadores restantes, y así sucesivamente hasta que eventualmente todos envían su trama. La eficiencia de este protocolo es $d/(d + \ln N)$, que para tráfico reducido supera al bitmap; además, el mecanismo de selección suministra la dirección del ordenador transmisor que a menudo es parte de la información que se pretende transmitir, con lo que incluso este overhead se aprovecha y la eficiencia puede ser del 100%.

4.2.4 Protocolos de contención limitada

Hemos visto que los protocolos con contención (es decir, con colisiones) son ideales cuando los niveles de tráfico son bajos, ya que tienen retardos pequeños y no introducen overhead; todos los datos transmitidos son tramas de información útil. En cambio, cuando el tráfico aumenta, es preferible perder una parte de la capacidad del canal en habilitar mecanismos que habiliten 'turnos de palabra', ya que de lo contrario no es posible utilizar el canal al máximo de sus posibilidades.

Cabría pensar en un protocolo ideal que contuviera lo mejor de ambos mundos. Debería ser lo bastante astuto como para funcionar de forma 'caótica' (es decir con colisiones) a bajos niveles de tráfico, y poner en marcha mecanismos de arbitraje riguroso en caso de que el tráfico aumente por encima de ciertos niveles considerados peligrosos, es decir, debería ser autoadaptativo. Este tipo de protocolos se denomina *protocolos de contención limitada*.

En caso de que la red tenga poco tráfico estos protocolos se comportarán según alguno de los protocolos con colisiones que hemos visto. Pero cuando se superen determinados umbrales de ocupación el protocolo dividirá el canal en intervalos asignando uno a cada ordenador, en riguroso turno. Este comportamiento es equivalente a realizar multiplexación por división en el tiempo sobre el canal. En la práctica suelen ser unos pocos ordenadores los que generan la mayor parte del tráfico (recordemos que el tráfico es auto-similar), por lo que lo ideal es identificar a los 'culpables' y aislarlos en intervalos propios, independientes del resto de los ordenadores; de esta forma esos ordenadores con tráfico elevado consiguen un buen rendimiento sin perjudicar a la mayoría 'silenciosa'. Precisamente la pronta identificación de esos 'culpables' es la clave del funcionamiento de estos protocolos. Los ordenadores no necesariamente han de ser identificados individualmente, es suficiente detectar un grupo con tráfico elevado (que presumiblemente contendrá algún 'sospechoso') y aislarlo del resto. Uno de los protocolos que funciona con este principio es el denominado *protocolo del paseo adaptativo por el árbol*.

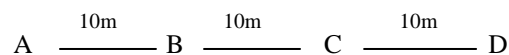
Aunque hay una gama muy amplia de protocolos MAC que han sido propuestos en teoría, modelados por simulación e incluso probados en redes experimentales, en la práctica las posibles opciones se reducen a un número muy pequeño. Además como veremos luego el protocolo MAC va implícito en la tecnología de red local utilizada, que muchas veces se decide en base otros factores, tales como costo, disponibilidad de productos, etc. por lo que el margen de maniobra en cuanto a la elección del protocolo MAC es prácticamente nulo.

4.2.5 Protocolos de redes inalámbricas

Las ondas electromagnéticas no guiadas son un medio ideal para la creación de redes broadcast; ya hemos visto como algunas de las primeras experiencias (Aloha) se hicieron con este tipo de medios de transmisión. Actualmente, con el auge de los sistemas móviles han aparecido redes locales basadas en ondas radioeléctricas e infrarrojos; los sistemas infrarrojos por sus características tienen un alcance reducido y requieren estricta visión directa entre emisor y receptor. Los de radio solo pueden transmitir a muy baja potencia (0,1 W) por restricciones legales, por lo que su alcance es también reducido, aunque no tanto como los infrarrojos. Normalmente se emplea la banda conocida como Industrial/Científica/Médica (2,4 - 2,484 GHz). Típicamente una LAN inalámbrica está formada por un conjunto de estaciones base, unidas entre sí por algún tipo de cable, y una serie de estaciones móviles que comunican con la estación base más próxima. El conjunto de estaciones base forma en realidad un sistema celular en miniatura.

Dado que la transmisión se realiza mediante ondas electromagnéticas podríamos pensar que nos encontramos ante un caso similar al de las redes Aloha. Sin embargo existen alternativas más eficientes que el Aloha para este tipo de entornos, como la que describimos a continuación.

Supongamos cuatro ordenadores A, B, C y D situados en línea y separados 10 metros cada uno del siguiente:



Supongamos también que el alcance máximo de cada uno de ellos es de 12 metros.

Ahora imaginemos que implementamos un protocolo CSMA para su comunicación; la secuencia de sucesos para transmitir una trama podría ser la siguiente:

1. A desea transmitir datos a B; al detectar el medio lo encuentra libre y empieza la transmisión.
2. Con A transmitiendo C desea transmitir datos hacia B; detecta el medio y lo encuentra libre (C no escucha a A pues esta a 20m de distancia), por tanto C empieza a transmitir.

El resultado es una colisión en el receptor (B) que no es detectada ni por A ni por C. Esto se conoce como el *problema de la estación oculta*.

Imaginemos ahora la misma distribución de estaciones y otra secuencia de sucesos:

1. B desea transmitir datos hacia A, detecta el medio libre e inicia la transmisión.
2. A continuación C desea transmitir datos hacia D; como detecta que B está transmitiendo se espera a que termine para evitar una colisión.

El resultado es que una transmisión que en principio podría haberse hecho sin interferencias (ya que A no puede escuchar a C y D no puede escuchar a B) no se lleva a cabo, reduciendo así la eficiencia del sistema. Esto se conoce como el *problema de la estación expuesta*.

4.2.5.1 MACA

MACA (Multiple Access with Collision Avoidance) es el protocolo MAC que ha servido de base para el estándar IEEE 802.11 que es el que especifica el funcionamiento de LANs inalámbricas. MACA resuelve los dos problemas antes mencionados de la siguiente forma:

1. Cuando una estación tiene una trama que transmitir antes de enviarla envía una trama pequeña de aviso (de 30 bytes) denominada RTS (Request To Send). La trama RTS contiene información sobre la longitud de la trama que se pretende transmitir y la estación de destino.

2. Al recibir la trama RTS la estación de destino, si está en condiciones de recibir la transmisión, responde con otra trama denominada CTS (Clear To Send). La trama CTS también indica la longitud de la trama que se va a recibir.

Ahora apliquemos este protocolo al caso de la estación oculta para ver que ocurre:

1. A transmite una trama RTS a B indicando la longitud de trama que desea enviarle.
2. B responde con una trama CTS que también especifica la longitud de la trama. En este momento C capta la respuesta de B, por lo que se percata de que va a tener lugar una transmisión en la que B actuará de receptor y sabe que deberá permanecer en silencio durante el tiempo que dure la transmisión (C sabe lo que durará pues conoce la longitud de la trama y la velocidad de la red).
3. A envía a B la trama correspondiente.

En el caso de la estación expuesta ocurriría lo siguiente:

1. B transmite a A una trama RTS indicando que quiere enviarle datos. En ese momento C se entera de las intenciones de B.
2. A devuelve a B una trama CTS. Entretanto C, que ha captado el RTS pero no el correspondiente CTS, comprende que aunque detecta que B está transmitiendo el destinatario está fuera de su alcance, por lo que puede comunicar con D cuando quiera, sin esperar a que B termine.

Hasta hace relativamente poco todos los productos LAN inalámbricos del mercado eran de un único fabricante. Sólo en fechas recientes se han estandarizado estos protocolos.

El comité 802.11 del IEEE estandarizó en 1997 varios sistemas basados en ondas de radio (1 y 2 Mb/s) y en luz infrarroja (1,2, 4 y 10 Mb/s).

En Europa el ETSI (European Telecommunications Standards Institute) está desarrollando otro estándar de LANs inalámbricas denominado HiperLAN, que pretende obtener velocidades de 10 a 20 Mb/s con un alcance de 50 metros utilizando ondas de radio.

4.3 REDES LOCALES Y ESTÁNDARES

Una vez descritos algunos ejemplos de protocolos MAC desde el punto de vista teórico vamos a estudiar las implementaciones prácticas que se han hecho de algunos de ellos en redes locales.

La mayoría de las redes locales han sido estandarizadas por el IEEE, en el comité denominado 802. Los estándares desarrollados por este comité están enfocados a las capas 1 y 2 del modelo de referencia OSI. Este comité se divide en subcomités, cuyo nombre oficial es 'Grupos de Trabajo', que se identifican por un número decimal. En total el comité 802 está formado por diversos grupos de trabajo que dictan estándares sobre LANs y MANs y se organizan de la siguiente forma:

- 802.1: Aspectos comunes: puentes, gestión, redes locales virtuales, etc.
- 802.2: Logical Link Control (LLC). En hibernación e inactivo
- 802.3: Redes CSMA/CD (Ethernet)
- 802.4: Redes Token-Passing Bus. En hibernación e inactivo
- 802.5: Redes Token Ring
- 802.6: Redes MAN DQDB (Distributed Queue Dual Bus). En hibernación e inactivo
- 802.7: Grupo asesor en redes de banda ancha. En hibernación e inactivo.
- 802.8 Grupo asesor en tecnologías de fibra óptica
- 802.9: Redes de servicios Integrados (Iso-Ethernet). En hibernación e inactivo
- 802.10: Seguridad en estándares IEEE 802. En hibernación e inactivo.
- 802.11: WLAN (Wireless LANs)
- 802.12: Redes Demand Priority (100VG-AnyLAN). En hibernación e inactivo
- 802.14: Redes de TV por cable, pendiente de ratificación. Disuelto.

- 802.15: WPAN (Wireless Personal Area Network)
- 802.16: BWA (Broadband Wireless Access)

El 802.1 describe aspectos generales, de arquitectura o aspectos comunes a todas las LANs, por ejemplo gestión y el funcionamiento de puentes. El 802.2 describe la subcapa LLC (Logical Link Control), también común a todas las redes 802. La mayoría de los demás grupos de trabajo (802.3, .4, .5, .6, .9, .11, .12, 14, 15 y 16) tienen que ver con diversas tecnologías LAN o MAN. Cada uno de ellos especifica el nivel físico y la subcapa MAC correspondiente. Por ejemplo el estándar 802.3 describe el nivel físico y el subnivel MAC de la red con protocolo MAC CSMA/CD, mas conocida como Ethernet.

Como se puede observar, el hecho de haber evitado el número 13 en la creación de los grupos no ha librado de su fatídico destino al grupo que ocupa la decimotercera posición. Este grupo se disolvió en mayo del 2000 sin llegar a ratificar ningún estándar vista la poca viabilidad comercial que éste habría tenido.

Los grupos de trabajo 802 no son algo estático; continuamente se están planteando para su estandarización nuevas técnicas y protocolos, nuevos medios físicos, etc. Cuando surge una nueva propuesta el grupo de trabajo correspondiente nombra un grupo de estudio que la analiza, y si el informe es favorable se crea un 'subgrupo' de trabajo (llamado oficialmente proyecto) que eventualmente propone una adenda al estándar para su aprobación. Los proyectos se identifican por letras añadidas al grupo de trabajo del que provienen. A título de ejemplo detallamos a continuación algunos de los proyectos más relevantes del comité 802:

- 802.1D: puentes transparentes
- 802.1G: puentes remotos
- 802.1p: Filtrado por clase de tráfico (Calidad de Servicio)
- 802.1Q: Redes locales virtuales (VLANs)
- 802.3u: Fast Ethernet
- 802.3x. Ethernet Full dúplex y control de flujo
- 802.3z: Gigabit Ethernet
- 802.3ab: Gigabit Ethernet en cable UTP-5
- 802.3ad: Agregación de enlaces

Normalmente todos los estándares IEEE 802 son aprobados más tarde por el ANSI y por la ISO, convirtiéndose así en estándares internacionales. La ISO les da la denominación 8802.x, así por ejemplo el estándar ISO 8802.3 es equivalente al IEEE 802.3

Existen algunas tecnologías de red local que siguen fielmente la arquitectura IEEE 802 pero que han sido estandarizadas por el ANSI y no por el IEEE. Estos estándares, que se han caracterizado por emplear tecnologías muy avanzadas en el momento de su aprobación, son los siguientes:

- X3T9.3: HIPPI
- X3T9.5: FDDI
- X3T11: Fibre Channel

A fin de dar una idea orientativa de los costes de las diversas tecnologías de red local incluimos en la tabla 4.1 los precios aproximados de las tarjetas adaptadoras de red para PC (bus PCI) ofrecidas en 1998 por 3Com, un fabricante líder del sector y por una segunda marca (Accton). Se incluyen también a efectos comparativos las tarjetas de red ATM, ya que aunque ATM no es una red local propiamente dicha se puede utilizar para dicha función.

Tarjetas de red (bus PCI)	3Com (feb. 1998)	Accton (feb. 2000)
10BASE-T (bus ISA)	12.614	2.600
100BASE-TX	20.323	3.400
100BASE-T4	28.908	
Token Ring (16 Mb/s)	34.865	
ATM 25 Mb/s	56.940	
ATM 155 Mb/s UTP-5	95.484	
1000BASE-T		90.000
1000BASE-SX (1999)	110.000	
ATM 155 Mb/s Fibra MM	121.764	
FDDI SAS	226.884	
FDDI DAS	314.484	

Tabla 4.1.- Precio de las tarjetas de red local para PC

Empezaremos nuestro estudio por las dos redes locales más utilizadas y conocidas, Ethernet y Token Ring. Además de ser las más extendidas su diferente protocolo MAC las convierte en ejemplos contrapuestos interesantes. Nos extenderemos más en el caso de Ethernet debido a su mayor implantación y mayores perspectivas de futuro.

4.4 ETHERNET

Según IDC a finales de 1997 mas del 85% de las conexiones de red instaladas en el mundo eran Ethernet, lo cual representa unos 118 millones de ordenadores. El 17% restante estaba formado por Token Ring, FDDI, ATM y otras tecnologías. Todos los sistemas operativos y aplicaciones populares son compatibles con Ethernet, así como las pilas de protocolos tales como TCP/IP, IPX, NetBEUI y DECnet.

Las previsiones para 1998 eran de que el 86% de las nuevas conexiones LAN fueran Ethernet, lo cual supone mas de 48 millones de interfaces de red y otros tantos puertos de concentradores y conmutadores. Las ventas de ATM, FDDI, Token Ring y otras tecnologías conjuntamente serían de 5 millones de interfaces y 4 millones de puertos, un 10 y un 7% del total respectivamente.

4.4.1 Historia de Ethernet

4.4.1.1 El Nacimiento

En 1970, mientras Abramson montaba ALOHANET en Hawaii, un estudiante recién graduado en el MIT llamado Robert Metcalfe se encontraba realizando sus estudios de doctorado en la Universidad de Harvard trabajando para ARPANET, que era el tema de investigación candente en aquellos días. En un viaje a Washington Metcalfe estuvo en casa de Steve Crocker (el inventor de los RFCs de Internet) donde éste le dejó dormir en el sofá. Para poder conciliar el sueño Metcalfe empezó a leer una revista científica donde encontró un artículo de Norm Abramson en el que describía la red Aloha. Metcalfe pensó como se podía mejorar el protocolo utilizado por Abramson, y escribió un artículo describiendo un protocolo que mejoraba sustancialmente el rendimiento de Aloha. Ese artículo se convertiría en su tesis doctoral, que presentó en 1973. La idea básica era muy simple: las estaciones antes de transmitir deberían detectar si el canal ya estaba en uso (es decir si ya había 'portadora'), en cuyo caso esperarían a que la estación activa terminara. Además, cada estación mientras transmitiera estaría continuamente vigilando el medio físico por si se producía alguna colisión, en cuyo caso se pararía y retransmitiría más tarde. Este protocolo MAC recibiría más tarde la denominación *Acceso Múltiple con Detección de Portadora y Detección de Colisiones*, o mas brevemente CSMA/CD (Carrier Sense Multiple Access / Collision Detect).

En 1972 Metcalfe se mudó a California para trabajar en el Centro de Investigación de Xerox en Palo Alto llamado Xerox PARC (Palo Alto Research Center). Allí se estaba diseñando lo que se consideraba la 'oficina del futuro' y Metcalfe encontró un ambiente perfecto para desarrollar sus inquietudes. Se estaban probando unos ordenadores denominados Alto, que ya disponían de capacidades gráficas y ratón y son considerados los primeros ordenadores personales. También se estaban fabricando las primeras impresoras láser. Se quería conectar los ordenadores entre sí para compartir ficheros y las impresoras. La comunicación tenía que ser de muy alta velocidad, del orden de megabits por segundo, ya que la cantidad de información a enviar a las impresoras era enorme (tenían una resolución y velocidad comparables a una impresora láser actual). Estas ideas que hoy parecen obvias eran completamente revolucionarias en 1973.

A Metcalfe, el especialista en comunicaciones del equipo con 27 años de edad, se le encomendó la tarea de diseñar y construir la red que uniera todo aquello. Contaba para ello con la ayuda de un estudiante de doctorado de Stanford llamado David Boggs. Las primeras experiencias de la red, que denominaron 'Alto Aloha Network', las llevaron a cabo en 1972. Fueron mejorando gradualmente el prototipo hasta que el 22 de mayo de 1973 Metcalfe escribió un memorándum interno en el que informaba de la nueva red. Para evitar que se pudiera pensar que sólo servía para conectar ordenadores Alto cambió el nombre de la red por el de Ethernet, que hacía referencia a la teoría de la física hoy ya abandonada según la cual las ondas electromagnéticas viajaban por un fluido denominado *éter* que se suponía llenaba todo el espacio (para Metcalfe el 'éter' era el cable coaxial por el que iba la señal). Los dos ordenadores Alto utilizados para las primeras pruebas de Ethernet fueron rebautizados con los nombres *Michelson* y *Morley*, en alusión a los dos físicos que demostraron en 1887 la inexistencia del éter mediante el famoso experimento que lleva su nombre.

La red de 1973 ya tenía todas las características esenciales de la Ethernet actual. Empleaba CSMA/CD para minimizar la probabilidad de colisión, y en caso de que ésta se produjera se ponía en marcha un mecanismo denominado retroceso exponencial binario para reducir gradualmente la 'agresividad' del emisor, con lo que éste se adaptaba a situaciones de muy diverso nivel de tráfico. Tenía topología de bus y funcionaba a 2,94 Mb/s¹ sobre un segmento de cable coaxial de 1,6Km de longitud. Las direcciones eran de 8 bits y el CRC de las tramas de 16 bits. El protocolo utilizado al nivel de red era el PUP (Parc Universal Packet) que luego evolucionaría hasta convertirse en el que luego fue XNS (Xerox Network System), antecesor a su vez de IPX (Netware de Novell).

En vez de utilizar el cable coaxial de 75 Ω de las redes de televisión por cable se optó por emplear cable de 50 Ω que producía menos reflexiones de la señal, a las cuales Ethernet era muy sensible por transmitir la señal en banda base (es decir sin modulación). Cada empalme del cable y cada 'pincho' vampiro (transceiver) instalado producía la reflexión de una parte de la señal transmitida. En la práctica el número máximo de 'pinchos' vampiro, y por tanto el número máximo de estaciones en un segmento de cable coaxial, venía limitado por la máxima intensidad de señal reflejada tolerable.

En 1975 Metcalfe y Boggs describieron Ethernet en un artículo que enviaron a Communications of the ACM (Association for Computing Machinery), publicado en 1976 [1]. En él ya describían el uso de repetidores para aumentar el alcance de la red. En 1977 Metcalfe, Boggs y otros dos ingenieros de Xerox recibieron una patente por la tecnología básica de Ethernet, y en 1978 Metcalfe y Boggs recibieron otra por el repetidor. En esta época todo el sistema Ethernet era propietario de Xerox.

Aunque no relacionado con Ethernet merece la pena mencionar que David Boggs construyó en 1975 en el Xerox PARC el primer router y el primer servidor de nombres de la Internet.

4.4.1.2 La alianza DIX

En 1976 Xerox creó una nueva división denominada SDD (Systems Development Division) para el desarrollo de los ordenadores personales y de la red Ethernet (ambos proyectos estaban íntimamente relacionados). Metcalfe, Boggs y varios ingenieros más fueron asignados para trabajar en la mejora de la red. Se introdujeron algunos cambios en la tecnología, y por razones de marketing se decidió cambiar el nombre de la red de Ethernet a *X-wire*.

¹ Se eligió precisamente esta velocidad por ser exactamente la mitad que la del reloj maestro del Alto (5,88 MHz), lo cual permitía aprovechar los tics del reloj y simplificaba el diseño del adaptador de red.

Por aquellos años la tendencia de la mayoría de los fabricantes era hacia arquitecturas de redes jerárquicas. Un ejemplo claro en este sentido lo constituía la arquitectura SNA (Systems Network Architecture), anunciada por IBM en 1974. La filosofía de SNA se basaba en dar acceso a través de la red al usuario final desde un terminal 'tonto' a un ordenador central o 'mainframe'. Para ello se definían diferentes tipos de equipos con funcionalidades distintas y una estructura fuertemente jerárquica. Una configuración típica de SNA comprendía cuatro niveles diferentes desde el terminal al mainframe.

El planteamiento de Xerox era radicalmente opuesto y novedoso. Cada usuario disponía de un ordenador conectado directamente a la red local, integrando en él todas las funciones. No existía ningún control centralizado de la red. La comunicación entre dos usuarios cualesquiera ocurría directamente, sin intermediarios y en condiciones de igual a igual ('peer to peer'). Ligada a esta arquitectura distribuida estaba la necesidad - no percibida entonces por la mayoría de los usuarios - de una red de muy alta velocidad para los estándares de la época (baste recordar que por aquel entonces los módems mas veloces eran de 1200 b/s, y en el año 1976 Intel anunció el procesador 8080 que funcionaba a 4,77 MHz).

Hoy en día sabemos que el planteamiento de Xerox era el correcto. Sin embargo, como en tantas otras ocasiones Xerox no supo o no pudo aprovechar comercialmente este acierto. En el caso de Ethernet jugaba en su contra el hecho de ser una tecnología propietaria y no ser Xerox una empresa lo suficientemente grande como para imponer sus productos frente a sus competidores, aspecto fundamental tratándose de comunicaciones. Seguramente también influyó el hecho de ser una tecnología demasiado avanzada para su época. Metcalfe comprendió perfectamente que Ethernet solo podría avanzar si se desarrollaba como un estándar abierto y en cooperación con otros fabricantes, puesto que solo así obtendría el impulso comercial y tecnológico necesario.

Metcalfe abandonó Xerox en enero de 1979 para realizar tareas de consultoría con el MIT y con DEC (Digital Equipment Corporation). Por aquellos años DEC estaba interesada en Ethernet pero las patentes que tenía Xerox le dificultaban adoptar esa tecnología. Metcalfe propuso entonces a DEC que realizara un consorcio con Xerox; propuso además que Intel se uniera al grupo para asegurar que los productos desarrollados se pudieran integrar en chips de bajo costo.

Los miembros del consorcio DIX (DEC-Intel-Xerox) llegaron a un acuerdo en todos los aspectos excepto en el nombre X-wire. DEC e Intel no aceptaban que el nombre de la red empezara por X, por lo que Xerox volvió al nombre inicial Ethernet que parecía satisfacer a todos. También por aquel entonces se decidió subir la velocidad de la red a 10 Mb/s, ya que se consideró que esto era factible con la tecnología existente a unos precios razonables. A la Ethernet original de 2,94 Mb/s se la conoce actualmente como Ethernet Experimental para distinguirla de la de 10 Mb/s que fue la primera que apareció como producto comercial.

Una vez constituida la alianza DIX Metcalfe estimó que se produciría una gran demanda de productos compatibles con Ethernet, por lo consideró que era un buen momento para crear una compañía especializada en este campo. En junio de 1979 creó su propia empresa especializada en Computadores, Comunicaciones y Compatibilidad, mas conocida como 3Com. 3Com adoptó todos los estándares emergentes, no solo Ethernet sino también los protocolos TCP/IP, por ejemplo.

Metcalfe también intentó convencer a IBM en 1980 de que adoptara la tecnología Ethernet, pero entonces IBM aun estaba pensando fundamentalmente en arquitecturas mainframe, con un ordenador central al que se conectaban terminales 3270, que era el tipo de terminales utilizado por los grandes sistemas de IBM.

En 1990 Metcalfe, ya multimillonario, se retiró de 3Com. Actualmente vive en Boston donde ejerce como periodista y es vicepresidente de International Data Group, grupo editorial que publica algunas de las revistas más prestigiosas en el mundo de la informática como PC World, Mac World, Computerworld, Linux World, etc. Regularmente escribe artículos, da charlas y organiza eventos y debates sobre el presente y futuro de las tecnologías de la información y las comunicaciones. A través de sus artículos y ponencias generalmente presenta opiniones críticas y provocadoras acerca de la manera como evoluciona el mundo de Internet y las redes informáticas.

David Boggs siguió trabajando en el Xerox PARC hasta 1984, en que pasó a trabajar en el Western Research Laboratory de DEC (hoy Compaq) también en Palo Alto. En 1988 Boggs publicó un artículo sobre el rendimiento de Ethernet que es considerado un clásico en la materia [2].

Por su parte el consorcio DIX siguió adelante y en septiembre de 1980 publicó las especificaciones de Ethernet Versión 1.0 conocidas como 'libro azul'. La publicación del libro azul hizo de Ethernet la primera tecnología de red local abierta multivendedor, ya que a partir de ese momento cualquier fabricante podía construir equipamiento conforme con la norma Ethernet. Como muestra de su política aperturista Xerox aceptó entonces licenciar su tecnología patentada a todo el que lo quisiera por una cuota reducida, consistente en el pago de 1,000 dólares por cada asignación de un rango de los 24 primeros bits de las direcciones MAC, que eran gestionadas por Xerox (mas tarde con la aprobación de los estándares 802 la gestión de esas direcciones pasó a desempeñarla el IEEE, que cobra actualmente 1,250 dólares por rango, en concepto de tareas administrativas). En 1982 se publicó Ethernet Versión 2.0, que fue la última especificación de Ethernet publicada por DIX. En las especificaciones de Ethernet el único medio físico que se contemplaba era el cable coaxial grueso hoy conocido como 10BASE5. En ese mismo año 1982 Xerox liberó la marca registrada que ostentaba sobre el nombre Ethernet.

4.4.1.3 Las relaciones con IEEE y la estandarización

A finales de los años setenta se realizaban paralelamente a Ethernet otras experiencias de redes locales en universidades y centros de investigación utilizando diversas tecnologías y topologías en bus, anillo o estrella. Había muy pocos productos comerciales disponibles y ningún estándar al respecto, la mayoría de las redes locales eran modelos únicos contruidos de forma artesanal.

Para resolver esta situación en febrero de 1980 el IEEE puso en marcha un proyecto con el objetivo de acordar la tecnología idónea para establecer *el* estándar de red local. De esta forma los productos de diferentes fabricantes podrían interoperar, habría libre competencia y los precios bajarían, beneficiando al usuario. El proyecto se denominó 802 por se este el número que correspondía al siguiente proyecto en la numeración del IEEE (no por alusión al mes y año de su creación como se ha recogido en diversas referencias bibliográficas). Inicialmente el proyecto no tenía unas ideas claras de como debía ser la tecnología a utilizar, pero si de cómo debía llevarse a cabo el proceso de estandarización: debía ser abierto, ordenado y justo. Lo último que se quería era recibir una propuesta ya terminada de un reducido grupo de fabricantes. Esto fue precisamente lo que ocurrió cuando dos meses mas tarde, en abril de 1980, la alianza DIX informó al comité 802 que estaba terminando el diseño y especificación de una tecnología de red local, que la propondría para su estandarización cuando estuviera terminada, pero que entretanto el comité no podría participar en su elaboración. Al margen del espíritu abierto antes mencionado y sus indudables méritos técnicos la forma como se propuso la adopción de Ethernet al comité 802 no fue precisamente un derroche de tacto.

Después de la propuesta de DIX para la adopción de Ethernet el comité 802 recibió otra de General Motors de una red denominada Token Bus, también con topología de bus pero que utilizaba un protocolo MAC basado en paso de testigo. Algo mas tarde IBM presentó una tercera propuesta de una red con topología de anillo y paso de testigo que recibía el nombre de Token Ring. Finalmente, viendo que no sería posible elaborar un único estándar a gusto de todos y considerando que el apoyo de la industria a cada una de las tres propuestas era demasiado importante como para descartar cualquiera de ellas, en 1982 el comité 802 optó en una polémica decisión por aceptar las tres propuestas y crear un subcomité para cada una de ellas: 802.3 para CSMA/CD (Ethernet), 802.4 para Token Bus y 802.5 para Token Ring (802.1 y 802.2 cubrirían aspectos generales y comunes a las tres tecnologías).

Dado el polémico estreno de Ethernet antes descrito no es de extrañar que en el comité 802 (mas tarde subcomité 802.3) hubiera cierta aversión hacia la propuesta de la alianza DIX. Según algunos había incluso cierto deseo de fastidiar, para lo cual se revisó a fondo la propuesta. En cualquier diseño de ingeniería complejo hay un montón de aspectos cuestionables y susceptibles de modificación, por lo que si se dispone del tiempo suficiente para revisar todos los detalles de una propuesta siempre se pueden encontrara algunos que se podrían haber decidido de manera diferente. El comité 802.3 pasó varios meses revisando el estándar Ethernet e introdujo diversos cambios, el mas importante de los cuales fue la sustitución en la trama del campo *tipo* de dos bytes de longitud (que especifica el protocolo del nivel de red) por un campo *longitud*, inexistente hasta entonces. Los diseñadores originales de Ethernet consideraron en su momento que este campo era innecesario porque la mayoría de los protocolos a nivel de red (y ciertamente todos aquellos en los que ellos estaban interesados) incluyen en la información de cabecera un campo indicando la longitud; aun en el caso de que esto no ocurriera la longitud de la trama se puede averiguar simplemente contando el número de bytes que ésta contiene (siempre y cuando no

haya campo de relleno, es decir que la trama tenga al menos 64 bytes de longitud). Sin embargo el comité 802.3 creyó conveniente incluir el campo longitud en vez del campo tipo para no condicionar la información que debiera aparecer en el nivel de red. Casualmente esta pequeña modificación tenía el efecto colateral de hacer incompatible el estándar IEEE 802.3 con Ethernet DIX, cosa que según algunos era el verdadero objetivo de muchos de los miembros del comité que votaron a favor de esta modificación [3].

Los valores utilizados para identificar el protocolo, conocidos como 'Ethertypes', se establecían en una tabla que mantenía Xerox y en la que registraba cualquier nuevo protocolo que se registrara, asignándole un valor en el campo de dos bytes. El problema de incompatibilidad producido por la decisión del IEEE lo resolvió Xerox asignando a todos los protocolos nuevos valores superiores a 1536 bytes, que es el valor máximo del campo longitud², y trasladando a valores superiores los protocolos ya registrados, que afortunadamente eran aun pocos; por ejemplo el PUP (Parc Universal Packet), protocolo utilizado en la Ethernet Experimental, tenía el código 512 y se le puso el 2560. De esta forma era posible saber si la trama tenía formato DIX u 802.3 analizando el valor del campo tipo/longitud; si era mayor de 1536 se trataba de una trama DIX y por tanto el campo representaba el Ethertype, de lo contrario era una trama 802.3 y estos dos bytes indicaban la longitud. Los dos formatos eran incompatibles entre sí, pero al menos podían diferenciarse y por tanto coexistir en una misma red.

En el caso de una trama 802.3 la información sobre el protocolo a nivel de red aparece en la cabecera LLC (Logical Link Control) que se encuentra en la parte de datos de la trama MAC y cuyo formato veremos mas tarde. La estructura de esta cabecera, común a todas las redes locales 802, se especifica en el estándar IEEE 802.2. El trabajo conjunto del IEEE y de la ISO en el diseño de la cabecera LLC produjo un diseño absurdo e innecesariamente complejo³ que hace que en la mayoría de los protocolos sea necesario analizar los cuatro campos y los ocho bytes de la cabecera LLC SNAP⁴ para averiguar lo que Xerox conseguía usando solo dos bytes en la cabecera DIX. Más aun, en la mayoría de los casos los primeros seis bytes de la cabecera LLC solo sirven, como veremos más tarde, para especificar que en los dos siguientes se encuentra el Ethertype correspondiente al protocolo utilizado. Esto complica el proceso de los paquetes y añade un overhead innecesario, sobre todo en el caso de tramas pequeñas. Por este motivo el formato DIX es mas utilizado, empleándose por ejemplo en TCP/IP, DECNET fase 4, LAT (Local Area Transport, de DEC) y algunas implementaciones de IPX (Netware de Novell). El formato 802.3/LLC es utilizado normalmente en Appletalk fase 2, NetBIOS y algunas implementaciones de IPX.

En 1997 el grupo de trabajo 802.3x estandarizó un mecanismo de control de flujo para Ethernet Full Dúplex del cual hablaremos en detalle más adelante. Desde el punto de vista de la subcapa MAC el control de flujo se consideraba un protocolo nuevo, por lo que había que asignarle un valor nuevo en la tabla de tipos. Entonces se vio que resultaba más eficiente disponer de la información sobre el tipo de protocolo en la cabecera MAC, como hacía el formato DIX, ya que esto permitía tratar las tramas a bajo nivel, es decir por hardware; el control de flujo es una tarea de máxima prioridad y se debe realizar con la máxima eficiencia posible. El comité podía haber optado por estandarizar el formato DIX únicamente para las tramas de control de flujo, y mantener el 802.3/LLC para los demás protocolos, pero finalmente decidió aceptar ambos formatos para todos los protocolos considerando válidos los dos significados, tipo y longitud, para el polémico campo de dos bytes. La elección de cual significado es aplicable en cada caso concreto se haría en función del valor de este campo, si era igual o menor que 1536 sería longitud y si era mayor sería un Ethertype. Dicho de otro modo el comité IEEE 802.3 estandarizó en 1997 lo que ya venía siendo práctica habitual en todos los fabricantes de hardware y software desde los principios de Ethernet. De alguna manera esto representaba una reconciliación quince años mas tarde con DIX (y con el mundo real).

Tradicionalmente Xerox se ocupaba de la labor administrativa de asignación de 'Ethertypes'. Desde 1997, con la adopción del formato DIX como parte del estándar 802.3 el IEEE reemplazó a Xerox en esta función. Los valores de Ethertype vigentes se pueden consultar por ejemplo en el web de la IANA (Internet Assigned Number Authority) www.iana.org/numbers.html.

² Se utilizaron valores superiores a 1536, no a 1500 (longitud máxima de una trama Ethernet) para dejar sitio a posibles ampliaciones que pudieran producirse en la longitud de la trama debido a información de control que pudiera aparecer en el futuro. Por ejemplo el soporte de VLANs que incorpora 802.1Q utiliza parte de este espacio adicional.

³ Cosa por otra parte previsible (cinismo intencionado). El lector interesado en conocer el proceso que llevó al IEEE a definir la cabecera LLC de esa forma puede consultar [4].

⁴ Esos campos son el DSAP (Destination Service Access Point), SSAP (Source Service Access Point, LLC Control y SNAP (SubNetwork Access Protocol), ver apartado 4.7.

Finalmente el 24 de junio de 1983 el IEEE aprobó el estándar 802.3, contemplando como medio físico únicamente el cable coaxial grueso, al cual denominó 10BASE5⁵. En el estándar se recomienda que el cable sea de color amarillo con el único objetivo de que no se confunda en las conducciones con los cables de alimentación eléctrica. El estándar IEEE 802.3 fue propuesto a continuación a ANSI, que lo aprobó en diciembre de 1984, elevándolo así a la categoría de estándar conjunto ANSI/IEEE 802.3. Después fue propuesto para su aprobación por el ISO, que lo aceptó como DIS (Draft International Standard) en 1985 bajo la denominación ISO/IEC 8802-3, pasando luego al estado de IS (International Standard). Como detalle curioso diremos que la especificación de ISO es técnicamente equivalente pero no idéntica a la de IEEE/ANSI, el documento difiere en las unidades (que están basadas en el sistema métrico), se utiliza terminología internacional, se eliminan referencias a otros estándares nacionales de Estados Unidos, y se formatea el documento para papel de tamaño ISO A4.

4.4.1.4 Nuevos tipos de cables

Los componentes de las primeras redes Ethernet (repetidores, transceivers, tarjetas de red, etc.) eran muy caros. El cable coaxial y el cable ‘drop’ (el que conectaba el equipo al cable coaxial), aunque tenían un costo elevado resultaban despreciables al lado de los componentes electrónicos. Gradualmente la electrónica fue bajando de precio, con lo que los cables y su instalación empezaban a representar una parte significativa del presupuesto de una red. Además el elevado grosor y rigidez de estos cables los hacía poco apropiados para entornos de oficina. Los usuarios demandaban cables más baratos y más finos. En respuesta a estos requerimientos aparecieron a partir de 1982 productos en el mercado que permitían utilizar Ethernet sobre cable coaxial RG58, también de 50 Ω pero más fino y más barato. Este cable utilizaba conectores BNC en vez de los voluminosos conectores tipo ‘N’, y no requería cable drop ya que el equipo se podía enchufar directamente al cable coaxial mediante un conector en T, estando en este caso la función del transceiver integrada en la tarjeta de red. En conjunto se conseguía un ahorro importante respecto al cable grueso tradicional, razón por la cual este cable se conocía con el nombre de cheapernet (‘red más barata’). El cable cheapernet tenía un menor apantallamiento que el 10BASE5, lo cual le confería una mayor atenuación y por ende menor alcance (185 m por segmento en vez de 500 m). La interconexión de segmentos cheapernet (o thinwire como también se le llamaba) con segmentos de coaxial grueso (o thickwire) se podía realizar mediante repetidores. El cable coaxial fino fue incorporado al estándar 802.3 con la denominación 10BASE2 mediante una adenda que el IEEE aprobó en 1985.

Para permitir mayores distancias y mejorar la conectividad entre edificios también se incluyó la fibra óptica como medio de transmisión. El FOIRL (Fiber Optic Inter-Repeater Link) fue incorporado al estándar 802.3 en 1989, y permitía unir repetidores a una distancia máxima de 1000 m. Actualmente FOIRL esta en desuso, en su lugar se emplea 10BASE-FL que permite unir repetidores y equipos con una distancia máxima de 2.000 m.

4.4.1.5 El cable de pares trenzados y el cableado estructurado

Las primeras redes locales utilizaban cables especiales, normalmente coaxiales ya que presentaban menor atenuación y soportaban mejor las altas frecuencias. Dado que el cable era instalado a propósito se elegía el más conveniente por razones puramente técnicas. Paralelamente a la red local los edificios tenían la red de telefonía que utilizaba cable de pares no apantallados. Por imperativos legales estas redes de telefonía eran instaladas y mantenidas en todo el mundo por las compañías telefónicas, incluso dentro de los edificios. El 1 de enero de 1984 se produjo en Estados Unidos una decisión judicial histórica que rompió el monopolio en telefonía ostentado hasta entonces por AT&T en ese país. Esta es probablemente la decisión judicial que más ha influido en el mundo de las telecomunicaciones. Esta decisión tuvo entre otras muchas la consecuencia de que las empresas fueran de la noche a la mañana propietarias de su red telefónica interior y a partir de entonces pudieran gestionarla. La red telefónica estaba omnipresente y su costo de instalación y mantenimiento era inferior al de la red basada en cable coaxial, incluso a cheapernet. Después de todo AT&T y las telefónicas de todo el mundo llevaban muchos años cableando edificios y algo debían saber del tema. Por ejemplo un operario era capaz de poner un conector RJ-45, utilizado habitualmente en telefonía, en menos tiempo de lo que tardaba en sacar de la bolsa los componentes de un conector BNC. Además, la red telefónica tenía una topología en estrella organizada jerárquicamente que la hacía mas versátil y robusta que una de tipo bus. El diagnóstico y aislamiento de

⁵ Escrito así, en mayúsculas y sin guión. El guión aparecería más tarde al aparecer nuevos medios físicos en los que el número se cambió por letras, por ejemplo 10BASE-T.

problemas era más rápido y sencillo. Estos factores provocaron una demanda por parte de los usuarios en el sentido de aprovechar el cableado telefónico de pares trenzados para proveer el acceso a la red local de los puestos de trabajo. Dicho de otro modo, los usuarios requerían un cableado integral para voz y datos.

Ya en el mismo año 1984 el comité 802.3 empezó a estudiar la posibilidad de implementar Ethernet en cable telefónico. Por aquel entonces muchos expertos aseguraban que una red de 10 Mb/s jamás podría funcionar sobre cable de pares sin apantallar, debido a la mayor atenuación de este medio a altas frecuencias. Sin embargo ya en 1985 la empresa Synoptics⁶ sacó al mercado un producto denominado LattisNet que permitía utilizar cableado UTP para constituir redes Ethernet de 10 Mb/s. En 1987 el comité 802.3 estandarizó una red denominada StarLAN⁷ o 1BASE5, variante de Ethernet que funcionaba a 1 Mb/s sobre cable de pares no apantallado a distancias máximas de 500 m. En 1990 se estandarizó 10BASE-T (T = 'Twisted')⁸ que utilizaba cable de pares trenzados no apantallado (UTP, Unshielded Twisted Pair). Esto significó en la práctica el final de StarLAN ya que la mayoría de los usuarios que habían optado provisionalmente por esa red migraron a 10BASE-T que ofrecía mayor velocidad y evitaba tener que utilizar costosos puentes conversores de velocidad para conectar la red de 1 Mb/s con la de 10 Mb/s.

Paralelamente al desarrollo por parte del IEEE de los estándares de red local para cable UTP se desarrollaron normativas de cableado de telecomunicaciones para edificios comerciales que permitían constituir lo que se conoce como cableado estructurado. Inicialmente se utilizaron sistemas propietarios (IBM Cabling System, DECCconnect, AT&T SYSTIMAX, etc.) pero al cabo de unos años se elaboraron normativas independientes. La primera fue la EIA/TIA 568 que se publicó en 1991, seguida poco después por la ISO/IEC 11801. Actualmente estas dos son las más utilizadas, en sus versiones de 1995. Para asegurar máxima compatibilidad con cualquier fabricante es conveniente seguir simultáneamente tanto la norma ISO como la EIA siempre que sea posible.

4.4.1.6 Puentes y conmutadores

Ya en su artículo de 1976 [1] Metcalfe y Boggs mencionaban la posibilidad de extender la red mediante el uso de repetidores 'filtradores de tráfico' o de paquetes. Los primeros puentes transparentes fueron desarrollados por DEC a principios de los ochenta, apareciendo los primeros productos comerciales en 1984. Aunque caros y de bajo rendimiento comparados con los actuales, suponían una alternativa interesante a los routers por su sencillez y relación precio/prestaciones. En 1987 el IEEE se puso en marcha para estandarizar el funcionamiento de los puentes transparentes. El resultado fue el estándar 802.1D aprobado en 1990.

En 1991 una empresa de reciente creación denominada Kalpana⁹ comercializó un nuevo tipo de puentes Ethernet con un número elevado de interfaces y alto rendimiento, supuestamente capaces de dar los 10 Mb/s de tráfico simultáneamente en cada una de sus interfaces. Estos equipos se anunciaban como conmutadores LAN para diferenciarlos de los tradicionales puentes, aun cuando su principio de funcionamiento era el mismo. Para conseguir el alto rendimiento se implementaba el algoritmo de filtrado de paquetes a bajo nivel en el hardware de los equipos.

El mercado de los conmutadores LAN tuvo y tiene un crecimiento considerable, especialmente porque daba una cómoda vía de crecimiento a los usuarios de Ethernet sin necesidad de cambiar a otras tecnologías.

Llevada al extremo la filosofía de los conmutadores LAN produce redes en las que cada puerto está dedicado a un ordenador. De esta forma cada usuario puede disfrutar de 10Mb/s de capacidad y su tráfico no es visto por ningún otro ordenador salvo por aquel al que va dirigido, con lo que se mejora el rendimiento y la seguridad de la red. El uso de redes conmutadas nos lleva de una situación de medio compartido a una de medio dedicado donde ya no es necesario el uso del protocolo CSMA/CD. Por otro lado, los dos medios físicos más populares de Ethernet (10BASE-T y 10BASE-FL) ofrecen un canal diferente para cada sentido de la comunicación. Aprovechando estas dos circunstancias se implementó lo

⁶ Synoptics más tarde se fusionó con Wellfleet para constituir Bay Networks. A su vez Bay Networks fue después comprada por Northern Telecom.

⁷ El nombre deriva del hecho de tratarse de una red con topología en estrella (hasta entonces todas las redes Ethernet estándar tenían topología de bus).

⁸ Esta fue la primera vez que apareció el guión en la denominación para separar la letra T de la E.

⁹ Comprada más tarde por Cisco.

que se denomina Ethernet full-dúplex, que aprovecha la posibilidad que brinda el medio físico para establecer dos canales dedicados de 10 Mb/s, uno para cada sentido, como si se tratara de una línea punto a punto. Aunque los productos comerciales Ethernet full-dúplex están en el mercado desde poco después de la aparición de los conmutadores LAN su funcionamiento no fue estandarizado por el IEEE hasta 1997 en la especificación 802.3x, donde además se estableció como ya hemos comentado un control de flujo para su funcionamiento.

4.4.1.7 Ethernet rápida

Cuando Ethernet comenzó su andadura comercial a principios de los ochenta muchos consideraban que 10 Mb/s era una velocidad excesiva y que esto encarecía innecesariamente la red; por aquel entonces ningún ordenador era capaz de enviar a esa velocidad, por ejemplo en 1983 un mainframe VAX 8600 (considerado en su tiempo una máquina potente) podía transmitir unos 6 Mb/s en el mejor de los casos; con los protocolos de transporte habituales los rendimientos eran sensiblemente inferiores.

En 1988 Van Jacobson (seguramente la persona que mas ha contribuido a mejorar el rendimiento del protocolo TCP), envió un artículo a las news de usenet informando que había conseguido una velocidad de transferencia de 8 Mb/s sobre Ethernet entre dos estaciones de trabajo Sun utilizando una versión optimizada de TCP. A partir de ese momento las mejoras en el hardware (CPUs, discos, tarjetas controladoras, etc.) y en el software (sistemas operativos, protocolos, etc.) empezaron a hacer cada vez mas fácil que un solo equipo saturara una Ethernet.

Entonces la única solución estándar para pasar a velocidades superiores era FDDI (que por cierto es un estándar ANSI e ISO, pero no IEEE). Sin embargo FDDI nunca se mostró como una alternativa interesante para los usuarios de Ethernet. Aunque robusta y fiable esta red tenía una gestión compleja y permanecía en unos precios inaccesibles para la mayoría de las instalaciones, o solo asumibles cuando se trataba de la red principal o 'backbone', pero no para el acceso del usuario final. Su compatibilidad con Ethernet es reducida, ya que FDDI no es CSMA/CD y utiliza una estructura de trama diferente. Esto complicaba las cosas cuando se quería migrar desde Ethernet, y más aun si habían de coexistir ambas redes.

En un intento por cubrir esta demanda de redes de alta velocidad compatibles con Ethernet y de bajo costo Grand Junction¹⁰ sacó en 1992 una versión de Ethernet que funcionaba a 100 Mb/s. Esto tuvo un éxito considerable y provocó la creación ese mismo año en el seno del IEEE de un grupo de estudio sobre redes de alta velocidad, con la misión de estudiar la posibilidad de ampliar el estándar a 100 Mb/s. Inicialmente se plantearon dos propuestas:

- Mantener el protocolo CSMA/CD en todos sus aspectos salvo la velocidad que se aumentaría en un factor 10. Al mantener constante el tamaño de trama mínimo (64 bytes) se reducía en diez veces la distancia máxima entre estaciones, lo cual daba un diámetro máximo de unos 400 metros. El uso de CSMA/CD suponía además la ya conocida pérdida de eficiencia debida a las colisiones.
- Aprovechar la revisión para crear un nuevo protocolo MAC sin colisiones mas eficiente y con mas funcionalidades (mas parecido en cierto modo a Token Ring), pero manteniendo la misma estructura de trama de Ethernet.

La primera propuesta tenía la ventaja de acelerar el proceso de estandarización y el desarrollo de productos, mientras que la segunda era técnicamente superior. El subcomité 802.3 decidió finalmente adoptar la primera propuesta, que siguió su camino hasta convertirse en lo que hoy conocemos como Fast Ethernet, incorporado a la norma 802.3 en junio de 1995 a propuesta del grupo de trabajo 802.3u. Para acelerar el proceso de estandarización el grupo 802.3u utilizó para el nivel físico buena parte de las especificaciones ya desarrolladas por ANSI para FDDI¹¹. Los medios físicos soportados por Fast Ethernet son fibra óptica multimodo, cable UTP categoría 3 y categoría 5 y cable STP (Shielded Twisted Pair).

¹⁰ Comprada más tarde por Cisco.

¹¹ Los medios físicos 100BASE-TX y 100BASE-FX de Fast Ethernet derivan totalmente de FDDI. Los medios 100BASE-T4 y 100BASE-T2 (que apareció mas tarde) tienen una especificación propia del nivel físico.

Los partidarios de la segunda propuesta, considerando que sus ideas podían tener cierto interés, decidieron crear un nuevo subcomité del IEEE, el 802.12, que desarrolló la red conocida como 100VG-AnyLAN. Durante cierto tiempo hubo competencia entre ambas redes por conseguir cuota de mercado; hoy en día la balanza se decanta ampliamente hacia Fast Ethernet. Algunos fabricantes (notablemente HP, autor de la propuesta) aun mantienen un amplio catálogo de productos para 100VG-AnyLAN. Merece la pena recalcar que 100VG-AnyLAN, aunque puede funcionar con estructura de trama Ethernet (y también con Token Ring, de ahí la denominación de AnyLAN) no utiliza CSMA/CD y por tanto no puede denominarse Ethernet. Alguna literatura confunde esta red con la Fast Ethernet.

Las redes Fast Ethernet se extendieron con una rapidez incluso superior a las expectativas mas optimistas. Como consecuencia de esto los precios bajaron y su uso se popularizó hasta el punto de que se utilizaba Fast Ethernet no solo en los enlaces troncales sino en la conexión del usuario final. Para mantener un diseño coherente y equilibrado de la red se requerían velocidades superiores en el backbone, requerimiento que no podía ser satisfecho con los productos habituales, salvo quizá por ATM a 622 Mb/s, pero a unos precios astronómicos. Este hecho junto con la experiencia positiva habida con Fast Ethernet animó al subcomité 802.3 a iniciar en 1995 otro grupo de trabajo que estudiara el aumento de velocidad de nuevo en un factor diez, creando lo que se denomina Gigabit Ethernet. Aunque en 1995, recién aprobado Fast Ethernet, parecía descabellado plantear velocidades de esa magnitud para redes convencionales, las previsiones de aumento en rendimiento y nivel de integración de los chips hacían prever entonces que para 1998 sería factible construir tarjetas de red y componentes que funcionaran a 1 Gb/s con tecnología convencional a precios asequibles¹². Siguiendo un calendario similar al empleado en Fast Ethernet y con un grupo de personas parecido se inició un proceso que culminó el 29 de junio de 1998 con la aprobación del suplemento 802.3z.

De forma análoga a lo que Fast Ethernet hizo con FDDI para el nivel físico, el grupo que elaboró las especificaciones de Gigabit Ethernet se basó en lo posible en los estándares ANSI de Fibre Channel a 800 Mb/s, aumentando adecuadamente las velocidades. Se pretendía poder utilizar los mismos medios físicos que en Fibre Channel: emisores láser con fibra óptica multimodo y monomodo, cable de pares trenzados apantallado y además cable UTP categoría 5. En el caso de la fibra multimodo se quería llegar a una distancia mayor que en Fibre Channel, lo cual planteó algunos problemas técnicos que retrasaron en unos meses la elaboración del estándar. En el caso de Gigabit Ethernet sobre cable UTP categoría 5 el reto tecnológico era de tal magnitud que en marzo de 1997 se decidió segregar un nuevo grupo de trabajo, el 802.3ab, para desarrollar exclusivamente este caso y no retrasar por él la aprobación del resto de medios físicos. El estándar de Gigabit Ethernet sobre cable UTP categoría 5 se aprobó en junio de 1999.

Finalmente, y siguiendo en la tradición ya establecida de aumentar cada vez la velocidad en un factor diez, el IEEE aprobó en enero del 2000 la creación de un grupo de estudio de alta velocidad para la eventual estandarización de una Ethernet de 10 Gigabits. Las decisiones sobre como se implementará el nivel físico de esta red se encuentran todavía en fases muy preliminares.

La tabla 4.2 resume los hechos mas importantes que han marcado la historia de Ethernet.

¹² En efecto, actualmente multitud de fabricantes ofrecen toda la gama de productos Gigabit Ethernet (conmutadores, tarjetas de red, etc.) a precios razonables.

1970	o Abramson realiza primeras experiencias de redes broadcast en Hawaii (ALOHANET) mediante el protocolo MAC Aloha.
1972	o Roberts propone el protocolo MAC Aloha ranurado
22/5/1973	o Robert Metcalfe y David Boggs conectan dos ordenadores Alto con cable coaxial a 2,94 Mb/s en el Xerox Palo Alto Research Center, mediante una red denominada Ethernet.
5/1975	o Metcalfe y Boggs escriben un artículo describiendo Ethernet, y lo envían para su publicación a <i>Communications of the ACM</i> .
1976	o Xerox crea SSD, una división para el desarrollo de los ordenadores personales y la red X-wire (nuevo nombre de Etherent).
1979	o Se constituye la alianza DIX (DEC-Intel-Xerox) para impulsar el desarrollo técnico y comercial de la red. Se vuelve al nombre original de Ethernet. o Metcalfe abandona Xerox y crea 3Com.
2/1980	o El IEEE crea el proyecto 802.
4/1980	o DIX anuncia al IEEE 802 que está desarrollando una tecnología de red local que pretende estandarizar.
9/1980	o DIX publica Ethernet (libro azul) versión 1.0. Velocidad 10 Mb/s.
1981	o 3Com fabrica las primeras tarjetas Ethernet para PC (10BASE5).
1982	o DIX publica Ethernet (libro azul) versión 2.0. o 3Com produce las primeras tarjetas 10BASE2 para PC.
24/6/1983	o IEEE aprueba el estándar 802.3, que coincide casi completamente con DIX Ethernet. El único medio físico soportado es 10BASE5.
1/1/1984	o AT&T se subdivide en AT&T Long Lines y 23 BOCs (Bell Operating Companies). Los tendidos de cable telefónico internos de los edificios pasan a ser propiedad de los usuarios.
1984	o DEC comercializa los primeros puentes transparentes
21/12/1984	o ANSI aprueba el estándar IEEE 802.3.
1985	o Se publica el estándar IEEE 802.3 o ISO/IEC aprueba el estándar 8802-3, versión adaptada del IEEE 802.3. o IEEE añade al estándar el cable 10BASE2. o Primeros productos 10BASE-T de Synoptics.
1987	o IEEE estandariza StarLAN (1BASE5, Ethernet a 1 Mb/s con cable UTP). o Comienza la estandarización de los puentes transparentes
1989	o IEEE estandariza FOIRL (Fiber Optic Inter-Repeater Link)
1990	o IEEE estandariza 10BASE-T. o Primeros conmutadores Ethernet de Kalpana o Se aprueba el estándar 802.1D (puentes transparentes)
1992	o Primeros productos Fast Ethernet, fabricados por Grand Junction o IEEE crea el grupo de estudio para redes de alta velocidad (100 Mb/s)
1993	o Primeros conmutadores Full Dúplex
6/1995	o Se estandariza Fast Ethernet (100BASE-FX, 100BASE-TX y 100 BASE-T4)
10/1995	o IEEE crea el grupo de estudio para redes de 1 Gb/s
7/1996	o Se aprueba el grupo de trabajo 802.3z para la estandarización de Gigabit Ethernet
3/1997	o Se escinde del grupo de trabajo 802.3z el 802.3ab para la estandarización de 1000BASE-T (Gigabit Ethernet sobre cable UTP categoría 5).
1997	o Se aprueba el estándar Ethernet full-dúplex (802.3x), incluyendo en el estándar el formato de trama DIX. o Se publican los drafts 802.1p y 802.1Q (VLANs y prioridades) o Primeros productos comerciales Gigabit Ethernet
29/6/1998	o Se estandariza Gigabit Ethernet (802.3z) que comprende los medios físicos 1000BASE-SX, 1000BASE-LX y 1000BASE-CX.
6/1999	o Se estandariza 1000BASE-T (Gigabit Ethernet sobre cable UTP-5).
1/2000	o Se crea un grupo de estudio de altas velocidades para valorar la posibilidad de estandarizar una Ethernet de 10 Gigabits

Tabla 4.2.- Cronología de Ethernet

4.4.2 El medio físico

4.4.2.1 Cables de cobre

Actualmente casi todo el cable de cobre utilizado en redes Ethernet es el de pares trenzados sin apantallar (UTP, Unshielded Twisted Pair); mas raramente se emplea cable de pares trenzados apantallado (STP, Shielded Twisted Pair) o también cable coaxial. Esto no se debe a las virtudes del cable UTP, que es peor que el STP o el coaxial para transmitir señales de alta frecuencia, sino al requerimiento de utilizar un cable de bajo costo que permita un cableado integral de voz y datos.

Como ya hemos visto en el capítulo 2 las normativas de cableado estructurado clasifican los diferentes tipos de cable de pares trenzados en categorías de acuerdo con sus características. Una categoría mayor soporta mayores frecuencias y supone una mayor capacidad para transmitir datos.

Cuando se publicó la primera normativa de cableado estructurado en julio de 1991 (la EIA/TIA 568) solo se especificaba la categoría 3. Un mes mas tarde se publicaba la especificación de las categorías 4 y 5. Desde entonces no se han estandarizado nuevas categorías, pero las especificaciones han sido revisadas y modificadas varias veces. La última modificación se realizó en 1995, por tanto no es lo mismo un cable certificado categoría 5 según la norma de 1991 que según la de 1995. A falta de una especificación aprobada para categorías superiores a la 5 las redes que transmiten a alta velocidad sobre cable UTP-5, tales como Fast Ethernet o ATM a 155 Mb/s, han tenido que ir apurando cada vez más las prestaciones del cable, reduciendo por tanto el margen de seguridad de las instalaciones.

Como es lógico estos problemas son aun mayores en el caso de Gigabit Ethernet, donde se ha visto que las especificaciones de la categoría 5 actualmente vigente no son suficientemente precisas para asegurar el funcionamiento de 1000BASE-T. Por esto a petición del IEEE se ha iniciado un proceso para añadir parámetros adicionales al proceso de certificación de cables categoría 5. Estos parámetros se incluirán en la normativa TIA/EIA 568-A en lo que se denomina categoría 5E (E de 'Enhanced', mejorada). En ISO/IEC 11801 se harán las mismas modificaciones, pero en vez de definir una categoría nueva se añadirá un apéndice a la especificación de la categoría 5 para incluir estas medidas adicionales. Las modificaciones a la categoría 5 no alteran la frecuencia máxima a la que se comprueba el cable, que seguirá siendo 100 MHz.

Con estas adiciones a la norma se tendrá un mayor margen de seguridad al utilizar cableado categoría 5 en redes de alta velocidad, tales como Fast Ethernet o Gigabit Ethernet. En teoría una instalación categoría 5 certificada con anterioridad a las adiciones debería certificarse nuevamente para saber si cumple la nueva normativa, y en caso contrario modificarse para su correcto funcionamiento con Gigabit Ethernet. Se estima que entre un 5 y un 10% de las instalaciones categoría 5 requerirán este tipo de modificaciones, debido fundamentalmente a problemas relacionados con los conectores. En [5] se especifica el procedimiento a seguir para resolver ese tipo de problemas.

En la actualidad existen cables UTP que superan con creces los requerimientos de la categoría 5 Enhanced, aproximándose algunos a lo que según el borrador actual será la categoría 6. A la espera de que los organismos oficiales aprueben las normas correspondientes, el integrador Anixter ha definido unas categorías propias denominadas niveles. La clasificación actualmente vigente, definida en 1997 y conocida como Levels'97, especifica tres niveles denominados 5, 6 y 7. El nivel 5 corresponde con pequeñas mejoras a la categoría 5. El nivel 6 supone una mejora importante respecto a la categoría 5, coincidiendo con lo que algunos fabricantes denominan categoría 5 de gama alta o 5+. Por último el nivel 7, que ofrece un ancho de banda doble que la categoría 5 con una frecuencia de 200 MHz, podemos considerarlo de prestaciones similares a las que tendrá la futura categoría 6. El lector interesado puede consultar más detalles sobre los niveles de Anixter en la ref. [6].

Cualquier instalación nueva en la que se prevea la posibilidad de utilizar Gigabit Ethernet sobre cable UTP debería considerar la instalación de un cableado que cumpliera como mínimo los requisitos del nivel 6 de Anixter, para reducir el riesgo de problemas.

Incluso en el caso de que un enlace no cumpla la categoría 5E es posible que la instalación funcione correctamente con 1000BASE-T, ya que influyen múltiples factores tales como la calidad de los transceivers utilizados en los equipos. La mejor forma de saberlo es hacer la conexión, provocar un flujo

masivo de tráfico entre los dos equipos, y calcular la tasa de errores obtenida, también llamada BER (Bit Error Rate). Para calcular la BER debemos dividir el número de tramas recibidas con CRC erróneo por el número total de bits recibidos (esta información la podemos obtener por ejemplo de las estadísticas de un conmutador); solo se debe considerar el tráfico en el lado receptor, puesto que los equipos nunca detectan errores de CRC en lo que transmiten. Según el estándar la BER no debe ser superior a 10^{-10} (es decir un bit erróneo cada 10^{10} bits transmitidos). Si obtenemos un valor superior debemos revisar la instalación, mejorándola o rehaciéndola en caso necesario hasta conseguir un BER menor. Para que el resultado sea representativo deberemos transmitir al menos 10^{11} bits (11,64 Gbytes). Para comprobar el enlace en ambos sentidos habría que realizar la prueba primero transmitiendo desde un equipo y luego desde el otro. Estas pruebas, aunque son la mejor verificación del correcto funcionamiento de la red, estrictamente hablando solo son válidas para la configuración concreta de equipos y cables con los que se prueba; no todos los transceivers tienen la misma tolerancia al ruido, por lo que en situaciones que se encuentren fuera de normas podrían presentarse problemas al cambiar los equipos conectados.

La tabla 4.3 resume los medios físicos de cobre más utilizados en Ethernet, Fast Ethernet y Gigabit Ethernet.

Denominación	Cable	Pares	Full dúplex	Conectores	Distancia
10BASE5	Coaxial grueso	1	No	'N'	500 m
10BASE2	RG 58 (Coaxial fino)	1	No	BNC	185 m
10BASE-T	UTP cat. 3	2	Sí	RJ-45	100 m
10BASE-T	UTP cat. 5	2	Sí	RJ-45	150 m ⁽¹⁾
100BASE-TX	UTP cat. 5	2	Sí	RJ-45	100 m
100BASE-TX	STP	2	Sí	9 pin D sub.	100 m
100BASE-T4	UTP cat. 3	4	No	RJ-45	100 m
100BASE-T2	UTP cat. 3	2	Sí	RJ-45	100 m
1000BASE-CX	STP	2	Sí	8 pin HSSDC o 9 pin D sub.	25 m
1000BASE-T	UTP cat. 5	4	Sí	RJ-45	100 m

⁽¹⁾La longitud máxima del cable UTP-5 según las normativas de cableado estructurado es 100 m, pero la norma 802.3 permite una longitud de 150 m cuando se utiliza 10BASE-T con cable categoría 5.

Tabla 4.3.- Medios físicos de cobre utilizados en Ethernet, Fast Ethernet y Gigabit Ethernet

Los medios preferidos hoy en día son 10BASE-T y 100BASE-TX , ambos sobre cable categoría 5.

4.4.2.2 Fibras ópticas

En Ethernet a 10 Mb/s sobre fibra óptica (10BASE-FL) se utiliza primera ventana (850nm) por ser la que permite emplear optoelectrónica más barata; con esto se tiene un alcance de 2 Km. En cambio Fast Ethernet (100BASE-FX) utiliza segunda ventana (1300nm) que es la empleada en FDDI¹³; como la mayor velocidad requiere menor atenuación se cambia a la segunda ventana con lo que se consigue mantener el alcance máximo en 2Km; desgraciadamente la optoelectrónica de segunda ventana es bastante más cara, por este motivo la relación de costo fibra/cobre es mayor en Fast Ethernet que en Ethernet. Si se mira directamente a un emisor 10BASE-FL se aprecia una luz roja tenue, ya que la primera ventana se encuentra muy cerca del espectro visible, que va de 400 a 760nm. En cambio en 100BASE-FX no se aprecia ninguna luz ya que la segunda ventana se encuentra bastante mas lejos de la zona visible.

Aunque los estándares 10BASE-FL y 100BASE-FX contemplan únicamente fibra 62,5/125 la mayoría de los equipos pueden funcionar también con fibra 50/125¹⁴. Sin embargo el uso de fibra 50/125 provoca una

¹³ Recordemos que el nivel físico de 100BASE-FX deriva completamente de FDDI.

¹⁴ Esto se debería comprobar en cada caso consultando la documentación correspondiente.

pérdida de señal que puede llegar a ser de 5 ó 6 dB debido al desacoplamiento entre el transceiver y la fibra¹⁵; por tanto el uso de fibra 50/125 puede reducir la distancia máxima efectiva en el caso de Ethernet o Fast Ethernet, y su uso está desaconsejado. Aun menos aconsejable es mezclar en un mismo trayecto fibras de 50/125 y 62,5/125, ya que se producirían pérdidas de señal en cada cambio de diámetro.

Tradicionalmente las redes locales, al tener que cubrir distancias pequeñas (menores de 2Km), han utilizado fibras multimodo con emisores LED (no láser) de primera o segunda ventana, mientras que los emisores láser y las fibras monomodo con alcance mucho mayor (hasta 160 Km en tercera ventana) han quedado reservados a las redes de área extensa, donde el mayor costo de los emisores se ve compensado por la reducción en equipos amplificadores y regeneradores de la señal.

Además de su menor alcance los LEDs también tienen una limitación en velocidad; pueden llegar como máximo a 400-600 Mbaudios¹⁶. Para velocidades superiores es preciso utilizar emisores láser, aun cuando por distancia no sea necesario su uso, porque permiten enviar pulsos más cortos. Esta situación se planteó por primera vez en Fibre Channel, que transmite a velocidades de hasta 1062 Mbaudios. El problema era que la luz láser requiere normalmente fibras monomodo, cosa que habría limitado mucho la utilización de Fibre Channel, ya que estas fibras no están disponibles normalmente en los edificios. La propagación de luz láser en fibra multimodo presenta problemas que limitan seriamente su alcance. En Fibre Channel se optó por restringir el uso de fibra multimodo a distancias muy cortas, sin investigar a fondo el problema, ya que para distancias mayores se utilizaba fibra monomodo. Además en Fibre Channel se utiliza fibra de 50/125 únicamente ya que presenta menos problemas de propagación con la luz láser que la 62,5/125 (lo cual es hasta cierto punto lógico puesto que su diámetro es más parecido al de la monomodo).

En Gigabit Ethernet los pulsos se transmiten a una velocidad de 1250 Mbaudios, por lo que es necesario utilizar láser. Para aumentar la versatilidad se decidió incluir los dos tipos de fibra multimodo, 50/125 y 62,5/125, y extender todo lo posible el alcance, tanto en primera como en segunda ventana (Fibre Channel en multimodo utilizaba primera ventana únicamente). Las primeras experiencias de transmisión de Gigabit Ethernet en fibras multimodo pusieron de manifiesto un fenómeno nuevo denominado 'retardo del modo diferencial' que tiene el efecto de ensanchar los pulsos luminosos de forma proporcional a la distancia recorrida; esto limita el alcance, ya que a partir de una cierta distancia un pulso se solapa con el siguiente. La búsqueda de una solución a este problema retrasó unos meses la aprobación del estándar respecto a lo inicialmente previsto. Finalmente se aprobaron dos sistemas denominados 1000BASE-SX (S de 'Short wavelength', o sea primera ventana), que funciona en fibra multimodo únicamente (50/125 ó 62,5/125), y 1000BASE-LX (L de 'Long wavelength', segunda ventana) que puede utilizar multimodo (ambos tipos) o monomodo. El alcance depende como es lógico del tipo de fibra y la ventana utilizados.

Los emisores láser de primera ventana emplean una técnica denominada VCSEL (Vertical Cavity Surface Emitting Laser) muy similar a la de los lectores de discos compactos, por lo que resultan muy baratos de fabricar. Desgraciadamente aún no existen emisores láser VCSEL de segunda ventana, por lo que para 1000BASE-LX hay que emplear otras técnicas bastante más costosas como el láser Fabry-Perot, con lo que las interfaces LX resultan unas tres veces más caras; a cambio la segunda ventana permite generalmente un mayor alcance. Con 1000BASE-LX sobre fibra monomodo se puede llegar según el estándar a 5 Km. Se emplean los mismos emisores LX en fibra multimodo que en monomodo.

Los emisores láser VCSEL de primera ventana son tan baratos de fabricar que pueden resultar competitivos frente a los emisores LED no láser de segunda ventana; utilizados por ejemplo en Fast Ethernet (100BASE-FX). Esto ha provocado recientemente un interés por utilizar emisores de primera ventana, hasta el punto que en 1998 se creó con este objetivo una asociación denominada Short Wave Length Alliance (SWLA) en el seno de la TIA (entidad que estandariza las normativas de cableado estructurado). Las propuestas presentadas al comité 802.3 de crear un grupo de trabajo que elabore un estándar Fast Ethernet en primera ventana no prosperaron, por lo que los interesados, siguiendo una actitud plenamente pragmática, crearon un grupo de trabajo en el seno de la TIA para elaborar este estándar denominado 100BASE-SX. El estándar fue ratificado finalmente en junio del 2000. Los productos comerciales basados en 100BASE-SX tienen un costo aproximadamente la mitad que el de los 100BASE-FX. El alcance es de unos 500m y viene limitado por la atenuación. La principal finalidad del

¹⁵ Técnicamente ese desacoplamiento se denomina diferente 'apertura numérica'. En teoría la pérdida producida por una unión 62,5-50 es de $10\log_{10}(62,5/50)^2 = 1,9$ dB. Esto habría que añadirlo a la pérdida de 0,3-0,5 dB que tiene cualquier conexión normal. Con esta fórmula podemos calcular también la pérdida que tendría un acoplamiento multimodo-monomodo que sería de $10\log_{10}(62,5/10)^2 = 16$ dB; esto haría que el enlace no funcionara en la mayoría de los casos.

¹⁶ Actualmente el límite se encuentra en los enlaces ATM OC12, que transmiten a 622 Mbaudios.

100BASE-SX es competir con el cobre UTP-5 en el cableado interior (vertical y horizontal) de los edificios; aquí su mayor alcance permite una mayor concentración de los armarios de cableado, tendencia que se da mucho en la actualidad para simplificar la gestión de la red de distribución; además 100BASE-SX brinda las ventajas de seguridad e inmunidad radioeléctrica de la fibra a un precio más competitivo que antes. Sin embargo, y a pesar de la aparición de los emisores VCSEL la fibra seguirá siendo, en todas las velocidades, más cara que el cobre puesto que requiere componentes adicionales.

La tabla 4.4 resume las principales características de todos los medios de fibra óptica actualmente utilizados en Ethernet, y sus alcances.

Medio	Ventana	Luz	Fibra	Conector	Distancia
10BASE-FL	1 ^a	Normal	62,5/125	ST	2 Km
100BASE-FX	2 ^a	Normal	62,5/125	SC	2 Km
100BASE-SX (propuesto)	1 ^a	Láser	62,5/125 50/125	SC o ST	500 m 500 m
1000BASE-SX	1 ^a	Láser	62,5/125 50/125	SC	275 m 550 m
1000BASE-LX	2 ^a	Láser	62,5/125 50/125 9/125	SC	550 m 550 m 5 Km

Tabla 4.4.- Medios de transmisión en fibra óptica utilizados en Ethernet

Es importante mencionar que la práctica, utilizada frecuentemente en 10BASE-FL, de ver directamente con el ojo un emisor o una fibra óptica para saber cual es el lado transmisor se convierte en algo peligroso con Gigabit Ethernet ya que existe el riesgo de que la retina reciba luz láser, que puede producir un daño irreversible. Además, a diferencia de lo que ocurría en 10BASE-FL, incluso funcionando en primera ventana la luz láser resulta invisible para la mayoría de las personas ya que tiene toda su potencia concentrada en una banda de solo 0,5nm de anchura en una longitud de onda que puede estar entre los 770 y 860 nm.

4.4.2.3 Gigabit Ethernet y el retardo en modo diferencial

A diferencia de lo que sucede con 10BASE-FL o 100BASE-FX, donde el alcance viene limitado por la atenuación de la señal, en Gigabit Ethernet sobre fibra multimodo el alcance está limitado fundamentalmente por el efecto antes mencionado del retardo en modo diferencial. Descrito de forma muy sencilla este fenómeno consiste en que cuando el haz láser llega a la fibra, al ser ésta apreciablemente más ancha que el haz éste genera haces de luz secundarios que van ‘rebotando’ por las paredes al avanzar por la fibra. Este rebote no ocurre exactamente por igual para todos los rayos, por lo que unos realizan un trayecto un poco mas largo que otros, con lo que el pulso de luz se ensancha ligeramente. El ensanchamiento es mayor cuanto mayor es la distancia recorrida; además a mayor velocidad de transmisión menos ensanchamiento puede tolerarse, ya que un pulso se solaparía con el siguiente; el efecto del retardo en modo diferencial es por tanto proporcional a la distancia y a la frecuencia de los pulsos, es decir a la velocidad de transmisión. Existe un parámetro característico de las fibras que mide esta limitación, que se conoce como ancho de banda modal o simplemente ancho de banda, y se mide en MHz*Km. Por ejemplo con un ancho de banda de 1000 MHz*Km podremos enviar como máximo 1 millón de pulsos por segundo a una distancia de 1 Km, o medio millón de pulsos a 2 Km, o dos millones a 500 m.

Los factores principales que influyen en el ancho de banda de una fibra son los siguientes:

- El *diámetro del núcleo*: el ancho de banda es menor cuanto mayor es el diámetro del núcleo, ya que el pulso va más ‘ancho’ y rebota más. Por tanto en general la fibra de 62,5/125 tiene menor ancho de banda que la de 50/125, y el retardo en modo diferencial no se da, o es despreciable, en fibras monomodo (de hecho el parámetro ancho de banda modal no se especifica en las fibras monomodo).

- La *longitud de onda*: el ancho de banda es mayor cuanto mayor es la longitud de onda, ya que el haz viaja más ‘ajustado’ en la fibra. Por tanto una misma fibra suele tener mayor ancho de banda en segunda ventana que en primera.
- La *calidad de la fibra*. Los procesos de fabricación permiten reducir hasta cierto punto la creación de haces secundarios, con lo que el ensanchamiento se reduce. Por tanto las fibras construidas con mayores controles de calidad tienen un ancho de banda mayor.

Los catálogos de los fabricantes suelen especificar para cada tipo de fibra el ancho de banda para cada ventana. Hoy en día los anchos de banda exigidos por los estándares EIA e ISO son ampliamente superados por las fibras de alta calidad, por lo que en la elección de una fibra que se prevea utilizar en Gigabit Ethernet es conveniente elegir la de mayor ancho de banda posible, no conformándose con que cumpla los estándares habituales. El encarecimiento que esto supone en el costo total de la instalación es normalmente despreciable. Con un ancho de banda mayor tendremos mayores alcances y podremos usar emisores 1000BASE-SX en mas situaciones, no teniendo que recurrir a los de segunda ventana 1000BASE-LX más caros. A título de ejemplo mostramos en la tabla 4.5 los anchos de banda de fibra multimodo según los estándares EIA/TIA e ISO/IEC, así como los valores garantizados de algunas de las mejores fibras del mercado.

Fibra o estándar	Diámetro (μm)	Ancho de banda 850 nm (MHz*km)	Ancho de banda 1300 nm (MHz*km)
EIA/TIA 568	62,5/125	160 (220m)	500(550 m)
ISO/IEC 11801	62,5/125	200(275 m)	500(550 m)
Alcatel GIGAlite	62,5/125	500	500
BRUGG FG6F	62,5/125	300	1200
ISO/IEC 11801	50/125	200 (275 m)	500 (550 m)
ISO/IEC 11801 (propuesto)	50/125	500 (550 m)	500 (550 m)
ANSI Fibre Channel	50/125	500 (550 m)	500 (550 m)
Alcatel GIGAlite	50/125	700	1200
BRUGG FG5F	50/125	600	1200

Tabla 4.5.- Ancho de banda en 1ª y 2ª ventanas de los estándares y algunas fibras típicas de alta calidad (entre paréntesis aparece el alcance máximo en Gigabit Ethernet para cada caso)

Aunque hay una correlación entre el ancho de banda y la distancia máxima la proporción no es lineal, por lo que no es fácil extrapolar. Además a distancias mayores habrá que cuidar de no superar el valor máximo de atenuación, que ha sido fijado con criterios muy severos [7]. En todo caso la prueba definitiva es realizar la conexión y hacer un seguimiento de la tasa de error o BER siguiendo la misma técnica que hemos descrito para el caso de cable de cobre¹⁷. En caso de problemas habría que revisar la instalación y eventualmente pasar a un medio de mayor alcance (de SX a LX o de multimodo a monomodo).

En general en el diseño de cualquier instalación en la que se prevea la posibilidad de utilizar Gigabit Ethernet a distancias de mas de 200 m se deberían analizar en detalle las características de la fibra a emplear y las distancias a cubrir, y considerar la posibilidad de emplear fibra de 50/125, que tiene un mayor ancho de banda y por tanto mayor alcance (ver por ejemplo tabla 4.5). Desgraciadamente la fibra 50/125 tiene como ya hemos comentado un menor alcance en 10BASE-FL y 100BASE-FX, por lo que su instalación puede comprometer en algún caso el funcionamiento en entornos donde haya también Ethernet o Fast Ethernet. En cableado entre edificios se debería considerar, además de fibra multimodo, el tendido de fibra monomodo, ya que nos permitirá distancias de hasta 5 Km en segunda ventana¹⁸.

¹⁷ Sin embargo el BER considerado aceptable para fibra óptica es cien veces menor que en el caso de cable UTP, del orden de 10^{-12} .

¹⁸ La optoelectrónica utilizada para fibra monomodo en 1000BASE-LX es la misma que en multimodo.

4.4.2.4 Códigos

En Ethernet, como en todas las redes locales, la transmisión se realiza de manera asíncrona, es decir no hay un reloj maestro que mantenga sincronizados los equipos. Por este motivo se utiliza un sincronismo embebido en los propios datos mediante el uso de códigos que incorporan cierto nivel de redundancia. Por ejemplo a 10 Mb/s Ethernet emplea el código Manchester, que utiliza dos voltajes (+0,85 y -0,85 voltios en 10BASE5) e identifica el bit 0 como una transición alto-bajo y el 1 como una transición bajo-alto¹⁹. Según cual sea la secuencia de bits a transmitir habrá o no otra transición además entre los bits, que carece de importancia a la hora de interpretar la información transmitida pero que permite mantener sincronizados los equipos. El código Manchester tiene el inconveniente de que duplica la frecuencia de funcionamiento, el emisor debe poder generar doble número de pulsos de lo que haría falta con un código binario simple, como el NRZ (Non Return to Zero). Dicho de otro modo, en Manchester se transmiten 20 Mbaudios (o Msímbolos/s) para enviar 10 Mb/s de información útil. Como consecuencia de esto la señal transmitida por el cable es también de una frecuencia doble de lo que sería necesario con un código binario simple. La frecuencia fundamental de la señal en Ethernet oscila entre 5 MHz (para la secuencia 010101...) y 10 MHz (para las secuencias 1111... o 0000...) ²⁰.

El código Manchester es poco eficiente, pero resulta sencillo y barato de implementar. Su mayor inconveniente estriba en la elevada frecuencia de la señal, que requiere un cable de altas prestaciones, pero esto no preocupaba a los diseñadores originales de Ethernet que utilizaban cable coaxial. El uso de código Manchester complicó bastante las cosas cuando se adaptó Ethernet para cable no apantallado; entonces habría sido preferible otro código más eficiente que utilizara una frecuencia menor, pero la arquitectura de Ethernet a 10 Mb/s obliga a utilizar código Manchester en todos los medios físicos en que se implemente²¹.

En Fast Ethernet el uso de código Manchester habría requerido transmitir 200 Mbaudios, lo cual habría hecho muy difícil llegar con cable categoría 5 a la distancia de 100m que fijan las normativas de cableado. Por esto se eligieron otros códigos más ricos, es decir con menos overhead²², que permitían reducir la frecuencia de la señal, y consecuentemente el requerimiento en cuanto al cable utilizado. Los medios 100BASE-FX y 100BASE-TX, conocidos conjuntamente como 100BASE-X, utilizan el código 4B/5B desarrollado originalmente para FDDI que emplea 5 símbolos para enviar 4 bits. De las $2^5 = 32$ combinaciones posibles solo se utilizan 16, lo cual permite evitar las combinaciones con todo ceros o todo unos, que serían nefastas desde el punto de vista del sincronismo²³, y da una cierta capacidad de detección de errores. Con 4B/5B la señalización para 100 Mb/s es de 125 Mbaudios, con lo que la frecuencia fundamental es de 62,5 MHz. Esto permite utilizar cable categoría 5 (especificado hasta 100 MHz).

Según el teorema de Nyquist el ancho de banda mínimo necesario para transmitir n baudios es $n/2$ Hertzios, por lo que a dicha frecuencia se le denomina frecuencia de Nyquist. En las señales digitales esa es la frecuencia fundamental máxima de la señal. Por ejemplo, con un código binario simple (1 bit = 1 baudio) podríamos enviar 10 Mb/s en 10 Mbaudios, utilizando por tanto una frecuencia fundamental máxima de 5 MHz. Al utilizar codificación Manchester se duplican los baudios y por tanto la frecuencia. Ahora bien, para recibir con fiabilidad suficiente la onda cuadrada de una señal digital hay que transmitir no solo la frecuencia fundamental sino también componentes de frecuencia superior. Cuanto mayor sea la capacidad del medio físico de transmitir señales de alta frecuencia más componentes se transmitirán, más fidelidad tendrá la señal recibida y se producirán menos errores. Generalmente transmitiendo hasta el doble de la frecuencia de Nyquist se consiguen valores de BER inferiores a 10^{-10} , que es lo requerido habitualmente en los estándares para las transmisiones sobre cable UTP. La mayoría de los transceivers se diseñan partiendo de esta hipótesis, y se filtran en emisión las señales de frecuencia superior. Por tanto el medio físico debería ser capaz de transmitir señales hasta una frecuencia igual al número de baudios, aproximadamente. Así por ejemplo en el medio 100BASE-TX, con una frecuencia fundamental de 62,5

¹⁹ En realidad los estándares no especifican si el código Manchester ha de ser así o al contrario. El convenio aquí descrito es el que se utiliza habitualmente en redes locales, aunque muchos libros lo describen al revés.

²⁰ Por esto en el estándar 802.3 para 10 Mb/s se especifican las atenuaciones máximas del cable a 5 y 10 MHz.

²¹ Esto se debe a que en la Ethernet a 10 Mb/s la codificación se realiza en el controlador, no en el transceiver. Dicho de otro modo, el código Manchester ya está presente en el conector AUI, por lo que se ha de emplear en todos los medios físicos. En cambio a 100 Mb/s y 1000 Mb/s la codificación se realiza en el transceiver, con lo que para cada medio físico puede elegirse el código que mas convenga. Evidentemente los diseñadores de Fast y Gigabit Ethernet aprendieron la lección a partir de los errores cometidos por sus predecesores.

²² Decimos que un código es mas 'rico' cuando la eficiencia (cociente *bits-por-segundo/audios*) es mayor. Por ejemplo Manchester tiene una eficiencia de 0,5, mientras que el código 4B/5B (4 bits/5 baudios) tiene una eficiencia de 0,8.

²³ Podemos decir que el sincronismo 'odia' la monotonía.

MHz, las señales que viajan por el cable llegan a valores de hasta 125 MHz, y es importante que lleguen correctamente para garantizar una BER aceptable. Este valor es ligeramente superior al máximo previsto en la categoría 5 (100 MHz), pero esto normalmente no supone un problema ya que las prestaciones a 125 MHz suelen ser muy similares a las de 100 MHz. Pero en el caso por ejemplo de ATM a 155,52 Mb/s (que utiliza código NRZ) sobre cable UTP la frecuencia máxima a transmitir es de 155,52 MHz, que ya supera de forma sensible el límite de la categoría 5; está demostrado [8, 9, 10] que un cable puede cumplir perfectamente las exigencias de la normativa categoría 5 hasta 100 MHz y no ser capaz de satisfacer la BER de 10^{-10} exigida por los estándares ATM correspondientes [11] si sus prestaciones decaen de forma drástica en el intervalo 100-155 MHz²⁴. Afortunadamente estas situaciones, además de poco frecuentes, solo suponen un problema cuando el enlace se encuentra en el límite de las especificaciones (100m de longitud por ejemplo) lo cual ocurre raramente. En cualquier caso es preciso recordar la conveniencia de realizar un estudio y seguimiento de los valores de BER de la red.

Cuando se estandarizó Fast Ethernet además del cable categoría 5 se quería utilizar el categoría 3, del cual había una base instalada importante. Para ello se diseñó el medio físico 100BASE-T4, que a diferencia de los demás no derivaba de FDDI. Para reducir la frecuencia máxima a valores aceptables se adoptaron dos medidas novedosas:

- Emplear códigos que utilizan más de dos voltajes y permiten una mayor eficiencia; concretamente se utiliza el 8B/6T que prevé tres voltajes posibles y tiene una eficiencia de 1,33 bits/baudio. La denominación 8B/6T significa 8 bits / 6 trits.
- Repartir la señal en tres pares: el 1, 3 y 4 para un sentido y el 2, 3 y 4 para el contrario²⁵.

En 100BASE-T4 se transmiten 25 Mbaudios por cada par. Debido a la eficiencia del código utilizado (1,33) esto equivale a 33,3 Mb/s, que al transmitirse simultáneamente por tres pares da los 100 Mb/s. La frecuencia máxima transmitida es por tanto de 25 MHz. Por su forma de funcionamiento 100BASE-T4 no permite la transmisión full dúplex.

Una evolución de 100BASE-T4 es el medio denominado 100BASE-T2, que utiliza únicamente dos pares de cable categoría 3. Los dos pares restantes se pueden aprovechar para servicios de baja velocidad, tales como telefonía²⁶. Además 100BASE-T2 permite una comunicación full dúplex, cosa que no era posible con 100BASE-T4. Para conseguir esto utilizando la misma frecuencia máxima que en 100BASE-T4 (25 MHz) se aplican dos técnicas novedosas:

- Se emplea una codificación quinario (5 voltajes) denominada PAM 5x5. Los símbolos se agrupan de dos en dos; cada grupo tiene por tanto $5^2=25$ posibles valores que se utilizan para representar 4 bits (16 estados). Esto permite elegir los 16 valores mas adecuados y descartar los 9 menos interesantes desde el punto de vista de sincronismo (por ejemplo los que no provocan transiciones), con lo que se tiene además cierta capacidad de detección de errores. La codificación PAM 5x5 tiene una eficiencia de 2 (cada baudio representa dos bits).
- Se emplea transmisión dual-duplex, consistente en transmitir y recibir datos *simultáneamente* en ambos sentidos por cada par; esto se consigue mediante circuitos híbridos que filtran la señal de ida y vuelta en cada transceiver. Al repartir la señal en dos pares cada uno transporta 50 Mb/s, que con PAM 5x5 supone 25 Mbaudios, equivalentes a 25 MHz de frecuencia máxima.

En Gigabit Ethernet los medios 1000BASE-SX, 1000BASE-LX y 1000BASE-CX (conocidos genéricamente como 1000BASE-X) emplean código 8B/10B (8 bits/10 baudios) que ya se utilizaba en Fibre Channel (de donde deriva toda la capa física de 1000BASE-X). Este código tiene una eficiencia de 0,8, igual que 4B/5B, pero al agrupar mas símbolos tiene una mayor redundancia, ya que solo una de cada cuatro combinaciones posibles es válida ($2^8/2^{10} = 256/1024 = 1/4$), mientras que en 4B/5B es válida una

²⁴ Por este motivo es interesante cuando se comprueba una instalación categoría 5 hacer medidas de los parámetros habituales hasta 155 MHz, aun cuando las normativas solo requieran llegar a 100 MHz; si el cable tiene un comportamiento normal en ese rango de frecuencias no se presentarán normalmente problemas si se utiliza la red para enlaces ATM.

²⁵ No se utilizan los cuatro pares porque el protocolo CSMA/CD requiere, para poder detectar las colisiones, que haya un par asignado de manera permanente para cada sentido.

²⁶ El uso de los pares libres para telefonía o servicios de baja velocidad está permitido por la norma 802.3 también en el caso de 10BASE-T o 100BASE-TX. En cambio no está permitido utilizar los pares libres para una segunda conexión de datos (10BASE-T por ejemplo) ya que el crosstalk NEXT (interferencia entre señales paralelas viajando en el mismo sentido) que esto introduciría sería excesivo.

de cada dos ($2^4/2^5 = 16/32 = 1/2$). A cambio en caso de error se pierde el doble de información, ya que se manejan bloques de 8 bits en vez de 4. La señalización se realiza a 1250 Mbaudios.

La transmisión de Gigabit Ethernet por cable UTP categoría 5 (1000BASE-T) se realiza de forma muy similar a 100BASE-T2: se utiliza codificación PAM 5x5 con una frecuencia de señalización de 125 Mbaudios, lo cual da 250 Mb/s; a continuación se envía este caudal en paralelo por los cuatro pares, llegando así a 1 Gb/s; para funcionar en modo full dúplex se emplea transmisión dual duplex. Dado que la frecuencia máxima es la misma que la de 100BASE-TX se puede aprovechar circuitería ya desarrollada para la sincronización de la señal y para la supresión de interferencia electromagnética. Se ha preferido no aumentar la frecuencia por encima de los 125 MHz para evitar problemas como los de ATM a 155 Mb/s que ya hemos comentado.

El reparto de la información transmitida en varios pares plantea nuevos requerimientos en lo que a las características del cable se refiere. El ejemplo mas claro en este sentido es la diferencia de retardo entre los diversos pares, producida por su diferente longitud; esto no es un problema cuando la información viaja en un solo par, pero cuando se reparte en varios existe una tolerancia máxima en la denominada 'delay skew' (asimetría en el retardo) por encima de la cual la información no podrá reconstruirse adecuadamente en el destino; este es uno de los parámetros que se han añadido en la especificación 5 Enhanced, a fin de ampliar el margen de seguridad para el funcionamiento de 1000BASE-T. También es preciso medir y limitar la interferencia electromagnética mutua inducida entre pares que transmiten simultáneamente. Aunque 100BASE-T4 y 100BASE-T2 también reparten la información en varios pares, no existe una especificación 3 Enhanced que contemple estos casos, ya que al funcionar a velocidades 10 veces inferiores los márgenes de tolerancia son más amplios.

A título de ejemplo la tabla 4.6 muestra los códigos utilizados en algunas de las tecnologías de red local más habituales.

Tipo de red	Velocidad (Mb/s)	Esquema de codificación	Número de pares	Frecuencia Señalizac. (Mbaud.)	Categoría mínima de cable UTP
1BASE-5	1	Manchester	1	2	2
Token Ring	4	Manchester Diferencial	1	8	3
10BASE-T	10	Manchester	1	20	3
100BASE-T4	100	8B/6T	3	25	3
100BASE-T2	100	PAM 5x5	2	25	3
100VG-AnyLAN	100	5B/6B	4	30	3
Token Ring	16	Manchester Diferencial	1	32	3
ATM	25,6	4B/5B	1	32	3
FDDI, 100BASE-X	100	4B/5B	1	125	5
1000BASE-T	1000	PAM 5x5	4	125	5
ATM	155,52	NRZ	1	155,52	5
1000BASE-X	1000	8B/10B	1	1250	-

Tabla 4.6.- Códigos y frecuencias máximas utilizadas en las redes locales mas habituales

4.4.2.5 Fiabilidad

El estándar 802.3 establecía inicialmente una BER máxima de 10^{-8} . Las nuevas especificaciones de medios físicos han ido fijado requerimientos superiores, por ejemplo FDDI (en la que se basa el 100BASE-X) fija una BER no superior a 4×10^{-11} , y Fibre Channel (en que se basa 1000BASE-X) una BER no superior a 10^{-12} ; los medios en cable UTP exigen una BER máxima de 10^{-10} . Una buena instalación de red Ethernet actual en un entorno de oficina puede dar sin problemas una BER inferior a 10^{-12} . Transmitiendo a 10 Mb/s ininterrumpidamente esto representa menos de un error por día, por lo que

los errores de CRC en una red Ethernet funcionando correctamente (y en cualquier red local excepto las inalámbricas) deberían ser virtualmente inexistentes, salvo los originados por la conexión y desconexión de equipos.

Debido a la elevada fiabilidad del medio físico el protocolo MAC de Ethernet no realiza ningún tipo de verificación, ya que la probabilidad de que una trama no llegue a su destino es tan baja que esto sería perjudicial para el rendimiento de la red. Pero precisamente por eso en el caso de que se produzcan errores el rendimiento decae de forma espectacular. Es importante por tanto hacer un seguimiento regular de los errores de CRC en la red para detectar y corregir lo antes posible cualquier anomalía que pueda producirse.

4.4.3 Funcionamiento de Ethernet

4.4.3.1 Topología

El correcto funcionamiento de CSMA/CD requiere que el tiempo de ida y vuelta entre dos estaciones cualesquiera no supere el tiempo de transmisión mínimo, es decir lo que tarda en emitirse la trama mínima permitida. El tiempo de transmisión mínimo depende de la velocidad de la red, y el tiempo máximo de ida y vuelta fija a su vez unas distancias máximas entre las estaciones. Estos cuatro parámetros (velocidad de la red, tamaño de trama mínimo, tiempo de ida y vuelta y distancia máxima) están relacionados entre sí, como se muestra en la tabla 4.7.

Velocidad (Mb/s)	Tamaño de trama mínimo (bits)	Tiempo de ida Y vuelta (μ s)	Distancia Máxima (m)	Número de Repetidores
10	512	51,2	4000	1
100	512	5,12	412	0
1000	4096	4,096	330	0

Tabla 4.7.- Relación entre la velocidad, trama mínima, tiempo de ida y vuelta y distancia máxima en una red Ethernet.

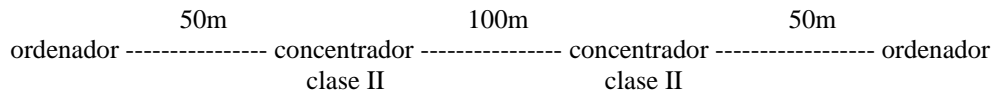
Las distancias indicadas en la tabla 4.7 son el valor máximo, y sólo pueden conseguirse muy raramente. En la práctica la necesidad de utilizar repetidores reduce la distancia máxima de forma considerable. En principio una determinada topología de red es válida si el tiempo de ida y vuelta entre cada par de estaciones de la red es inferior al que aparece en la tabla 4.7.

El estándar IEEE 802.3 establece dos formas de verificar si una determinada topología Ethernet es válida. La primera, denominada Modelo 1, corresponde a un conjunto de reglas 'enlatadas' sobre el número máximo de repetidores que puede haber entre dos estaciones, y la distancia máxima entre ellos. Cumpliendo esas reglas el usuario se asegura de que su red no excede los valores máximos en el tiempo de ida y vuelta. Sin embargo el Modelo 1 realiza una serie de suposiciones simplificadoras, por lo que no siempre una topología que incumpla sus reglas supera el tiempo máximo de ida y vuelta. Para esos casos el estándar establece el denominado Modelo 2, que consiste en realizar cálculos detallados del retardo para cada componente y tramo de cable en cada trayecto. Una topología aceptable según el Modelo 2 es válida, aun cuando viole alguna de las reglas del Modelo 1.

Veamos un ejemplo. Supongamos que queremos montar una red Fast Ethernet 100BASE-TX conectando entre sí dos concentradores de clase II²⁷. Las reglas del Modelo 1 establecen en este caso que entre los concentradores no puede haber más de 5m de cable. Esto da una distancia máxima entre equipos finales de 205m, 5 entre los concentradores y 100 de cada concentrador al ordenador (ya que el Modelo 1 supone que el cable del usuario final puede tener hasta 100m de longitud).

²⁷ En Fast Ethernet existen dos tipos de concentradores, los de clase I que tienen un retardo de 1,4 μ s (equivalente a 140 bits) y los de clase II que tienen un retardo de 0,92 μ s (equivalente a 92 bits).

Supongamos que queremos instalar los concentradores separados entre sí por una distancia de 100m. En principio esto viola la regla del Modelo I para esta topología, ya que supondría una distancia de 300m entre ordenadores, lo cual excede el máximo permitido. Pero imaginemos que podemos asegurar que los equipos finales nunca utilizarán más de 50m de cable, con lo que en principio la distancia máxima no superaría los 200m. Vamos a aplicar las reglas del Modelo 2 para ver si realmente esta topología es conforme al estándar. Para ello calcularemos el tiempo de ida y vuelta del trayecto utilizando los valores especificados por el estándar para cada componente. El trayecto en que estamos interesados es el siguiente:



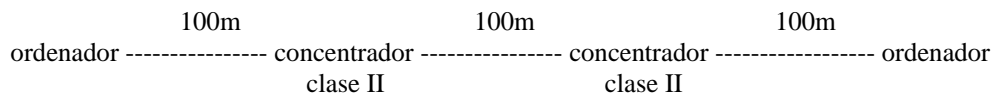
Los valores del tiempo de ida y vuelta se detallan en la tabla 4.8.

Componente	Tiempo de ida y vuelta (en μ s)	Tiempo de ida y vuelta (en bits)
2 Tarjetas de red 100BASE-TX	1,00	100
2 Repetidores clase II	1,84	184
200 metros de cable UTP-5	2,22	222
TOTAL	5,06 μs	506 bits

Tabla 4.8.- Cálculo del tiempo de ida y vuelta para una topología de red 100BASE-TX siguiendo el Modelo 2

Como el resultado obtenido es inferior a 5,12 μ s concluimos que la topología es válida y debe funcionar.

Ahora supongamos que sustituimos los cables de 50m por cables de 100m, con lo que la topología queda de la siguiente manera:



Si repetimos el cálculo del tiempo de ida y vuelta para este caso obtenemos el resultado que aparece en la tabla 4.9.

Componente	Tiempo de ida y vuelta (en μ s)	Tiempo de ida y vuelta (en bits)
2 Tarjetas de red 100BASE-TX	1,00	100
2 Repetidores clase II	1,84	184
300 metros de cable UTP-5	3,34	334
TOTAL	6,18 μs	618 bits

Tabla 4.9.- Cálculo de una topología de red 100BASE-TX inválida siguiendo el Modelo 2

Al superar el valor máximo permitido la topología es inválida, como era de esperar.

Este cálculo se debería hacer para el par de estaciones más distante de la red. Generalmente será necesario hacerlo para varias parejas, ya que en una red compleja no suele ser evidente cual es la que está más distante.

Similares cálculos se pueden hacer también para otras topologías para redes de 10, 100 o 1000 Mb/s. Para información detallada sobre validación de topologías en redes Ethernet, siguiendo el Modelo 1 o el Modelo 2, se pueden consultar las referencias [3], [13], [14] y [15] así como la documentación de los fabricantes.

En el ejemplo anterior hemos supuesto los valores estándar de retardo. Los valores reales serán siempre inferiores. Si se dispone del retardo real suministrado por el fabricante para cada componente es posible hacer el cálculo con mas precisión. Por ejemplo el cable categoría 5 debe tener según el estándar un retardo máximo de 1,112 bits/m (equivalente a una velocidad de la onda electromagnética de 180.000 Km/s), pero hoy en día prácticamente todo el cable categoría 5 que se fabrica tiene un retardo de 1,0 bits/m (200.000 Km/s). Tomando esto en cuenta el cálculo de la tabla 4.9 habría dado un resultado final de 4,84 μ s. En algún caso puede suceder que una topología supere el límite de retardo con valores estándar, pero esté por debajo al utilizar los valores de los componentes utilizados. Aunque dicha topología es válida y debe funcionar correctamente, en general no es recomendable ajustar tanto ya que esto puede suponer que una determinada topología válida deje de serlo si más adelante se sustituye un componente por otro con un retardo mayor. Si a pesar de todo se hace deberá documentarse el hecho de forma muy detallada para evitar problemas futuros.

Una ventaja del Modelo 2 es que nos permite conocer el retardo en la comunicación de ordenadores de nuestra red; como veremos más adelante este dato tiene su interés a la hora de optimizar el rendimiento de la red, y para interpretar de forma correcta datos tales como la tasa de colisiones.

Es fundamental para el correcto funcionamiento de una red asegurarse de que no se supera en ningún caso el retardo máximo permitido. En caso de duda siempre deberemos comprobar recurriendo al cálculo detallado en base al Modelo 2. El principal síntoma de una topología inválida es la pérdida injustificada de tramas y las colisiones tardías, de las que hablaremos mas adelante; en casos extremos puede llegar a ser imposible el intercambio de paquetes pequeños entre determinados pares de estaciones de la red.

Por suerte en las redes que se diseñan actualmente es raro encontrarse con problemas de topología, ya que hoy en día los equipos normalmente se conectan directamente a conmutadores, o si se conectan a concentradores éstos solo aparecen en el primer nivel, estando el segundo nivel y superiores ocupados por un conmutador. Además al conectar directamente equipo a conmutador la transmisión puede realizarse en modo full duplex, con lo que desaparecen las colisiones y por tanto la limitación de distancias impuesta por la necesidad de detectarlas.

4.4.3.2 Direcciones IEEE

Los inventores de Ethernet decidieron asignar direcciones globalmente únicas a cada dispositivo Ethernet direccionable (es decir a cada estación) en todo el mundo. Para ello utilizaban una dirección de seis bytes, de los cuales los tres primeros correspondían al fabricante y los tres últimos al dispositivo. Xerox se ocupaba de administrar la asignación de los tres primeros a los diversos fabricantes.

Este formato de direcciones y este sistema de reparto debió parecer adecuado a los responsables del proyecto 802, ya que decidieron extenderlo a todas las redes locales estandarizadas por ellos. Al adoptarse para otras redes locales Xerox traspasó al IEEE la labor administrativa de registro de los prefijos que hasta entonces había desempeñado. Actualmente el IEEE cobra una cuota de 1250 dólares por cada prefijo asignado a un fabricante. Aunque en principio la asignación de prefijos no es información pública existen diversas recopilaciones mas o menos completas de los prefijos asignados. Algunos analizadores de red utilizan dicha información para facilitar el fabricante de las tarjetas activas en una red.

El estándar permite direcciones de 2 ó 6 bytes, aunque en la práctica sólo se utilizan las de 6 bytes. Además de utilizarse en otras redes 802 las direcciones MAC IEEE se emplean en redes locales no IEEE, como FDDI y Fibre Channel. También se esta extendiendo su uso como sufijo en direcciones de red para construir direcciones únicas de forma automática, por ejemplo en ATM e IPv6; en estos casos la longitud del campo dirección de estos protocolos (20 ó 16 bytes respectivamente) permite emplear sin problemas 6 para la dirección MAC.

Los dos primeros bits de los 48 que componen una dirección MAC IEEE tienen un significado especial:

- El primer bit indica el ámbito del envío. Se contemplan tres posibilidades: envío unicast (a un ordenador), envío multicast (a un grupo de ordenadores) o envío broadcast (a todos los ordenadores). Si el primer bit está a 0 se trata de un envío unicast, mientras que si está a 1 es un envío multicast o broadcast. En caso de que toda la dirección esté a 1 será un envío broadcast,

que deberá ser atendido por todos los ordenadores de la red. Si se trata de una trama multicast tendrá a 1 el primer bit, viniendo especificado por el resto de la dirección el grupo multicast al que va dirigida. En una trama unicast el primer bit será 0, en cuyo caso la trama solo deberá ser interpretada por el ordenador al que va dirigida; las direcciones multicast y broadcast sólo tienen sentido en el campo dirección de destino; en una dirección de origen el primer bit siempre debe estar a cero.

- El segundo bit se utiliza para indicar si se trata de una dirección global (la grabada por el fabricante en el hardware de la tarjeta) o si se trata de una dirección local, asignada por software a ese equipo. Las direcciones locales solo pueden ser utilizadas dentro de la red, ya que en otras redes podrían estar duplicadas. En cambio las globales, dado que son únicas en todo el mundo, podrían utilizarse en principio para enviar tramas a cualquier tarjeta de red existente (otra cosa es que la trama pueda llegar a su destino). Las direcciones locales se emplean en algunos protocolos de red poco utilizados actualmente.

4.4.3.3 La trama Ethernet

La estructura de trama Ethernet es la que se muestra en la tabla 4.10:

Campo	Tamaño (Bytes)
Hueco entre tramas	(12)
Preámbulo	7
Delimitador inicio de trama	1
Dirección de destino	6
Dirección de origen	6
Protocolo/Longitud	2
Datos	0-1500
Relleno	0-46
Secuencia de comprobación (CRC)	4

Tabla 4.10.- Estructura de la trama Ethernet

El hueco entre tramas es un período de tiempo en que no se transmite nada, de duración equivalente a 12 bytes (por ejemplo 9,6 μ s a 10 Mb/s) que sirve para separar las tramas. Este hueco entre tramas es el único mecanismo fiable para detectar cuando termina una trama, ya que el campo longitud puede no existir y aunque exista no se utilizará en tiempo de captura para averiguar cuando termina la trama. El hueco también sirve para dar un respiro al receptor, que puede necesitar un pequeño respiro al final de una trama para realizar diversas tareas de mantenimiento (transvase de buffers de la interfaz de red al host, interrupciones a la CPU, etc.) antes de volver a la escucha. Para asegurar que se respete el hueco el estándar establece que siempre que una estación vaya a enviar una trama deberá esperar el tiempo equivalente a 12 bytes antes de empezar a transmitir el preámbulo²⁸.

El preámbulo está formado por la secuencia 10101010 repetida siete veces, y el delimitador de inicio por la secuencia 10101011. Esta secuencia al ser transmitida con codificación Manchester genera una onda cuadrada de 10 MHz durante 6,3 μ s, lo cual permite a los demás ordenadores sincronizar sus relojes con el emisor. Los dos últimos bits del delimitador de inicio de trama marcan el final del preámbulo y el comienzo de ésta.

Los campos dirección contienen las direcciones de origen y destino utilizando el formato de direcciones IEEE de 6 bytes que hemos descrito.

²⁸ En 1993 un investigador del centro de investigación de Xerox en Palo Alto detectó que muchas interfaces de red no respetaban en determinadas circunstancias el hueco entre tramas. Esta violación de la norma provocaba que se perdieran tramas, ya que algunas estaciones no estaban a la escucha, confiadas de que nadie transmitiría en ese momento. El problema causó un notable revuelo ya que entre los que incumplían la norma se encontraban equipos muy habituales de fabricantes tales como AMD, Cisco, HP, Intel, Network General y Silicon Graphics. Como el fallo afectaba incluso a analizadores (HP y Network General) el problema solo podía detectarse con un osciloscopio.

El campo datos puede tener una longitud variable entre 0 y 1500 bytes.

La secuencia de comprobación es un CRC de 32 bits basado en un generador polinómico de grado 32.

El estándar 802.3 establece que la trama (entendiendo por trama la parte que va desde dirección de destino hasta el checksum, ambos inclusive) debe tener una longitud mínima de 64 bytes; en caso de que el campo datos sea menor de 46 bytes se utiliza el campo relleno para asegurar que este requisito se cumpla. A efectos de la longitud de la trama el preámbulo y el delimitador de inicio no se consideran parte de esta. La longitud máxima de una trama 802.3 es por tanto 1518 bytes.

La longitud mínima de una trama Ethernet fija el diámetro de la red²⁹, ya que para el correcto funcionamiento del protocolo CSMA/CD es preciso que el tiempo de ida y vuelta no sea nunca superior a lo que tarda en emitirse una trama del tamaño mínimo. De haber mantenido la trama mínima de 64 bytes en Gigabit Ethernet el diámetro máximo habría sido de unos 45 m, inaceptable en la mayoría de situaciones. Para evitar esto la trama Gigabit Ethernet incorpora un segundo relleno denominado 'extensión de portadora' que se añade al final de la trama para garantizar que la longitud mínima nunca sea inferior a 512 bytes (4096 bits). De esta forma el tiempo de ida y vuelta máximo es de 4,096 μ s y el diámetro puede ser de 330 m. Este segundo relleno no es formalmente parte de la trama Ethernet, por lo que solo existirá mientras la trama viaje por Gigabit Ethernet. De esta forma se respeta la compatibilidad con los tipos anteriores de Ethernet. En el caso de que una trama con extensión de portadora sea transmitida a una red de 100 o 10 Mb/s la extensión de portadora se eliminará, e inversamente, si una trama menor de 512 bytes llega a una red Gigabit Ethernet desde Fast Ethernet o Ethernet el conmutador correspondiente añadirá la extensión de portadora necesaria para que la longitud sea de 512 bytes.

El uso de extensión de portadora supone una pérdida de eficiencia en el caso de tramas pequeñas, y un mayor riesgo de colisiones como veremos luego. Para reducir en lo posible estos problemas se prevé la posibilidad de que una estación que quiera enviar varias tramas pequeñas seguidas lo haga como una ráfaga sin necesidad de 'envolver' cada una en una extensión de portadora independiente (sin embargo si aún así la ráfaga es menor de 512 bytes seguirá generándose una extensión de portadora).

La longitud máxima de una trama Ethernet es de 1518 bytes (1500 bytes de datos mas cabeceras) Un tamaño mayor permitiría mejorar la eficiencia, ya que se transmitirían menos tramas y se enviarían menos cabeceras; también se reducirían los recursos de procesador empleados en procesar las tramas (en la mayoría de las implementaciones actuales el procesado de cada trama provoca una interrupción en la CPU). Por contra un tamaño mayor supondría que una estación pudiera monopolizar la red por mas tiempo (1518 bytes suponen 1,214 ms a 10 Mb/s). El tamaño máximo de trama condiciona también la cantidad de memoria para buffers que debe tener la interfaz de red; cuando se diseñaba Ethernet (1979-1980) 1500 bytes de datos se consideró un compromiso razonable entre costo y eficiencia a la vista de los precios de memoria entonces vigentes. Actualmente, con costos mucho menores y redes mas rápidas estos mismos argumentos aconsejarían el uso de tramas mayores, por lo que de vez en cuando surge la propuesta de ampliar el tamaño máximo de trama de Ethernet implementando lo que se conoce como 'jumbo-frames'. Pero no parece factible que esta idea prospere en un futuro próximo, ya que requiere importantes modificaciones al estándar. Por otro lado parece que buena parte de la mejora en eficiencia que podría obtenerse con tramas mayores (la relativa al tiempo de proceso y las interrupciones a la CPU) puede conseguirse con pequeñas mejoras en los controladores de red (poniendo algunas puertas lógicas mas, es decir un poco mas de silicio, en la tarjeta), con lo que los beneficios de utilizar tramas mayores serían menores de lo que a primera vista podría pensarse.

4.4.3.4 Colisiones

Respecto a lo que supondría un protocolo basado en el puro azar, como es el caso de ALOHA, el CSMA/CD incorpora dos mejoras que aumentan el rendimiento: en primer lugar, no se transmite si hay otra estación hablando (CSMA, Carrier Sense Multiple Access) y en segundo, si mientras se está transmitiendo detecta que otra estación también transmite (es decir se produce una colisión) la estación se calla, en lugar de seguir transmitiendo inútilmente hasta el final de la trama (CD, Collision Detect). Mucho se ha dicho (y no siempre acertadamente) sobre las colisiones y su efecto en el rendimiento de Ethernet, por lo que este tema merece tratarse con cierto detalle.

²⁹ Definimos diámetro de la red como la distancia máxima entre dos estaciones.

Se produce una colisión cuando dos o más estaciones empiezan a transmitir simultáneamente, o con una separación en el tiempo menor que el tiempo de propagación que las separa³⁰. Por ejemplo en la red que aparece en la tabla 4.8 ($2\tau=5,06 \mu\text{s}$) se producirá una colisión siempre que los dos ordenadores transmitan con una separación en el tiempo menor de $2,53 \mu\text{s}$. Si la separación es mayor que $2,53 \mu\text{s}$ no se producirá colisión ya que el segundo detectará el medio ocupado cuando vaya a transmitir; en ese caso esperará a que el primero termine y transmitirá inmediatamente a continuación, respetando eso sí el tiempo del hueco entre tramas, que para una red de 100 Mb/s como la de este ejemplo es de $0,96 \mu\text{s}$. Aunque transcurridos $\tau \mu\text{s}$ ya no puede ocurrir colisión, desde el punto de vista de la estación emisora la garantía de no colisión sólo se tiene pasados $2\tau \mu\text{s}$, ya que si otra estación empieza a transmitir justamente $\tau-\varepsilon \mu\text{s}$ después (siendo ε arbitrariamente pequeño), entonces la colisión se producirá justo en el otro extremo de la red y tendrán que transcurrir otros $\tau \mu\text{s}$ para que la primera estación detecte la colisión.

Siguiendo con nuestro ejemplo de la tabla 4.8 supongamos que los dos ordenadores intentan transmitir con una separación en el tiempo menor que $2,53 \mu\text{s}$. Al detectar la colisión ambos dejan de transmitir y a partir de ese momento dividen el tiempo en intervalos de $5,12\mu\text{s}$ ³¹. Entonces esperan 0 ó 1 intervalos para reintentar (la elección entre 0 y 1 la hace cada uno independientemente de forma aleatoria, por lo que la probabilidad de colisión es ahora de 0,5); si se produce la segunda colisión cada ordenador espera aleatoriamente 0, 1, 2 ó 3 intervalos para reintentar, con lo que la probabilidad de colisión baja a 0,25. Si siguen colisionando el número de intervalos se duplica en cada intento sucesivo, con lo que la probabilidad de colisión decrece exponencialmente, hasta que eventualmente ambos eligen intervalos distintos, momento en el cual el que elige el intervalo más bajo transmite primero. El segundo lo hará más tarde, cuando llegue su intervalo elegido, siempre y cuando el primero ya haya terminado para entonces; de lo contrario el segundo quedará entonces a la espera de que el primero termine para transmitir inmediatamente después. El cómputo del tiempo a efecto del cálculo de intervalos discurre independientemente de que el medio físico se encuentre libre u ocupado. Este mecanismo se conoce con el nombre de retroceso exponencial binario.

Supongamos ahora que una estación ha sufrido una primera colisión, por lo que se encuentra en su segundo intento; aquí elegirá uno de dos posibles intervalos (0 y 1). Si elige el primero transmitirá inmediatamente, mientras que si elige el segundo esperará $5,12 \mu\text{s}$. Por tanto el primer reintento introduce de media un retardo de $2,56 \mu\text{s}$ (suponiendo un reparto equitativo entre ambos intervalos). Si se produce una segunda colisión la estación tendrá que iniciar un tercer intento, eligiendo esta vez entre cuatro posibles intervalos (0, 1, 2 y 3) lo cual introducirá un retardo medio adicional de $7,68 \mu\text{s}$ ($0+5,12+10,24+15,36=30,72/4=7,68$). Como este segundo retardo se sumará al ya sufrido en el primer intento podemos estimar que el retardo acumulado en este segundo intento es de $2,56+7,68=10,24 \mu\text{s}$.

El retroceso exponencial binario tiene la interesante propiedad de ser autoadaptativo, ya que a medida que crece el tráfico aumenta la probabilidad de colisión, lo cual introduce un retardo creciente en las estaciones emisoras con la consiguiente disminución del tráfico. Para evitar introducir retardos excesivos el número de intervalos deja de duplicarse cuando una estación sufre diez colisiones sucesivas. A partir de ese momento se intenta transmitir la trama seis veces más, pero manteniendo constante el número de intervalos³². Si la colisión no se resuelve en 16 intentos el protocolo MAC descarta la trama y reporta el fallo al nivel de red.

En la tabla 4.11 se muestra la evolución en el número de intervalos, rango de tiempo, retardo medio por intento y retardo acumulado medio, para los 16 intentos posibles, en el caso de una red de 10 Mb/s. Sustituyendo los valores de tiempos apropiados se podría construir una tabla similar para el caso de 100 ó 1000 Mb/s.

³⁰ Este tiempo, también llamado τ , es el que tarda la señal eléctrica en viajar de una estación a otra y corresponde a la mitad del tiempo de ida y vuelta 2τ .

³¹ Este es el valor de 2τ máximo permitido en una red Ethernet a 100 Mb/s. En el caso de 10 Mb/s los intervalos serían de $51,2\mu\text{s}$, y en el de 1000 Mb/s, debido a la extensión de portadora, serían de $4,096\mu\text{s}$.

³² Que para entonces es ya de $2^{10}=1024$. Este límite se fijó en concordancia con el número máximo de estaciones de una red Ethernet; supuestamente si en una red con 1024 estaciones colisionaran todas a la vez sería posible satisfacerlas en diez intervalos. Realmente esto sólo ocurriría en el caso, extremadamente improbable, de que cada una de las 1024 estaciones eligiera un intervalo diferente. Hoy en día, dada la potencia de los ordenadores, el número de estaciones se mantiene generalmente muy por debajo del valor máximo.

Número del Intento	Rango de Intervalos	Rango de Tiempo (µs)	Retardo medio (µs)	Retardo acumulado Medio (µs)
0	0	0	0,0	0,0
1	0 - 1	0 - 51,2	25,6	25,6
2	0 - 3	0 - 153,6	76,8	102,4
3	0 - 7	0 - 358,4	179,2	281,6
4	0 - 15	0 - 768,0	384,0	665,6
5	0 - 31	0 - 1.587,2	793,6	1.459,2
6	0 - 63	0 - 3.225,6	1.612,8	3.072,0
7	0 - 127	0 - 6.502,4	3.251,2	6.323,2
8	0 - 255	0 - 13.056,0	6.528,0	12.851,2
9	0 - 511	0 - 26.163,2	13.081,6	25.932,8
10	0 - 1023	0 - 52.377,6	26.188,8	52.121,6
11	0 - 1023	0 - 52.377,6	26.188,8	78.310,4
12	0 - 1023	0 - 52.377,6	26.188,8	104.499,2
13	0 - 1023	0 - 52.377,6	26.188,8	130.688,0
14	0 - 1023	0 - 52.377,6	26.188,8	156.876,8
15	0 - 1023	0 - 52.377,6	26.188,8	183.065,6
16	Se descarta	-	-	-

Tabla 4.11.- Evolución de los intentos tras sucesivas colisiones para una red Ethernet de 10 Mb/s

Un detalle importante a destacar del retroceso exponencial binario es que cuando una estación consigue finalmente transmitir una trama su contador de iteraciones se pone a cero, con lo que al transmitir la siguiente empezará el proceso desde el principio, como si nada hubiera ocurrido. No existe por tanto memoria entre tramas. Esta circunstancia discrimina positivamente a la estación afortunada en una colisión frente al resto, ya que además de conseguir enviar su trama se encuentra en posición ventajosa de cara a los nuevos ‘enfrentamientos’ que tenga que celebrar más tarde con la estación (o estaciones) perdedoras. Esta es la causa del fenómeno denominado *efecto captura*, del que hablaremos más adelante.

La colisión es el mecanismo previsto en Ethernet para la regulación del tráfico, por lo que una cierta proporción de colisiones es algo completamente normal, especialmente si hay tráfico elevado y se transmiten tramas pequeñas. La denominación *colisión* es desafortunada, ya que hace pensar en un suceso incorrecto e indeseable, que normalmente no debería ocurrir. Probablemente si se hubiera elegido el término *coincidencia* o *solapamiento* el evento parecería menos alarmante y la industria de los LEDs amarillos no se habría desarrollado tanto como lo ha hecho.

4.4.4 Rendimiento de Ethernet

4.4.4.1 Tasa de colisiones y rendimiento

Muchos concentradores y equipos de medida incorporan algún indicador de la tasa de colisiones de una red. Dado que a menudo esta información se utiliza como un primer indicador del rendimiento de una red es importante comprender su significado.

Podemos definir la tasa de colisiones mediante la siguiente fórmula:

$$\text{Tasa}_{\text{col}} = N_{\text{col}} / (N_{\text{col}} + N_{\text{trans}})$$

Donde:

Tasa_{col} : Tasa de colisiones
 N_{col} : Número de colisiones ocurridas por segundo
 N_{trans} : Número de tramas transmitidas correctamente por segundo

A menudo la tasa se especifica de forma porcentual. Por ejemplo una tasa de colisiones del 10% indica que se produce de media una colisión por cada nueve tramas transmitidas correctamente.

Si conocemos la tasa de colisiones y el tamaño medio de trama de una red (Tr_{med}) podemos realizar un cálculo aproximado del rendimiento o eficiencia (Ef) de la misma. Para ello haremos la simplificación de suponer que una colisión bloquea el medio de transmisión durante un tiempo equivalente a lo que tarda en transmitirse una trama del tamaño mínimo; dado que, como sabemos, todas las colisiones serán detectadas antes, esta aproximación resulta bastante conservadora y nos debe dar una aproximación pesimista de la situación³³. Haciendo dicha suposición podemos derivar la siguiente fórmula para la eficiencia:

$$Ef = 1 - (Tasa_{col} * 512) / (Tasa_{col} * 512 + (1 - Tasa_{col}) * Tr_{med})$$

Por ejemplo en una red con una tasa de colisiones del 30% y un tamaño medio de trama de 512 bits la eficiencia será:

$$Ef = 1 - (30\% * 512 \text{ bits}) / (30\% * 512 \text{ bits} + 70\% * 512 \text{ bits}) = 0,7 = 70\%$$

Así pues para tramas de tamaño mínimo la tasa de colisiones en la red expresa directamente la eficiencia perdida. Supongamos ahora la misma tasa de colisiones, pero con un tamaño de trama de 534 bytes (4272 bits), que según diversos estudios corresponde al valor medio de redes Ethernet en entornos de grupos de trabajo. Aunque las tramas sean mayores la hipótesis de que cada colisión consume el tiempo equivalente a 512 bits es igualmente válida, por lo que la eficiencia sería en este caso de:

$$Ef = 1 - (30\% * 512 \text{ bits}) / (30\% * 512 \text{ bits} + 70\% * 4272 \text{ bits}) = 0,951 = 95,1\%$$

Podemos ver pues que el efecto de las colisiones en la pérdida de eficiencia se atenúa de forma notable a medida que aumenta el tamaño de trama en la red.

A menudo se plantea la cuestión de cual es la tasa de colisiones máxima aceptable en una red Ethernet. Lamentablemente no existe una respuesta única a esta pregunta, ya que las colisiones pueden variar en un rango muy amplio en función de diversos factores, en especial el tamaño de trama. Por ejemplo con tramas de 512 bits puede ser normal una tasa de hasta el 20-30%; en cambio con tramas de 1500 bytes una tasa de colisiones del 4% podría indicar una importante saturación. De forma muy general podemos decir que en redes 'normales' (con tamaños de trama en torno a los 500 bytes) una tasa de colisión superior al 10% de forma sostenida debe ser investigada y aclarada, ya que podría ser síntoma de algún problema. El nivel de ocupación es un parámetro mucho más indicativo del estado de una red que la tasa de colisiones.

4.4.4.2 Capacidad de Ethernet: mitos y realidades

En su artículo de 1976 sobre Ethernet [1] Metcalfe y Boggs realizaban una estimación de rendimiento basada en datos puramente teóricos. Según ellos cuando en una red Ethernet hay un número muy elevado de estaciones, todas ellas separadas por la distancia máxima y transmitiendo tramas del tamaño mínimo permitido de acuerdo con una distribución de Poisson la situación es equivalente a la de un ALOHA ranurado con intervalo 2τ . Como ya era sabido entonces el rendimiento máximo de un sistema de este tipo es del 36,8%. Esto provocó la creencia muy extendida (y recogida en alguna literatura) de que el límite práctico del funcionamiento de una red Ethernet se situaba en torno al 30-40% de su capacidad nominal³⁴. Pero en la realidad las condiciones son muy diferentes a las supuestas por Metcalfe y Boggs:

- La separación entre las estaciones es normalmente bastante menor que la distancia máxima.
- Las tramas transmitidas son normalmente mayores que el tamaño mínimo.
- Raramente se encuentran más de 100 estaciones en una misma red Ethernet.

³³ En realidad cuando se produce una colisión las estaciones Ethernet no paran inmediatamente de transmitir, sino que emiten entonces una señal especial de 32 bits denominada 'señal de atasco' (jam signal) para asegurarse de que cualquier estación que esté a la escucha sabrá que se ha producido una colisión y descartará lo recibido hasta ese momento. Al nivel de aproximación en que estamos trabajando podemos ignorar el efecto que tiene en el rendimiento la señal de atasco.

³⁴ Por ejemplo Carpenter [18] afirmaba en 1986: 'Esta técnica [CSMA] funciona muy bien siempre y cuando la carga en la Ethernet no supere el 30%, aproximadamente'.

- El tráfico no sigue una distribución de Poisson, sino que tiene un comportamiento autosimilar.

Cada uno de estos factores aumenta el rendimiento respecto al modelo seguido por Metcalfe y Boggs, hasta el punto de que la estimación del 36,8% resulta tan conservadora que no tiene nada que ver con la realidad. La confusión creada respecto al rendimiento de una red Ethernet fue tal que en 1988 Boggs escribió un artículo titulado 'Measured Capacity of an Ethernet: Myths and Reality' [2] en el que realizaba medidas con tráfico real en redes con diversos retardos y tamaños de trama, y comprobaba la influencia decisiva de estos factores en el rendimiento. Boggs y sus colaboradores demostraron que en la práctica una red Ethernet puede llegar a niveles de ocupación muy próximos al 100%, y que en la mayoría de los casos en que se produce inestabilidad o problemas de rendimiento en una Ethernet la causa es una implementación incorrecta del protocolo, sobre todo del algoritmo de retroceso exponencial binario, en los equipos y controladores de red.

Las pruebas realizadas por Boggs demuestran que el rendimiento de una red Ethernet depende fundamentalmente de tres factores:

- El *tamaño de trama* utilizado. A mayor tamaño de trama mayor rendimiento.
- El *número de estaciones*. A menor número de estaciones mayor rendimiento.
- El *tiempo de ida y vuelta*, A menor tiempo mayor rendimiento

Boggs concluye su estudio con las siguientes recomendaciones:

- No instalar 'cables' largos³⁵: para cubrir un área extensa es preferible dividir el cable con puentes o routers, no con repetidores.
- No poner demasiados ordenadores en un mismo cable: es conveniente utilizar routers o puentes para dividir la red en comunidades de interés; de esta forma se aumenta el retardo del tráfico inter-comunidades a cambio de un mejor rendimiento y menor tiempo de respuesta en el tráfico intra-comunidades.
- Implementar el protocolo correctamente: una detección de colisiones y un retroceso exponencial binario apropiados en la interfaz y el software del host son esenciales para un buen rendimiento.
- Utilizar el tamaño de trama máximo posible: esto reduce la probabilidad de colisión y el costo de proceso en los hosts.
- No mezclar aplicaciones de transferencia masiva de datos con aplicaciones de tiempo real: no es posible garantizar simultáneamente el mínimo retardo y el máximo rendimiento (aunque para requerimientos moderados ambos tipos de aplicaciones puedan coexistir).

Probablemente el factor que más influye en el rendimiento de Ethernet es el *tamaño de trama* utilizado. Dado que la colisión sólo puede suceder durante los primeros 512 bits de la trama podemos decir simplificando que cuando ésta tiene 512 bits de longitud el riesgo de colisión es permanente, mientras que si tiene 12144 bits (1518 bytes) la colisión sólo puede producirse durante los primeros 512, es decir el 4,2% del tiempo. Realmente el riesgo de colisión no existe durante los primeros 512 bits, sólo durante los primeros 2τ bits (2τ =tiempo de ida y vuelta entre esas dos estaciones) pero en cualquier caso el riesgo de colisión será 24 veces menor con tramas de 12144 bits que con tramas de 512 bits. Por tanto *dado un nivel de ocupación constante el número de colisiones se reduce, y el rendimiento aumenta, si aumenta el tamaño de trama*. Otras consideraciones (tiempo de proceso, cabeceras, etc..) aconsejan también la utilización de tramas grandes para mejorar el rendimiento de una red Ethernet.

Otro factor que influye en la eficiencia, es el *número de estaciones* transmisoras. Esto se puede comprender fácilmente de manera intuitiva con el siguiente razonamiento. Supongamos que en una red hay una sola estación que transmite de forma aleatoria, con un nivel de ocupación medio de 8 Mb/s: en tal caso no podrá haber colisiones (ya que una estación nunca colisiona consigo misma). Si hay dos estaciones, cada una transmitiendo (aleatoriamente) una media de 4 Mb/s, existirá un cierto riesgo de

³⁵ El concepto de 'cable' debe interpretarse aquí como dominio de colisión, es decir uno o varios cables unidos por repetidores o concentradores. El concepto de longitud debe entenderse en términos del tiempo de ida y vuelta de la red.

colisión. Si hay ocho estaciones transmitiendo cada una a 1 Mb/s de media el riesgo será mayor, ya que al aumentar el número de transmisores su distribución en el tiempo es más aleatoria y hay más probabilidad de que dos o más colisionen. Así pues *dado un nivel de ocupación constante el número de colisiones disminuye si se reduce el número de estaciones transmisoras*. Así por ejemplo la práctica de poner dos tarjetas de red a un servidor para mejorar su rendimiento podría llegar a ser contraproducente si ambas tarjetas se conectan a la misma red (salvo que esto permita superar limitaciones inherentes a otras partes del sistema, en cuyo caso el rendimiento global aumentará). Evidentemente en estos casos lo aconsejable sería conectar las dos tarjetas a redes *diferentes* y a ser posible dedicadas, por ejemplo a puertas de un conmutador.

El tercer parámetro que influye en el rendimiento de Ethernet, y sobre el que más se puede influir es el *tiempo de ida y vuelta entre estaciones*. Como ya sabemos las colisiones siempre ocurren en los primeros 512 bits de la trama. En realidad casi siempre ocurren mucho antes, ya el valor de 2τ entre estaciones raramente es igual al máximo permitido. Para verlo consideremos de nuevo la red de la 4.8, formada por dos ordenadores unidos a través de dos concentradores y separados por 200 m de cable; esto daba un valor de 2τ equivalente a 506 bits. Las colisiones entre estos dos ordenadores siempre ocurrirán en el bit 506, o antes. En el caso de tramas de 512 bits de longitud el riesgo de colisión estará presente el 99% del tiempo de transmisión ($506/512=0,99^{36}$).

Supongamos que podemos conectar todos nuestros ordenadores a un solo concentrador, con lo que suprimimos un concentrador (0,92 μ s) y 100 m de cable (1,11 μ s) y reducimos el valor de 2τ a 303 bits (1 μ s de las tarjetas, 0,92 μ s de un concentrador y 1,11 μ s de 100m de cable). En este caso el riesgo de colisión sólo estará presente durante los primeros 303 bits por lo que con tramas de 512 bits el riesgo se dará el 59% del tiempo ($303/512=0,59$). Así pues con este cambio hemos reducido las colisiones en un factor 303/506, o sea en un 40%. Aunque en el razonamiento anterior hemos supuesto el tamaño de trama mínimo el razonamiento se puede aplicar a cualquier tamaño de trama obteniendo idéntica mejora en cualquier caso. Por consiguiente *dado un nivel de ocupación constante el número de colisiones disminuye si se reduce el tiempo de ida y vuelta entre las estaciones que transmiten en la red*. Por tanto para mejorar el rendimiento de una red es recomendable revisar su topología aproximando en lo posible las estaciones (suprimiendo concentradores innecesarios o tendidos de cable innecesariamente largos). Este tipo de reestructuraciones deberán aplicarse en primer lugar a las estaciones que más tráfico generan, ya que de esta forma se conseguirá una máxima rentabilidad de los esfuerzos invertidos.

Una consecuencia curiosa de la influencia del tiempo de ida y vuelta en las colisiones es que, dada una misma topología de red, tamaño de trama, número de estaciones y nivel de ocupación relativa, la probabilidad de colisión aumenta a medida que aumenta la velocidad, ya que el valor de 2τ medido en bits aumenta. Este efecto es especialmente notable en el caso de Gigabit Ethernet. Por ejemplo supongamos tres redes a 10, 100 y 1000 Mb/s, formadas todas ellas por un concentrador al que se conectan varios ordenadores con cables de 100 m. El valor de 2τ entre dos ordenadores cualesquiera será entonces de 203, 414 y 3860 bits para las redes de 10, 100 y 1000 Mb/s, respectivamente (valores calculados según las reglas del Modelo 2). Suponiendo un tamaño de trama de 512 bytes (4096 bits) en todos los casos, existirá riesgo de colisión durante el 5% del tiempo de transmisión de una trama en la red de 10 Mb/s ($203/4096=0,05$), mientras que para las redes de 100 y 1000 Mb/s este riesgo estará presente durante el 10 y 94% del tiempo de transmisión, respectivamente. La tasa de colisiones, dada una misma ocupación relativa en las tres redes, seguirá proporciones similares; por ejemplo supongamos que para una ocupación del 60% (equivalente a un caudal de 6 Mb/s) hemos medido en la red de 10 Mb/s una tasa de colisiones del 2%; en ese caso podemos predecir que la red de 100 Mb/s tendrá una tasa de colisiones del 4% para un tráfico similar con una ocupación equivalente a 60 Mb/s, y la de 1000 Mb/s tendrá una tasa del 38% con una ocupación de 600 Mb/s³⁷. Aplicando a este supuesto las fórmulas que hemos visto en el apartado anterior podemos calcular la eficiencia, que resulta ser del 99,9%, 99,6% y 63,4% para 10, 100 y 1000 Mb/s respectivamente. Por último a partir de ésta y del nivel de ocupación podemos calcular el caudal útil o 'goodput' de cada red, que es de 5,994, 59,76 y 380,4 Mb/s para las tres redes, respectivamente.

³⁶ Durante la transmisión de los últimos seis bits (507 a 512) no hay riesgo de colisión, puesto que todas las estaciones ya se han percatado de la existencia del emisor.

³⁷ Si en vez de hablar en términos relativos lo hiciéramos en valores absolutos (por ejemplo 6 Mb/s de ocupación en los tres casos) la red de 100 Mb/s tendría muchas menos colisiones que la de 10, y la de 1000 aun menos, ya que con ese caudal esas redes estarían prácticamente vacías.

Las estimaciones que hemos hecho en este apartado y el anterior se basan en un modelo muy simplificado del funcionamiento de Ethernet. Esta sencillez, aunque no da resultados muy precisos, resulta de gran utilidad ya que permite, a partir de un conjunto reducido de parámetros normalmente fáciles de obtener, realizar estimaciones, comparaciones, y predecir de forma cuantitativa las consecuencias que pueden tener modificaciones en la topología, velocidad, caudal o tipo de tráfico de una red. Esta información es muy valiosa en la planificación de redes.

4.4.4.3 Excesivas colisiones y colisiones tardías

Mientras que una tasa importante de colisiones puede ser normal en una red en determinadas circunstancias, hay dos situaciones excepcionales relacionadas con las colisiones que merecen comentarse, ya que en caso de producirse pueden tener un fuerte impacto en el rendimiento. Estas son la ocurrencia de 16 colisiones consecutivas (también denominada *excesivas colisiones*) y las *colisiones tardías*.

Como ya hemos comentado cuando una estación sufre 16 colisiones consecutivas el nivel MAC descarta la trama e informa del suceso al nivel de red, que decide las acciones a tomar. Por ejemplo en el caso de IP el evento es ignorado, por lo que cuando se requiere un transporte fiable son los niveles superiores (TCP o NFS³⁸, por ejemplo) los que por omisión detectan la pérdida de la trama y solicitan su reenvío. Dado que estos protocolos han sido diseñados bajo la premisa de que el nivel de red es altamente fiable, la retransmisión es una acción extraordinaria que genera una merma considerable en el rendimiento. Por ejemplo en el caso de TCP la pérdida de una trama genera el reinicio del proceso conocido como ‘slow-start’, con una drástica reducción en el tamaño de ventana utilizado. En NFS el estándar establece que el período de retransmisión ha de ser de al menos 700 ms, con lo que en el caso de perder una trama la retransmisión se hará al menos 700 ms más tarde. En [16] puede encontrarse una discusión detallada de los aspectos de rendimiento de Ethernet, con especial énfasis en el caso de NFS.

Normalmente la ocurrencia de 16 colisiones consecutivas se debe a una saturación extrema o a algún problema físico en el cableado, tarjeta o transceiver de alguna estación y debe considerarse síntoma de mal funcionamiento. El suceso se puede monitorizar mediante un analizador o a través de los contadores de dispositivos de red (por ejemplo conmutadores) accesibles vía SNMP. Ante una situación de este tipo es importante localizar la causa y remediarla, corrigiendo la avería o aislando al ‘culpable’ en la medida de lo posible (por ejemplo aumentando la capacidad o reorganizando los equipos para repartir mejor el tráfico en la red).

El otro tipo de suceso anormal es el que se conoce como *colisiones tardías*, y en cierto modo es aún más grave que el anterior, ya que si bien las excesivas colisiones se pueden dar en condiciones de saturación extrema, no puede haber colisiones tardías en una red de topología válida. Cuando una estación Ethernet transmite una trama se supone que la colisión sólo puede ocurrir durante los 512 primeros bits¹⁰. Una colisión pasado el bit 512 sólo puede ocurrir si existen en la red dos estaciones separadas por una distancia de ida y vuelta mayor que 2τ . Esto se debe a una topología inválida o a una avería en el nivel físico.

Supongamos por ejemplo la red ‘ilegal’ de la Tabla 4.9. Teníamos un valor de 2τ de 621 bits. En este caso la detección de las colisiones sólo está garantizada para tramas superiores a 621 bits. Cuando dos estaciones transmitan tramas que tengan entre 512 y 621 bits podrán ocurrir tres cosas, en función del instante exacto en que cada estación empiece a transmitir, por ejemplo:

- a) *Ambas estaciones empiezan a transmitir en el mismo instante.* Se producirá una colisión en el centro de la red, que ambas detectarán cuando estén transmitiendo el bit número 310. El evento se considera normal y se aplica el mecanismo de retroceso exponencial binario.
- b) *Una estación empieza a transmitir 3 μ s después que la otra.* En este caso la primera estación detectará una colisión cuando esté transmitiendo el bit número 610 de la trama, y la segunda la detectará en el bit 10³⁹. Para la primera estación se trata de una colisión tardía, ya que ha

³⁸ NFS utiliza UDP en el nivel de transporte, por lo que la verificación de la información en este caso se implementa en el nivel de aplicación.

³⁹ La explicación es la siguiente: si $2\tau=621$ bits entonces $\tau=310$ bits; si la segunda estación empieza a transmitir 3 μ s (300 bits) después la colisión se producirá a 305 bits de la primera y a 5 bits de la segunda. Para que la colisión sea detectada la señal ha de

ocurrido pasado el bit 512. La estación aplica el retroceso exponencial binario pero reporta el suceso como anormal mediante un mensaje en consola, o incrementando un contador de colisiones tardías. Para la segunda estación se trata de una colisión completamente normal.

- c) *La segunda estación empieza a transmitir 3 μ s después que la primera, pero esta vez la trama que envía la primera estación tiene una longitud menor de 610 bits.* En este caso la colisión no es detectada por la primera estación, ya que para cuando ésta tiene lugar la estación ya ha terminado y ha dado por buena la transmisión. La trama se perderá sin que el nivel MAC del transmisor reciba ninguna notificación del incidente, ya que aparentemente para él todo ha sido normal. Si los protocolos de nivel superior implementan un servicio fiable la pérdida será finalmente detectada y la trama retransmitida, a costa de una pérdida importante de rendimiento.

Las colisiones tardías (caso b anterior) no producen en sí mismas problema de rendimiento, puesto que, aunque con retraso, son detectadas. Sin embargo su presencia indica que se están produciendo colisiones no detectadas, como el caso c) anterior, y éstas sí que suponen un problema de rendimiento. Por tanto las colisiones tardías deben investigarse siempre que se produzcan. Una red Ethernet puede estar funcionando normalmente y tener decenas de colisiones por segundo, pero una sola colisión tardía es síntoma de un problema grave en la red.

4.4.4.4 Reparto no equilibrado de recursos y Efecto captura

Uno de los objetivos de diseño de cualquier red local es que en condiciones de alta ocupación la capacidad se debe repartir de forma equilibrada entre las estaciones. A primera vista cabría pensar que el protocolo CSMA/CD cumple esta condición, al carecer de un mecanismo de reserva de capacidad o asignación de prioridades, pero la realidad es muy distinta. Debido a la forma como se resuelven las colisiones la red reparte de forma equitativa el número de tramas transmitidas por segundo, no el número de bits por segundo, por lo que el ancho de banda que obtiene una estación en una red saturada es proporcional al tamaño de las tramas que emite; una estación que emita tramas grandes conseguirá más ancho de banda que una que envíe tramas pequeñas.

Como consecuencia de lo anterior en condiciones de saturación los usuarios que transmiten paquetes grandes (por ejemplo servidores FTP, HTTP o flujos de vídeo MPEG) consiguen proporciones sustancialmente mayores de la capacidad disponible que los que manejan paquetes pequeños (como sesiones Telnet o voz sobre IP). Si en una red saturada se encuentran compitiendo usuarios que transmiten paquetes pequeños y grandes (cosa muy normal dada la diversidad de aplicaciones en uso en cualquier red actual) se producirán diferencias notables en el reparto de los recursos entre ellos. Por ejemplo un usuario que transmita voz sobre IP y tenga que competir en una red saturada con otros que envíen flujos de vídeo MPEG detectará retrasos en la comunicación que probablemente hagan inviable su comunicación, aun cuando el esté utilizando una proporción pequeña de la capacidad existente. En estos casos habrá que diseñar la red de forma que dichos usuarios no compitan entre sí por el ancho de banda, o sobredimensionar la red para evitar llegar a la saturación.

Otro desequilibrio más sutil que el anterior es el que se conoce como efecto captura, que se da en una circunstancia como la siguiente: supongamos una red Ethernet formada por dos ordenadores, A y B, cada uno de los cuales dispone de una cola infinita de tramas a enviar. A es un ordenador muy potente, capaz de procesar y preparar la trama a enviar en un tiempo inferior al del hueco entre tramas (96 bits), por tanto A sería capaz en principio de saturar la red él solo, concatenando cada trama con la siguiente. Por el contrario B es un ordenador más lento, incapaz de saturar la red, ya que no puede preparar las tramas en tan poco tiempo. Supongamos ahora que A y B intentan empezar a transmitir a la vez, produciéndose por tanto una colisión. Supongamos que en la segunda iteración A elige el intervalo 0 y B el 1, con lo que A consigue transmitir primero y B lo hará después. B no puede transmitir enseguida que A termine, ya que tiene que respetar el hueco entre tramas; pero B colisionará con A, ya que para entonces A tiene preparada una segunda trama que intenta enviar a la vez que B intenta reenviar la primera; esta colisión es segundo intento para B pero primero para A (puesto que para A se trata de una nueva trama que no ha sufrido ninguna colisión anterior). Por tanto A reintentará eligiendo entre los intervalos 0 y 1, mientras que B reintentará eligiendo entre 0, 1, 2 y 3. Estadísticamente A tendrá más probabilidades de transmitir antes, ya que ha de elegir entre un rango de intervalos menor, y por tanto tiene más probabilidades de

volver a cada estación, por lo que los tiempos en que se detecta la colisión son el doble de los anteriores, o sea 610 bits para la primera y 10 bits para la segunda.

elegir uno más pequeño. Este proceso se repite en las tramas siguientes, siendo la situación cada vez más favorable a A, ya que B aumentará su número de intervalos en cada nuevo intento, mientras que A, al conseguir transmitir su trama, pone a cero su contador cada vez. Finalmente B agotará el máximo de 16 colisiones consecutivas, momento en el cual descarta la trama y pone a cero su contador; sólo entonces podrá competir en igualdad de condiciones con A, pero dada la rapidez de A el ciclo se repite y la situación pronto se vuelve de nuevo desfavorable a B. A puede transmitir miles de tramas por cada trama que transmite B. Este fenómeno se conoce como *efecto captura* [17] y para que se dé es preciso que una estación sea capaz de encadenar tramas, es decir que su potencia de proceso le permita saturar la red.

El efecto captura provoca retardos muy grandes e impredecibles en la red; se puede detectar por diversos síntomas, siendo el más obvio una proporción anormal de excesivas colisiones. Obsérvese sin embargo que la estación o estaciones que producen excesivas colisiones son las víctimas, no los culpables. La culpable será evidentemente una estación potente, que ocupe una gran cantidad de la capacidad de la red durante ciertos períodos de tiempo (no necesariamente muy largos) y que tenga un número de colisiones relativamente bajo para las tramas transmitidas. Evidentemente el concepto de estación ‘potente’ hay que entenderlo relativo a la velocidad de la red; cualquier PC actual es capaz de saturar una Ethernet de 10 Mb/s. También se puede producir el efecto captura por la acción combinada de dos estaciones que actuando en ‘tándem’ sean capaces de saturar la red

El efecto captura es consecuencia de la forma como funciona el retroceso exponencial binario y de su ausencia de ‘historia’, es decir de la puesta a cero del contador de colisiones después de cada transmisión. Algunos autores lo consideran un fallo del diseño original de Ethernet. La verdad es que cuando Metcalfe diseñó Ethernet partía de la hipótesis de que la capacidad de la red era bastante superior que la de los ordenadores a ella conectados; entonces no era concebible que un ordenador fuera capaz de saturar una red de 3 ó 10 Mb/s (un gran ordenador de finales de los 70 difícilmente podía enviar datos a 500 Kb/s). En cambio hoy en día un ordenador personal adecuadamente preparado es capaz de saturar una red de 100 Mb/s.

Se han planteado diversas soluciones al problema del efecto captura. Algunas suponen pequeñas modificaciones al algoritmo del retroceso exponencial binario, y otras plantean su completa sustitución por otros algoritmos, como el denominado Método de Arbitración Logarítmico Binario (BLAM, Binary Logarithmic Arbitration Method) propuesto en 1994 [17]. Con este algoritmo se asegura un reparto más homogéneo de los recursos. El IEEE ha puesto en marcha un grupo de trabajo, el 802.3w, para el estudio del BLAM y su posible incorporación al protocolo 802.3. Sin embargo el futuro de este grupo es incierto, ya que el algoritmo ha de implementarse en hardware y requiere nuevas interfaces de red, lo cual complica la migración. Los fabricantes no han mostrado gran interés (hasta la fecha no existe ninguna interfaz de red y sólo IBM ha desarrollado un chip que incorpora BLAM). Además, la actual tendencia a constituir redes conmutadas, en las que cada ordenador se conecta a una puerta de conmutador dedicada, tiene el efecto colateral de resolver el problema del efecto captura, ya que cada ordenador dispone de un enlace full dúplex dedicado donde no se producen colisiones.

4.4.5 Comparación con otras tecnologías

El abrumador dominio que Ethernet presenta en el mundo de las redes locales no es fruto de la casualidad. Las ventajas que a finales de los ochenta o principios de los noventa podían presentar otras tecnologías de red local, tales como Token Ring, FDDI o 100VG-AnyLAN, desaparecieron o quedaron muy reducidas al aparecer Fast Ethernet y las redes conmutadas (que al permitir la transmisión full-dúplex eliminaban la restricción de la distancia). Si alguna ventaja podía quedar en algún caso para las otras redes el precio se encargó de compensarla sobradamente. La aparición de Gigabit Ethernet hace la diferencia aún más evidente, ya que ni por precio ni por prestaciones se puede argumentar a favor de otras tecnologías. La disponibilidad de velocidades de 10/100/1000 Mb/s permite estructurar de forma jerárquica y racional el backbone de una compleja red de campus sin cambio en el formato de las tramas, cosa que no sería posible con ninguna de las otras tecnologías. Por no mencionar la posibilidad de agregar paulatinamente enlaces de una misma velocidad, cubriendo así la gama intermedia de velocidades. La fiabilidad y robustez, argumento que a veces se ha esgrimido a favor de FDDI, puede obtenerse de forma sencilla en Ethernet con un diseño redundante que utilice el protocolo spanning-tree. En esta competición solamente parece quedar un rival en pie, que justamente no proviene del mundo de las redes locales sino de las de área extensa. Ese rival es ATM.

Es bien conocida la flexibilidad de ATM en el desarrollo de redes integradas para el transporte de tráfico multimedia (voz, vídeo y datos), y éste es el principal argumento que normalmente se esgrime en su favor. Sin duda una red local basada en ATM es más apropiada que una red Ethernet cuando se pretende basar en ella la telefonía clásica de una empresa. Sin embargo, si el tráfico multimedia va a ser transportado sobre IP es muy probable que las sofisticadas funciones de control de tráfico ATM no se aprovechen en absoluto.

Por ejemplo, si utilizamos LAN Emulation en nuestra red local ATM todo el tráfico discurre por circuitos UBR, con lo que las posibilidades de calidad de servicio son las mismas que si hubiéramos utilizado Gigabit Ethernet, o sea ningunas. Sin embargo estaremos pagando una penalización en torno al 20% de la capacidad nominal de los enlaces debido a las cabeceras ATM, la información de control AAL5 y la fragmentación en celdas de 53 bytes, que requerirá la mayoría de las veces la inclusión de relleno en la última celda.

Si en vez de LAN Emulation utilizamos por ejemplo Classical IP sobre ATM reduciremos el overhead, pero no podremos utilizar mas que un protocolo en la red.

Para poder aprovechar realmente las facilidades de calidad de servicio que ATM nos brinda debemos conectar directamente a ATM los equipos de usuario final. En este caso tendremos que asumir unos costos bastante mayores que los de Ethernet. Una tarjeta ATM con interfaz OC-3c (155,52 Mb/s) cuesta unas cuatro veces mas que una Fast Ethernet. Incluso la ATM25 (25,6 Mb/s), que fue diseñada para ofrecer conectividad ATM a bajo costo, cuesta el doble que una Fast Ethernet. La tarjeta con interfaz 1000BASE-T tiene ya un precio solo ligeramente superior al de la OC-3c y es previsible que su precio baje de forma considerable en los próximos meses conforme se populariza su uso. Además si ofrecemos conectividad ATM al usuario final tendremos que asumir otros costos menos evidentes, como los que supone configurar, administrar y gestionar una red en la que cada equipo está conectado a ATM, donde las cosas aun distan mucho del plug & play de Ethernet.

El tráfico multicast/broadcast, tan utilizado por algunos protocolos de red local, no está tan bien resuelto en ATM como en Ethernet.

Cabe plantearse la posibilidad de utilizar un entorno híbrido, en el que la conectividad del usuario final se realice por Ethernet y el backbone discurra por ATM, utilizando conmutadores LAN-ATM para el acceso. Antes de la aparición de Gigabit Ethernet esta configuración aún tenía cierto sentido, ya que con la interfaz de 155 Mb/s se conseguía una capacidad ligeramente superior a Fast Ethernet o FDDI (125 Mb/s efectivos al restar el overhead introducido por LAN Emulation); y a unos precios realmente elevados era posible disponer de velocidades superiores utilizando la interfaz OC-12c (622,08 Mb/s, 500 Mb/s efectivos con LAN Emulation), disponible en algunos fabricantes.

Sin embargo, con la aparición de Gigabit Ethernet las redes ATM se han quedado por debajo en velocidad, y bastante por arriba en precios. Un conmutador ATM con puertas OC-12c cuesta entre tres y cinco veces lo que un conmutador Gigabit Ethernet con un número similar de puertas, y como hemos visto este último ofrece aproximadamente el doble de capacidad por puerta.

A pesar de todo lo anterior hay que destacar que ATM sigue teniendo un papel en las redes locales cuando la versatilidad y control de tráfico sean factores fundamentales, independientemente de las consideraciones de costo y sencillez.

4.4.6 Futuro

La tabla 4.12 resume los desarrollos en marcha en grupos de trabajo del IEEE y de la TIA que hemos ido comentando:

Grupo de trabajo	Objetivo	Productos comerciales pre-estándar
IEEE 802.1p	Prioridades	Sí
IEEE 802.3w	Algoritmo BLAM (Binary Logarithmic Arbitration Method)	Chips únicamente
IEEE 802.3ad (borrador)	Agregación de enlaces	Sí
TIA SWLA (Short Wave Length Alliance) PMD (Physical Media Dependent)	Medio físico 100BASE-SX	Sí
TIA SWLA (Short Wave Length Alliance) AN (Autonegotiation)	Autonegociación de velocidad en fibra óptica en 1ª ventana (10BASE-FL/100BASE-SX)	Sí

Tabla 4.12.- Grupos de trabajo activos en tecnología Ethernet

Con la posible excepción del 802.3w es muy probable que todos estos grupos cumplan sus objetivos.

Aparte de los desarrollos en marcha comentados existen ya un grupo de trabajo en marcha para estudiar la viabilidad de elaborar un estándar de Ethernet de 10 Gb/s.

La información sobre este futuro estándar es tan escasa que poco podemos decir al respecto. Actualmente las únicas tecnologías de transmisión de datos estándar que superan en velocidad a Gigabit Ethernet son las que aparecen en la tabla 4.13.

Estándar	Velocidad (Gb/s)	Aplicación
OC-48c	2,488	SONET/SDH, ATM
OC-192	9,953	SONET/SDH, ATM (experimental)
SCI (Scalable Coherent Interface)	4	LANs
GSN (Gigabyte System Network)	8	LANs

Tabla 4.13.- Tecnologías estandarizadas con velocidades superiores a 1 Gb/s

El nivel físico de Ethernet a 10 Gb/s se podría basar en la tecnología desarrollada para SONET/SDH OC-192, procediendo de forma análoga a como se hizo en su día con FDDI o Fibre Channel. Sin embargo, mientras que FDDI o Fibre Channel eran tecnologías LAN más o menos maduras, SONET/SDH OC-192 es una tecnología de área extensa de reciente aparición, de desarrollo muy limitado y extremadamente cara, utilizada hasta ahora únicamente en enlaces principales de grandes operadores. Si se decide utilizar código 8B/10B será preciso elevar la velocidad de señalización hasta 12,5 Gbaudios para obtener 10 Gb/s efectivos⁴⁰.

En OC-192 la transmisión es por fibra óptica monomodo mediante láser, con alcances de 20-40 Km en segunda ventana y 60-120 Km en tercera. Parece pues que el medio natural de transmisión para 10Gb Ethernet será la fibra monomodo en segunda ventana. En fibra multimodo la dispersión limitaría la distancia máxima a valores muy reducidos (en principio unos 60m), difícilmente aprovechables salvo para un entorno de sala de máquinas. Sin embargo es posible que la continua mejora de la calidad de las fibras, junto al reparto de la señal en varias fibras (con lo que la señalización podría hacerse a menor frecuencia), permita mantener una distancia de 200-300m en fibra multimodo, lo cual la haría aprovechable para entornos de edificios. Incluso cabe pensar en el uso de cables de cobre de 50 pares para conexiones de corta distancia (equivalente al actual 100BASE-CX). Este tipo de soluciones se están adoptando en GSN, como veremos más adelante.

Los problemas habidos en Gigabit Ethernet para mantener el funcionamiento en modo half dúplex hacen sospechar que la nueva 10Giga Ethernet solo funcionará en modo full dúplex. Con unas velocidades de

⁴⁰ Algo parecido ya ocurrió con Gigabit Ethernet, puesto que la frecuencia máxima de Fiber Channel es de 1,062 Gbaudios.

transmisión cada vez más elevadas la latencia, debida a la distancia física entre los equipos, empezará a ser cada vez mas el factor limitante de la capacidad. Será necesario adaptar los protocolos de transporte para poder aprovechar tales velocidades.

La combinación de las técnicas de agregación de enlaces (etherchannel) y WDM podrían permitir un aumento aun mayor en la capacidad. Los dispositivos WDM podrían estar embebidos en el propio conmutador, con lo que el funcionamiento sería transparente al usuario. Mas aún, las versiones recientes de WDM (DWDM Dense Wavelength Division Multiplexing) permiten multiplexar 16 o 32 canales en una misma fibra, lo cual ampliará aún más las posibilidades.

Yendo aun mas lejos podemos imaginar la velocidad que tendrá una red Ethernet dentro de 25 años. Para entonces podríamos estar hablando de Terabit Ethernet (1000 Gb/s), pero empezaremos a tener otro problema: la notación 1000000BASE-TX resulta excesivamente tediosa. Seguramente este será uno de los más fáciles de resolver.

4.4.7 Ethernet isócrona

Como ya hemos visto el protocolo CSMA/CD no permite asegurar un reparto equitativo del ancho de banda. Un ordenador con suficiente capacidad de generación de tramas puede monopolizar la red sin que las demás puedan hacer nada por evitarlo. Tampoco existe un límite máximo al tiempo que un ordenador ha de esperar para enviar una trama en una situación de congestión. Este problema se ve acentuado por fenómenos como el efecto captura, ya explicado. Por estos motivos Ethernet no es una red apropiada para la transmisión de tráfico isócrono, como voz o vídeo en tiempo real.

Para este tipo de tráfico se creó una variante de Ethernet denominada Ethernet Isócrona, cuya estandarización ha llevado a cabo el comité IEEE 802.9. Las primeras implementaciones de Ethernet isócrona (también llamada Iso-Ethernet o ISLAN, de Integrated Services LAN)) se llevaron a cabo en 1992, si bien el estándar no se aprobó hasta 1995.

La Ethernet isócrona utiliza codificación 4B/5B, más eficiente que la Manchester para acomodar una capacidad mayor. De esta forma empleando la misma velocidad de señalización de 20 Mbaudios de Ethernet se pueden transmitir $20 \times 4/5 = 16$ Mb/s. Solo estan soportados los medios UTP-5 y fibra óptica.

De la capacidad total del medio físico se reservan 6,208 Mb/s para transportar una trama síncrona de 97 bytes que es generada cada 125 μ s, y que se estructura como 97 canales de 64 Kb/s compatibles con RDSI, de los cuales 96 actúan como canales B (Bearer,portadores) y uno como canal D de señalización; por tanto lo podemos ver como un 'superprimario' RDSI de 96 B + D. Esto permite utilizar en la red local aplicaciones diseñadas para RDSI; las estaciones de la red que lo deseen pueden a través del canal D solicitar los canales B que deseen, quedando reservados 64 Kb/s por cada canal asignado. El tráfico asíncrono (es decir el normal de Ethernet) no se ve afectado ya que utiliza la capacidad restante (9,792 Mb/s) funcionando con el protocolo CSMA/CD de la misma forma que en Ethernet.

En la práctica la Ethernet Isócrona nunca ha llegado a extenderse comercialmente, y no es probable que lo haga en el futuro. Esto probablemente se deba en parte a que requería sustituir todo el equipamiento de red (concentradores, tarjetas, etc.) debido al sistema de codificación utilizado, que difiere de Ethernet.

4.5 ESTÁNDAR IEEE 802.5: TOKEN RING

Con cierto retraso respecto a los experimentos de Xerox con Ethernet IBM estaba experimentando con un protocolo MAC denominado Token Ring (anillo con paso de testigo). Este protocolo también fue estandarizado por el IEEE con el número 802.5, si bien su desarrollo comercial fue algo más lento que el de 802.3; los primeros productos comerciales de Token Ring aparecieron en 1986. Existen tres variantes de Token Ring: a 1, 4 y 16 Mb/s; las de 4 y 16 Mb/s son las más utilizadas (la de 1 Mb/s ha sido suprimida del estándar).

El cableado utilizado es STP o UTP de categoría 3 o superior para 4 Mb/s, y STP para 16 Mb/s. La señal se representa usando codificación Manchester diferencial, con señales de +3,0 y -4,5voltios. La

codificación Manchester diferencial emplea la presencia o ausencia de transición entre dos voltajes para indicar un 0 o un 1, respectivamente. Requiere un equipo mas caro y complejo que la codificación Manchester, pero es mas inmune al ruido y esta mejor adaptada al uso de cable de pares, ya que no tiene problemas de polaridad invertida como ocurre con Manchester (a diferencia de Ethernet el cable de pares fue previsto en Token Ring ya en el diseño original).

En las redes tipo bus (como 802.3) la fiabilidad depende de la continuidad del cable, que pasa por todas las estaciones y puede ser motivo de manipulaciones no autorizadas. Este problema se resolvió en 802.3 con el cableado 10BASE-T, que manteniendo la topología lógica de bus utiliza un cableado en estrella. En el caso de topologías en anillo como Token Ring el problema es similar, ya que la rotura del anillo en un punto impide la comunicación. Para evitar este problema en Token Ring lo que se hace es colapsar el anillo en un hub o concentrador, también llamado centro de cableado, al cual se conectan los cables de entrada y salida de cada estación. El cableado sigue siendo lógicamente un anillo, aún cuando físicamente sea una estrella. En el concentrador se instalan relés de derivación (bypass) alimentados por la estación correspondiente, de forma que si la conexión de ésta falla el relé cortocircuita la conexión correspondiente restaurando así el anillo. En la práctica la topología física no es muy diferente a la de una red Ethernet. Una red Token Ring puede estar formada por varios concentradores interconectados, lo cual permite reducir apreciablemente la cantidad de cable necesario. También es posible constituir dobles anillos para tener mayor fiabilidad, pues en caso de corte por un punto el doble anillo puede cerrarse sobre sí mismo superando el problema. Aunque la topología física de cableado pueda estar formada por varios anillos o estrellas interconectadas, desde el punto de vista del protocolo una red Token Ring está formada siempre por un único anillo lógico.

4.5.1 El protocolo de subcapa MAC de Token Ring

Podemos considerar a una red Token Ring como un conjunto de líneas punto a punto simplex que interconectan cada estación del anillo con la siguiente. Los bits se transmiten en un determinado sentido dentro del anillo. Cada bit y cada trama transmitida da la vuelta completa, por lo que a efectos prácticos la red funciona como un medio broadcast.

Cada estación de la red puede funcionar en uno de los dos modos siguientes:

- Modo a la escucha: cada bit que se recibe del ordenador anterior se transmite al siguiente. En algunos casos que luego veremos un ordenador a la escucha puede modificar algún bit de la trama que pasa por el.
- Modo transmisión: el ordenador emite una secuencia de bits propia (trama) hacia el siguiente; paralelamente recibe y procesa los bits que le llegan del ordenador anterior en el anillo.

En un determinado momento sólo un ordenador en una red Token Ring puede estar en modo transmisión, y los demás han de estar a la escucha. Si no hay tráfico en la red todos los ordenadores están a la escucha.

El protocolo Token Ring funciona de la siguiente manera:

- Cuando ningún ordenador desea transmitir todos están en modo escucha y se envía por el anillo una secuencia especial de tres bytes denominada *token*. El token va pasando de un ordenador a otro indefinidamente.
- Cuando algún ordenador desea transmitir debe en primer lugar esperar a que pase por él el token; en ese momento modifica un bit de éste, con lo que el token se convierte en el delimitador de inicio de trama; a partir de ese momento el ordenador pasa a modo transmit y envía la trama al siguiente.
- Todos los demás ordenadores del anillo (incluido aquel para el que va destinada la trama) siguen en modo escucha, por lo que retransmitirán la trama recibida bit a bit hacia el siguiente ordenador; el ordenador destinatario además de retransmitirla retiene una copia de la trama que pasará al nivel de red para su proceso.

- Pasados unos instantes desde el inicio de la transmisión el ordenador emisor empieza a recibir su misma trama, que le es enviada desde el ordenador anterior; el transmisor puede optar entonces por descartar los bits recibidos o compararlos con la trama enviada para verificar si la transmisión ha sido correcta.
- Cuando el ordenador ha terminado de transmitir el último bit de su trama pueden ocurrir dos cosas: que restaure el token en el anillo inmediatamente, o que espere a recibir de la estación anterior toda su trama y solo entonces restaure el token. El primer modo de funcionamiento se conoce Early Token Release y es el que se utiliza en las redes de 16 Mb/s; el segundo es el utilizado en las redes de 4 Mb/s.

Si el ordenador transmisor tiene varias tramas listas para emitir puede enviarlas una tras otra sin liberar el token, hasta consumir el tiempo máximo permitido, denominado 'token-holding time', que normalmente es de 10 mseg. Una vez agotadas las tramas que hubiera en el buffer, o el tiempo permitido (lo que ocurra primero) el ordenador restaura el token en el anillo. Bajo ninguna circunstancia debe un ordenador estar en modo transmitir durante un tiempo superior al token-holding time; si la longitud de la trama a enviar es tal que no terminaría de enviarse dentro del tiempo restante se regenera el token y se espera a la siguiente vuelta para enviarla. Esta condición establece un tamaño máximo para la trama; así por ejemplo en una Token Ring de 4 Mb/s con un token-holding time de 10 ms una trama nunca podrá ser mayor de 5.000 bytes.

Cada estación que se integra en la red añade una cierta cantidad de 'jitter' en la retransmisión de la información, lo cual limita el número máximo de estaciones que pueden estar presentes en una red Token Ring. En las redes de 4 Mb/s con cable UTP el máximo de estaciones es de 72, mientras que en las de 16 Mb/s con cable STP el máximo es de 250 estaciones.

Veamos cual es la estructura de una trama de datos Token Ring:

Campo	Longitud (bytes)	Formato o significado
SD (Start Delimiter)	1	JK0JK000
AC (Access Control)	1	PPPTMRRR
FC (Frame Control)	1	FFZZZZZZ
Dirección de destino	2 ó 6	IEEE 802
Dirección de origen	2 ó 6	IEEE 802
Datos	Sin límite	Cualquiera
Checksum	4	CRC
ED (End Delimiter)	1	JK1JK11E
FS (Frame Status)	1	AcrrACrr

Tabla 4.14.- Estructura de la trama 802.5

Los símbolos J y K utilizados en el campo SD son símbolos inválidos, es decir que no pueden ocurrir en la codificación manchester diferencial. Esto permite una fácil identificación del inicio de la trama.

El byte de control de acceso (AC) contiene tres bits de prioridad P, el bit de token T (un 1 indica una trama, un 0 un token), el bit monitor (M) y tres bits de reserva (R).

Las direcciones tienen el mismo formato que en 802.3. Normalmente sólo se utilizan las de 6 bytes.

El campo datos puede tener cualquier longitud, sin más limitación que la impuesta por el token-holding time como se ha explicado.

El campo checksum es un CRC que se calcula de la misma forma que en 802.3.

El campo ED (end delimiter) marca el final de la trama. Sus seis primeros bits forman una secuencia inválida en la codificación Manchester diferencial, ya que contiene los símbolos J y K. El séptimo bit (I) se utiliza para indicar la última trama cuando lo que se transmite es una secuencia de tramas (vale 1 en

todas excepto en la última). El octavo bit (E) indica si se ha producido un error en la transmisión de la trama entre dos ordenadores del anillo. Si alguno detecta un error en la trama al pasar por su interfaz (por ejemplo una secuencia de símbolos inválida en la codificación Manchester diferencial, o un error en el campo checksum) pondrá a 1 este bit.

El campo FS (frame status) contiene dos bits denominados A y C (Address-recognized y frame-Copied) que están siempre a cero en la trama enviada. Cuando la trama pasa por el ordenador de destino, éste pone a 1 el bit A; si además la interfaz de red ha podido copiar la trama en su buffer pondrá también a 1 el bit C (un ordenador podría no poder copiar una trama por carecer de espacio en su buffer, por ejemplo). Los dos bits siguientes están reservados. La estructura de los cuatro primeros bits se repite idéntica en los cuatro siguientes, de forma que los bits A y C están repetidos. Esto da una mayor seguridad ya que por su posición en la trama el byte FS no es comprobado en el checksum.

La estructura de un token es una versión simplificada de la de una trama. Contiene únicamente los campos SD, AC y ED. En el campo AC el bit de token está siempre puesto a 0. En el campo ED los bits I y E están siempre a 0.

De la estructura de una trama token ring podemos deducir algunas de sus características. En primer lugar, el protocolo incorpora un mecanismo de acuse de recibo automático en los bits A y C del campo FS.

El bit E del campo ED suministra un mecanismo de detección de errores en la transmisión, que también esta integrado en el protocolo.

Por otro lado, el campo AC dispone de tres bits para prioridad, lo cual permite establecer hasta 8 niveles distintos de prioridad, que funcionan de la siguiente manera: cuando un ordenador desea transmitir una trama con prioridad n debe esperar a que pase por el un token de prioridad menor o igual que n . Además, los ordenadores pueden aprovechar una trama en tránsito para solicitar al emisor un token de una determinada prioridad; estas solicitudes se escriben en los bits de reserva del campo AC. Un ordenador sólo puede utilizar los bits de reserva si éstos no contienen ya una petición de mayor prioridad. Cuando la trama de datos vuelva a su originador éste emitirá un token de la prioridad solicitada, que será la más alta que hubiera pendiente en el anillo. En el caso de funcionar con Early Token Release este mecanismo de prioridad queda parcialmente deshabilitado debido a que el emisor ha de restaurar el token antes de haber recibido las solicitudes de reserva.

Las tramas Token Ring tienen un Interframe Gap menor que Ethernet, de sólo 1 byte (equivalente a 2 μ s) en las redes de 4 Mb/s y de 5 bytes (equivalente a 2,5 μ s) en las de 16 Mb/s. Esto se debe a que en Token Ring no es preciso utilizar el Interframe Gap como indicador del principio o final de la trama, estos estan delimitados mediante las secuencias SD y ED.

Resumiendo, el protocolo MAC de Token Ring incorpora una serie de mecanismos que permiten:

- Definir niveles de prioridad
- Disponer de mecanismos de acuse de recibo y detección de errores en la red
- Un sistema de asignación de canal que permite ocupar prácticamente en su totalidad el ancho de banda disponible sin que se produzcan colisiones.

A cambio la necesidad de esperar la llegada del token impone una mayor latencia que Ethernet en situaciones con poca carga.

Aunque Token Ring implementa un mecanismo con ocho niveles de prioridad en la práctica virtualmente todas las aplicaciones diseñadas para Token Ring utilizan únicamente la más alta, ya que a falta de un mecanismo que motivara a emplear prioridades inferiores nadie está interesado en utilizarlas. Esta funcionalidad se ha traducido pues en algo inútil pero complejo y costoso de implementar.

Existe una iniciativa denominada High Speed Token Ring dirigida a modificar el estándar para incluir velocidades de funcionamiento superiores.

4.5.2 Mantenimiento del anillo

Hasta ahora hemos supuesto que los tokens están permanentemente 'flotando' en la red cuando no hay tramas de datos viajando. Pero que ocurre si por ejemplo se pierde una trama, o si sencillamente la estación encargada de regenerar el token desaparece de repente?. En toda red Token Ring hay una estación denominada *monitor* que se ocupa de resolver estas situaciones y garantizar el normal funcionamiento del protocolo. En caso de problemas restaurará un token en el anillo para que el tráfico pueda seguir circulando normalmente. Cualquier estación de una red token ring está capacitada para actuar como monitor en caso necesario. Veamos en detalle como sucede.

Cuando un ordenador se añade a la red (bien porque se conecte a ella o porque se encienda estando ya previamente conectado) escucha la red en busca de tokens o tramas de datos. Si no detecta actividad emite una trama de control especial denominada *claim token*. Si existe ya un monitor éste responderá con un token a la petición. Si no, el ordenador recién incorporado a la red recibirá su propio claim token, momento en el cual pasará a constituirse en monitor.

El monitor se ocupa también de una importante función. El token es de 24 bits pero no se almacena en ningún ordenador en concreto, sino que va pasando bit a bit de uno a otro. Para que el protocolo pueda funcionar es necesario que el tamaño de la red permita mantener el token 'volando' en todo momento. Por ejemplo, en una red Token Ring de 4 Mb/s se emite un bit cada 0,25 μ s, equivalente a una longitud de 50m (a 200.000 Km/s); en este caso un anillo de 1.200 metros permitiría mantener en el cable los 24 bits del token, aún cuando todos los ordenadores de la red estuvieran fuera de servicio. Inversamente, en un anillo con 24 ordenadores funcionando, independientemente de cual fuera la longitud del anillo, los 24 bits siempre podrían estar en los buffers de los ordenadores que se encuentran a la escucha (cada uno de ellos tiene un buffer de un bit); sin embargo, si el número de ordenadores conectados y la longitud de cable existente no permiten albergar el token la red podría dejar de funcionar al no tener el anillo capacidad suficiente. El monitor se ocupa entonces de facilitar los buffers necesarios para garantizar que en todo momento la red puede albergar los 24 bits del token.

4.6 FDDI (ANSI X3T9.5)

FDDI funciona a 100 Mb/s. El estándar correspondiente fue definido inicialmente por ANSI y más tarde adoptado por ISO como el estándar internacional ISO 9314. No se trata pues de un estándar IEEE, aunque sigue su misma arquitectura. Análogamente a los otros estándares, el documento describe la capa física y la subcapa MAC. Para la parte LLC se utiliza el estándar IEEE 802.2.

Las características de velocidad, distancia y fiabilidad de FDDI la convirtieron durante algún tiempo en la red ideal para ser utilizada como columna vertebral (backbone) que concentre las redes locales de una gran organización, como una fábrica o un campus universitario.

FDDI tiene muchos elementos comunes con Token Ring, y en cierta medida puede considerarse una evolución de aquella tecnología. La topología es de doble anillo para aumentar la seguridad, no la velocidad. En condiciones normales un token gira por cada anillo en sentido opuesto. Las estaciones pueden ser SAS (Single Attach Station) si están enchufadas a un anillo únicamente, o DAS (Dual Attach Station) si lo están a ambos. Si se produce un corte en los anillos las estaciones DAS más próximas a cada lado del corte unen entre sí ambos anillos, con lo que se crea un anillo de mayor longitud que permite mantener conectados todos los ordenadores. En el caso de producirse un segundo corte en otro punto del anillo se crean dos anillos aislados, cada uno de los cuales puede seguir funcionando. Las interfaces DAS son más caras que las SAS, pero dan una mayor tolerancia a fallos al permitir cerrar el anillo.

El medio físico de transmisión es fibra óptica multimodo o cable de cobre UTP Categoría 5. En ocasiones la FDDI de cobre se denomina CDDI (Copper Distributed Data Interface), aunque realmente este nombre corresponde a una implementación antigua, no estándar; el nombre correcto del estándar en cable de cobre es TP-PMD (Twisted Pair- Physical Media Dependent). En este caso se utiliza una topología física similar a la de 10Base-T, con los ordenadores conectados a concentradores. La distancia máxima del ordenador al concentrador es de 100 metros. También es posible utilizar concentradores para la conexión de ordenadores por fibra óptica.

FDDI puede considerarse una versión evolucionada de Token Ring en muchos de sus aspectos. No se utiliza señalización Manchester ya que esto supondría 200 Mbaudios, lo cual hubiera requerido una electrónica demasiado cara en las tarjetas de red. En su lugar se diseñó una codificación denominada 4B/5B, que también se utilizó mas tarde en Iso-Ethernet y Fast Ethernet. De esta forma la interfaz física funciona a 125 Mbaudios.

La codificación 4B/5B ahorra ancho de banda, pero pierde la característica de autosincronismo que tenía la codificación Manchester. Para compensar este inconveniente se introduce un largo preámbulo de al menos 16 símbolos (90 bits) al principio de la trama o del token.

La estructura de una trama y token FDDI es muy similar a los de Token Ring. La longitud máxima del campo datos puede ser de hasta 4500 bytes.

El protocolo MAC de FDDI es también muy parecido al de Token Ring. La diferencia más notable es que en FDDI siempre se funciona con el principio de Early Token Release, es decir, la estación emisora no espera a escuchar su propia trama para restaurar el token. Existe también un *token-holding timer* que establece el tiempo máximo que una estación puede transmitir de una vez. Este parámetro tiene importantes consecuencias en el rendimiento de la red; el valor por defecto de 4 ms es adecuado en la mayoría de las situaciones, excepto en las redes muy grandes (más de 20 Km) en que es conveniente aumentarlo.

Existe una versión modificada de FDDI, denominada FDDI-II, que permite manejar tráfico isócrono (voz, vídeo y datos en tiempo real). Para la transmisión de este tipo de tráfico FDDI-II define una trama especial, denominada trama síncrona, que se emite cada 125 μ s por un ordenador que actúa como maestro; una trama síncrona contiene 96 bytes de información útil, equivalentes a 6,144 Mb/s, que con la información de cabecera ocupan 6,25 Mb/s. Este ancho de banda queda reservado para la estación maestra y no puede ser utilizado para tramas asíncronas (es decir, normales). La estación maestra puede reservar espacio para tramas síncronas adicionales, hasta un máximo de 16, con lo que toda la capacidad de la red quedaría reservado para tráfico síncrono. En resumen, en FDDI-II coexiste TDM con un canal compartido en el mismo medio físico. En cierto modo es algo parecido a Iso-Ethernet, salvo que aquí en vez de usar capacidad adicional se 'roba' parte de la capacidad normal. Para poder utilizar FDDI-II es preciso que todas las estaciones del anillo soporten el funcionamiento en modo híbrido, es decir, la coexistencia de tramas síncronas con tramas asíncronas.

El desarrollo de FDDI-II ha quedado prácticamente congelado con la aparición de ATM en redes locales, ya que ATM ofrece el mismo tipo de servicios de forma mas flexible y a un precio inferior.

Hasta 1995-1996 FDDI era la principal tecnología de red de alta velocidad; sin embargo su grado de implantación siempre ha sido escaso. La principal razón de esto ha sido su elevado costo comparado con las redes locales más tradicionales, como Ethernet o Token Ring. Hoy en día ha sido completamente superada por Fast Ethernet y Gigabit Ethernet.

4.7 ESTÁNDAR IEEE 802.2: LLC

Como ya hemos dicho, la subcapa MAC forma la mitad inferior de la capa de enlace en las redes broadcast. Sobre ella se encuentra la subcapa LLC (Logical Link Control) que corresponde en funciones a la capa de enlace de las líneas punto a punto, esto es realiza la comunicación punto a punto entre los dos equipos que interactúan.

El IEEE ha desarrollado el estándar 802.2 para especificar el protocolo de esta subcapa. Este protocolo es compatible con todos los protocolos de nivel MAC de la serie 802, de forma que todas las redes locales 802 presentan una interfaz común a la capa de red independientemente de cual sea el medio físico y el protocolo MAC que se esté utilizando. El protocolo LLC está basado en HDLC.

LLC suministra tres tipos de servicio:

- **LLC Tipo 1:** datagramas sin acuse de recibo. Este es el mas utilizado. Es un servicio similar al ofrecido por PPP en redes de área extensa. No hay control de flujo, pues no hay realimentación del receptor al emisor. A diferencia de PPP aquí no se realiza verificación de errores pues esta ya ha sido efectuada por la subcapa MAC, como hemos visto.
- **LLC Tipo 2:** servicio orientado a conexión fiable. Es similar al ofrecido por HDLC. Se realiza control de flujo, es decir el receptor solicitará al emisor que pare en caso necesario. El receptor solicita además retransmisión si detecta error en el checksum.
- **LLC Tipo 3:** Es un intermedio de los dos anteriores. El emisor envía datagramas y solicita acuse de recibo, pero estos son enviados también como datagramas, no hay un proceso explícito de establecimiento de la conexión como ocurre en el tipo 2.

La mayoría de los protocolos de red utilizados, como IP, requieren únicamente el LLC de tipo 1; en este caso las funciones de la subcapa LLC son casi inexistentes (recordemos que se ha suprimido incluso la verificación del CRC).

La principal función que desempeña la subcapa LLC es suministrar el soporte multiprotocolo, es decir multiplexar o 'etiquetar' adecuadamente los paquetes recibidos de los diferentes protocolos posibles en el nivel de red antes de pasarlos a la subcapa MAC. Esto se hace mediante unos campos especiales en la trama LLC, como veremos a continuación. En el caso de redes Ethernet con trama en formato DIX la capa LLC es totalmente inexistente ya que esta información se suministra en el Ethertype como ya hemos visto.

La estructura de una trama LLC normal es compleja y poco elegante. Para comprender como se llegó a ella es preciso repasar la evolución histórica. La estructura inicialmente aprobada por el IEEE para la trama LLC era la indicada en la tabla 4.15.

Campo	Longitud (bytes)
DSAP (Destination Service Access Point)	1
SSAP (Source Service Access Point)	1
LLC Control	1 ó 2
Datos	Variable

Tabla 4.15.- Estructura de la trama LLC 802.2

El campo LLC Control desempeña aquí un papel equivalente al campo control de la trama HDLC. Según el tipo de servicio LLC utilizado sus valores podrán ser unos u otros. Por ejemplo en LLC tipo 2 se utilizan los mismos tipos de trama y comandos que en HDLC, mientras que en LLC tipo 1 el campo control siempre vale X'03' (00000011) que significa tramas no numeradas, es decir envío de datagramas sin acuse de recibo, como ocurre en PPP, por ejemplo.

Los campos DSAP y SSAP tienen la finalidad de permitir identificar a que protocolo de red pertenece la trama LLC. La posibilidad de identificar por separado el protocolo en el origen y el destino permite que los dos ordenadores asignen diferentes números al mismo protocolo, cosa realmente rebuscada, o que dos protocolos de red diferentes puedan intercambiar directamente paquetes, cosa también nada habitual. Aunque se reserva un byte para especificar el protocolo los dos primeros bits del DSAP y el SSAP están reservados, ya que tienen significados de grupo/individual y local/global, igual que ocurre con las direcciones MAC del IEEE. Por tanto en realidad solo hay seis bits disponibles para especificar el protocolo. Con únicamente 64 posibles valores el campo DSAP/SSAP se mostró rápidamente insuficiente (solo unos pocos protocolos privilegiados del IEEE y de ISO han podido obtener números de DSAP/SSAP), por lo que había que idear un mecanismo que permitiera extender en longitud el campo protocolo.

La solución fue reservar un valor en el DSAP y el SSAP (el hexadecimal 'AA') para indicar la existencia de un campo adicional denominado SNAP (SubNetwork Access Protocol), inmediatamente a continuación del campo LLC Control y antes de los datos, que permitiría especificar con holgura cualquier protocolo (afortunadamente se abandonó la idea absurda de que diferentes ordenadores

utilizaran diferentes códigos para un mismo protocolo, con lo que no fue preciso incluir dos campos SNAP). Como la mayoría de las arquitecturas trabajan de forma más eficiente extrayendo campos cuyo número de bytes sea potencia entera de dos se consideró que 5 bytes era la longitud más adecuada para el campo SNAP, ya que así la cabecera LLC-SNAP tendría 8 bytes (en la mayoría de los casos el campo LLC control tiene una longitud de 1 byte, ya que normalmente se utiliza LLC tipo 1). El campo SNAP se divide en dos partes, de forma parecida a las direcciones MAC del IEEE: los primeros tres bytes forman lo que se denomina el OUI (Organizationally Unique Identifier) que identifica al fabricante que registra el protocolo ante el IEEE, mientras que los dos últimos identifican el protocolo dentro de ese fabricante.

En realidad el IEEE no abrió un nuevo registro de OUIs, sino que asignó a cada fabricante de forma automática los OUIs correspondientes a los rangos de direcciones MAC que ese fabricante tenía asignadas. De esta forma cuando un fabricante compra al IEEE un rango de 16 millones de direcciones MAC también esta comprando por el mismo precio un rango de 65536 posibles protocolos que puede definir.

Merece la pena mencionar que el 'OUI' '000000' se reserva para indicar que el campo Tipo (los dos bytes siguientes) especifican el protocolo utilizado siguiendo el convenio de la trama DIX Ethernet ya comentado.

Así, excepto para los pocos protocolos privilegiados que reciben directamente un número de SAP del IEEE (todos ellos por supuesto definidos por el IEEE o la ISO) la estructura de una trama LLC 802.2 es normalmente la que se muestra en la tabla 4.16, donde a título de ejemplo mostramos el valor que tienen los diversos campos en el caso de utilizar una trama 802.2 para transportar datagramas IP.

Campo	Longitud (bytes)	Valor en datagrama IP
DSAP (Destination Service Access Point)	1	X 'AA'
SSAP (Source Service Access Point)	1	X 'AA'
LLC Control	1	X '03'
OUI (Organizationally Unique Identifier)	3	X '000000'
Tipo	2	X '0800'
Datos	Variable	Datagrama

Tabla 4.16.- Estructura de la trama LLC 802.2-SNAP

La trama LLC es la manera normal de enviar los datos en cualquier red local excepto en Ethernet, donde como ya hemos visto existen dos posibilidades:

- Usar el campo longitud en la trama MAC y poner en el campo datos una trama LLC que contiene el tipo de protocolo utilizado a nivel de red; en este caso normalmente se utilizará una trama LLC-SNAP, por lo que la longitud máxima del paquete a nivel de red será de $1500 - 8 = 1492$ bytes. Esta es la aproximación empleada por Appletalk fase 2, NetBIOS y algunas implementaciones de IPX (Netware de Novell), por ejemplo.
- Usar el campo tipo en la trama MAC y poner directamente en el campo datos el paquete a nivel de red. En este caso la longitud máxima del paquete a nivel de red podrá ser de 1500 bytes. Este formato es empleado por TCP/IP, DECNET fase 4, LAT (Local Area Transport, de DEC) y algunas implementaciones de IPX.

El primero es referido a menudo como formato IEEE, y el segundo como formato DIX (aunque actualmente ambos formatos son aceptados por el IEEE). Si tenemos una red en la que funcionen varios de estos protocolos tendremos normalmente tramas de los dos formatos.

4.8 OTRAS REDES LOCALES

Hasta finales de los ochenta prácticamente todas las redes locales eran Ethernet o Token Ring, y en menor medida Token Bus. A finales de los 80 empezaron a aparecer otros tipos de redes locales que funcionaban a velocidades de 100 Mb/s y superiores. Vamos a dar una breve descripción de las más importantes sin entrar en tantos detalles como hemos hecho con Ethernet y Token Ring.

4.8.1 ESTÁNDAR IEEE 802.4: TOKEN BUS.

Cuando se desarrollaba el estándar ethernet algunas grandes empresas interesadas en la automatización de fábricas tenían serias dudas de la viabilidad de su aplicación a sistemas en tiempo real. La razón principal de este reparo estaba en el comportamiento no determinista de Ethernet, en principio cabía la posibilidad de que dos ordenadores no pudieran comunicarse debido al exceso de tráfico en la red. No había un límite superior al caso más desfavorable. Además, no era posible reservar capacidad o establecer prioridades.

Token Ring resolvía muchos de los problemas que se le achacaban a Ethernet, pero seguía presentando dos inconvenientes serios: el papel de la estación monitor resultaba demasiado importante, y muchas cosas podían fallar si el monitor dejaba de funcionar o se volvía loco. Además, una topología en bus era mas adecuada que un anillo para la cadena de montaje de una fábrica.

En un intento por resolver estos inconvenientes, General Motors promovió el desarrollo del estándar 802.4, también llamado Token Bus. Esta red se utiliza en algunas fábricas para el control de la maquinaria. Su uso es mucho más restringido que Ethernet o Token Ring, por lo que sólo la describiremos muy brevemente.

De una manera muy simplista podemos decir que Token Bus es un híbrido entre Ethernet y Token Ring, si bien guarda mucho más parecido con esta última red. Tiene topología de bus. Las velocidades pueden ser de 1, 5 o 10 Mb/s. La señal se transmite de forma analógica sobre cable coaxial de 75 ohmios. El medio físico es completamente incompatible con Ethernet y mucho más complejo y caro.

El protocolo MAC es más parecido a Token Ring. Aunque la topología física es de bus las estaciones constituyen un anillo lógico sobre el que va pasando el token. Existe un mecanismo de prioridades. La trama puede tener un tamaño de hasta 8190 bytes. Aunque hay un mecanismo de mantenimiento del anillo (generación del token, labores limpieza de tramas perdidas, etc.) no existe una estación omnipotente equivalente al monitor de Token Ring.

Al igual que Token Ring, Token Bus utiliza un protocolo sin colisiones por lo que puede llegar a tener un rendimiento muy cercano a su límite teórico.

4.8.2 Estándar IEEE 802.12: 100VG-AnyLAN

La alternativa paralela que nació junto con Fast Ethernet se constituyó en el comité IEEE 802.12. El nombre por el que se conoce comúnmente a esta red es 100VG-AnyLAN; VG significa Voice Grade, y AnyLAN indica el objetivo de crear una red que pudiera interoperar con las dos redes locales más habituales (Ethernet y Token Ring).

Los medios físicos y la topología de 100VG-AnyLAN son muy similares a los de Fast Ethernet.

El formato de trama de 100VG-AnyLAN puede ser Ethernet o Token Ring; en una misma red sólo es posible utilizar uno de ambos formatos a la vez. Esto permite adaptar esta red a una ya existente con el máximo de compatibilidad a la hora de utilizar puentes. Para comunicar dos redes 100VG-AnyLAN con diferente tipo de trama se debe utilizar un puente traductor 802.3 <-> 802.5, o un router.

El protocolo a nivel MAC está basado en el principio de *polling* (votación o sondeo en inglés); el concentrador desempeña el papel de moderador y va preguntando a las estaciones una a una en riguroso turno rotatorio si tienen alguna trama que transmitir. Después de un ciclo completo todos los nodos han

sido interrogados una vez y han disfrutado de acceso al canal en igualdad de oportunidades. Cuando existe más de un concentrador se crea una estructura jerárquica donde uno de ellos se constituye en raíz y da la vez a cada uno de sus 'hijos', que a su vez la dan a sus nietos, y así sucesivamente. En esencia el mecanismo es similar al de una red Token Ring, pero el control de la red lo ejercen los concentradores.

Además del sondeo 'democrático' hay un rudimentario mecanismo de prioridad bajo demanda con dos niveles, alta y normal. La rondas de sondeo se hacen en dos etapas, primero buscando tráfico de alta prioridad únicamente, y luego tráfico normal. Este mecanismo permite transmitir tráfico isócrono, como voz o vídeo, clasificándolo como de alta prioridad.

Siguiendo el ejemplo de Ethernet el comité 802.12 está elaborando modificaciones al estándar para incluir velocidades de transmisión superiores, de 531 y 850 Mb/s.

Cuando aparecieron en el mercado los primeros productos Fast Ethernet y 100VG-AnyLAN se produjo una cierta pugna entre fabricantes partidarios de una u otra red. A pesar de que técnicamente 100VG-AnyLAN sea más sofisticado y versátil el mercado se ha decantado en favor de Fast Ethernet. El principal proponente y fabricante de productos 100VG-AnyLAN actualmente es HP, que fue quien efectuó la propuesta del protocolo al IEEE.

4.8.3 HIPPI - High Performance Parallel Interface (ANSI X3T9.3)

La especificación HIPPI tiene su origen en Los Alamos, uno de los principales laboratorios de armamento nuclear de los Estados Unidos. Este laboratorio es famoso por tener uno de los mayores parques instalados de supercomputadores del mundo. Dado que sus requerimientos de ancho de banda no se veían satisfechos con ninguna de las redes existentes, los investigadores de Los Alamos decidieron en 1987 diseñar una interfaz que les permitiera interconectar los supercomputadores y sus periféricos con el máximo de prestaciones posible utilizando la tecnología disponible, sin tener que diseñar componentes a propósito. Tanto en el nivel físico como en los protocolos utilizados se quería el máximo de sencillez; todos los esfuerzos debían ir enfocados a obtener el máximo rendimiento posible.

El sistema diseñado en Los Alamos se propuso en 1991 a ANSI para su estandarización. Existe también el HIPPI Networking Forum, un consorcio de vendedores y usuarios interesados en redes de alta velocidad basadas en HIPPI.

HIPPI es un protocolo orientado a conexión, establece siempre conexiones punto a punto entre los ordenadores a conectar; no existe red broadcast ni medio compartido. Existen conmutadores crossbar que permiten interconectar diversos dispositivos HIPPI entre sí.

La señalización se realiza a una velocidad relativamente baja, 25 Mbaudios (después de todo se diseñó en 1987 con componentes estándar); la elevada capacidad se consigue transmitiendo simultáneamente en paralelo por muchos cables (de ahí el nombre de 'parallel'). El medio físico de conexión es un cable de cobre STP (Shielded Twisted Pair) de 50 pares. Cada 40 ns viajan por estos pares 50 bits de información, de los cuales 32 corresponden a datos y 18 a información de control. De esta forma se consigue una velocidad nominal de 800 Mb/s. Existe también una especificación de 1.600 Mb/s, que se consigue sencillamente utilizando dos cables y doblando las interfaces, es decir, enviando 64 bits de datos y 36 de control cada 40 ns. El medio de transmisión es simplex, por lo que si se quiere comunicación full-dúplex es preciso utilizar dos (o cuatro) cables.

La distancia máxima de los cables es de 25 metros. Si se realiza una conexión a través de un conmutador HIPPI la distancia máxima entre dos dispositivos cualesquiera es de 50 metros. Es posible conectar varios conmutadores HIPPI en cascada, pudiendo en éste caso llegar a una distancia máxima de 200 metros. Existe una interfaz serie denominada 'HIPPI serial extension' (parallel-serial, suena realmente curioso) que utiliza fibra óptica, y que puede llegar a una distancia de 300 metros en multimodo y 10 kilómetros en monomodo. También es posible utilizar SONET/SDH como medio de transporte de tramas HIPPI para largas distancias.

En una conexión HIPPI el diálogo típicamente se inicia con un comando REQUEST en el que el originador solicita la conexión, que es respondido con un CONNECT por el destinatario, seguido de un

READY para indicar que está en condiciones de aceptar tráfico. Las direcciones de las estaciones son de 24 bits.

Las tramas que se transmiten en un canal HIPPI son de 256 palabras (1024 bytes). Una trama se transmite en 256 pulsos de 40 ns cada uno; el protocolo utilizado a nivel de enlace es de parada y espera, aunque también puede utilizarse ventana deslizante. El control de errores se realiza mediante un bit de paridad horizontal por palabra y un bit vertical al final de cada trama. No se calculan checksums porque se consideraron innecesarios y habrían hecho demasiado lenta la transmisión.

Debido a su relativa sencillez y ausencia de florituras, HIPPI ha sido implementado por muchos fabricantes y se ha extendido con rapidez en áreas donde es necesaria una velocidad elevada, por ejemplo equipos de representación gráfica de altas prestaciones, o supercomputadores utilizados en computación paralela (aquí una gran ventaja es su pequeñísima latencia, del orden de 160 ns); también es una opción interesante como super-backbone de redes locales. Actualmente HIPPI constituye un estándar de facto en conexiones de muy altas prestaciones, y su precio aunque elevado no es exagerado si se compara con la capacidad que ofrece. Existen interfaces HIPPI incluso para ordenadores personales.

La aparición de Gigabit Ethernet ha dejado un poco olvidado a HIPPI. Recientemente se ha definido un nuevo estándar denominado GSN (Gigabyte System Network)⁴¹ también conocido como HIPPI-6400 o 'SuperHIPPI', que contempla enlaces que funcionan a 6,4 Gb/s, ocho veces HIPPI. Actualmente GSN es la tecnología de red estándar mas rápida que existe. A pesar de su nombre GSN tiene poco en común con HIPPI, salvo el enfoque general: intentar obtener la máxima velocidad posible de forma sencilla para que el costo no sea exagerado y la implementación realizable. La señalización empleada en GSN es de 10 Gbaudios; con codificación 4B/5B esto da 8 Gb/s; de los que 1,6 Gb/s se utilizan para direccionamiento y control de errores quedando 6,4 Gb/s netos para el nivel de red. De forma parecida a HIPPI la elevada capacidad se consigue agregando múltiples enlaces físicos, para evitar una velocidad de señalización excesiva. El estándar actualmente aprobado contempla interfaces de cobre con una distancia máxima de 40m que utilizan cable STP de 50 pares; la información se envía utilizando 20 pares para cada sentido, y diversas señales de control en los restantes; cada par transmite 500 Mbaudios. Se están preparando los estándares para dos interfaces de fibra óptica, una en primera ventana que llegará a 220m (multimodo) y una en segunda que llegará a 300m (multimodo) o a 1 Km (monomodo); en ambos casos la señal se reparte en diez fibras para cada sentido, cada una enviando 1 Gbaudio. Obsérvese el parecido con las interfaces y velocidades utilizadas en Gigabit Ethernet.

Actualmente se está considerando la posibilidad de aumentar la velocidad por fibra de GSN a 2,5 Gbaudios (2 Gb/s), y agregar 10 ó 12 enlaces, con lo que se podría tener HIPPI-16,000 o HIPPI-19,200.

4.8.4 Fibre Channel (ANSI X3T11)

Dada la capacidad y fiabilidad de las fibras ópticas resultaba paradójico que HIPPI, que durante un tiempo fue la red de mayor velocidad, estuviera basada en cable de cobre. La especificación Fibre Channel, que empezó en 1988, era una evolución natural de HIPPI. Sin embargo, a diferencia de lo que ocurrió con HIPPI, la especificación de Fibre Channel está repleta de opciones y marcada por la complejidad. Aunque esto en principio puede parecer positivo, en la práctica supuso que los productos tardaran en aparecer en el mercado y nunca hayan obtenido el éxito esperado.

Fibre Channel, al igual que HIPPI, puede utilizarse tanto para redes locales como para conectar periféricos potentes a grandes ordenadores (arrays de discos, por ejemplo). Puede utilizarse como medio de transporte de un sinfín de otras tecnologías de red, tales como tramas 802.2, celdas ATM, paquetes IP, o tramas HIPPI (HIPPI también puede transportar tramas Fibre Channel).

Una red Fibre Channel se constituye utilizando conmutadores (crossbar), concentradores o anillos. En los conmutadores cada estación tiene un ancho de banda dedicado; en el concentrador y el anillo la capacidad es compartida entre todas las estaciones; puede haber hasta un máximo de 127 estaciones en un concentrador o anillo. Los anillos Fibre Channel también se denominan FC-AL (Fibre Channel Arbitrated Loop). Se utilizan direcciones de 48 bits compatibles con las de las redes IEEE 802.

⁴¹ La denominación Gigabyte proviene del hecho de ser la primera red estándar que consigue una tasa de transferencia superior a 1 GigaByte por segundo: 6,4 Gb/s = 800 MB/s. Como esta velocidad se da para cada sentido simultáneamente el total es 1,6 GB/s, superior a 1 GB/s.

La velocidad de transferencia neta puede ser de 100, 200, 400 u 800 Mb/s. Los datos, junto con cierta información de control adicional, se codifican mediante el esquema 8B/10B, diseñado originalmente por IBM y utilizado más tarde en Gigabit Ethernet; las velocidades de señalización son 133, 266, 531 o 1.062 Mbaudios, según la velocidad de transferencia utilizada. También se contemplan en el estándar velocidades de 1,6 y 3,2 Gb/s, a las que corresponderían velocidades de señalización de 2,12 y 4,25 Gb/s, pero no existen implementaciones de estas velocidades. La interconexión de equipos se hace mediante conmutadores Fibre Channel (crossbar). El medio de transmisión puede ser cable de cobre coaxial o STP y fibra óptica monomodo o multimodo. Cada medio tiene unas limitaciones de distancia y velocidad, como muestra la tabla 4.17.

Tipo de cable	800 Mb/s	400Mb/s	200 Mb/s	100 Mb/s
Fibra monomodo	10 Km	10 Km	10 Km	-
Fibra multimodo 50 μ m	500 m	1.000 m	2.000 m	10 Km
Fibra multimodo 62,5 μ m	175 m	350 m	1.500 m	1.500 m
Cable coaxial de vídeo	25 m	50 m	75 m	100 m
Cable coaxial miniatura	10 m	15 m	25 m	35 m
Cable STP			50 m	100 m

Tabla 4.17.- Distancia máxima en Fibre Channel según el medio físico y la velocidad

Para reflejar la versatilidad en los medios físicos soportados se eligió el nombre fibre (fibra en francés) en vez de la denominación habitual en inglés (fiber).

Fibre Channel suministra tres clases de servicio: conmutación de circuitos con entrega en orden garantizada, conmutación de paquetes con entrega garantizada, y conmutación de paquetes sin entrega garantizada, que corresponden al servicio LLC tipo 2, tipo 3 y tipo 1 respectivamente. La parte de datos de la trama puede ser de hasta 2048 bytes. Ésta contiene un CRC de 32 bits. La tasa de errores es menor de 1 en 10^{12} .

Algunos consideran que la utilización por parte de Gigabit Ethernet del nivel físico de Fibre Channel permitirá aprovechar adecuadamente el trabajo realizado en su momento. Es posible que la aparición de Gigabit Ethernet, que sin duda supondrá un abaratamiento de la tecnología de redes de alta velocidad, permita una mayor difusión de Fibre Channel, ya que la mayoría de los componentes físicos desarrollados para una red pueden aprovecharse en la otra.

4.8.5 Estándar IEEE 802.6: MAN DQDB

DQDB (Distributed Queue Dual Bus) es la única tecnología de red que se identifica claramente como MAN. Ha sido especificada por el comité 802.6 de IEEE.

La topología de DQDB es un doble bus al cual se van conectando las estaciones. Cada uno se utiliza para la transmisión de los datos en un sentido. El doble bus está formado por dos cables coaxiales y puede tener una longitud de hasta 160 Km, por lo que puede realmente cubrir toda una ciudad.

La velocidad típica de DQDB es de 34/45/140/155 Mb/s (E3/T3/E4/OC3). La información viaja en celdas de 53 bytes, de lo que podemos intuir que esta tecnología tiene alguna relación con ATM.

En España ha habido muy pocas experiencias de redes DQDB, y no es probable que aparezca ninguna nueva en el futuro. Actualmente este servicio no es ofrecido por los operadores.

4.9 REDES DE SATÉLITES

Todos los tipos de redes broadcast que hemos visto hasta ahora son de corto alcance (LANs) o de mediano alcance (MANs). Aunque la gran mayoría de redes broadcast que existen son de este tipo, hay al menos una que es de largo alcance: las redes de datos vía satélite. El alcance de la huella de un satélite de comunicaciones puede variar entre 250 y 10.000 Km; dentro de esta zona sus señales pueden ser recibidas por cualquier estación que disponga de los medios necesarios.

Como ya hemos visto, la transmisión de señales ascendentes y descendentes ocurre a diferentes frecuencias, para evitar interferencias. La mayoría de los satélites no procesan las señales recibidas, y se limitan a reproducir las que reciben de la tierra; se les conoce como satélite de tubería doblada (bent pipe).

Las redes vía satélite tienen unas características singulares que dan lugar a unos problemas peculiares en lo que se refiere al protocolo de acceso al medio. Estas características son fundamentalmente dos:

- El satélite puede captar a todas las estaciones, y todas ellas pueden captar al satélite, pero una estación no puede captar directamente la señal de otra estación.
- La señal tarda aproximadamente 270 ms en hacer el trayecto completo arriba y abajo. En el caso de comunicación a través de un hub (redes VSAT) el viaje se hace dos veces, con lo que el tiempo se duplica.

Como consecuencia de estas dos características resulta imposible utilizar protocolos con detección de portadora, como CSMA/CD, ya que en el mejor de los casos la estación podría saber el estado en que se encontraba el canal 270 ms antes, o dicho de otro modo el valor de 2τ sería tan grande que el rendimiento sería muy bajo, o bien el tamaño de trama mínimo tendría que ser muy grande. Los satélites son demasiado caros como para poder permitirse el lujo de no aprovecharlos bien.

En el canal descendente (satélite \rightarrow tierra) la situación es mucho más simple, ya que existe un único emisor, por lo que no existe conflicto. En cuanto al canal ascendente se emplean cinco tipos de protocolos: polling (votación), ALOHA, FDM, TDM y CDMA.

4.9.1 Polling

Hemos visto ya el concepto de polling al estudiar el protocolo MAC de la red 100VG-AnyLAN. En aquel caso el concentrador interrogaba a las estaciones una a una en riguroso turno rotatorio, por si tenían algo que transmitir. Podemos imaginar un protocolo parecido en el que el propio satélite va interrogando o 'dando la vez' a las estaciones una a una; el inconveniente es que cada secuencia pregunta-respuesta requiere como mínimo 270 ms y si la densidad de estaciones deseando transmitir es pequeña la eficiencia puede ser extremadamente baja.

Sin embargo, es posible utilizar este protocolo si la ronda de preguntas se lleva a cabo por algún medio de transmisión terrestre de bajo retardo. Por ejemplo, las estaciones podrían estar conectadas a una red X.25 o por líneas punto a punto; de esta forma podrían ir pasándose la vez formando un anillo lógico, empleando un protocolo que podríamos considerar inspirado en la red Token Ring. Cada estación sólo puede enviar datos al satélite cuando posee el Token; éste nunca subiría al satélite, pero serviría para asegurar que ninguna otra estación está utilizando el canal. La conexión terrestre entre las estaciones no necesita ser de alta velocidad, ya que la cantidad de datos a transmitir por este medio es pequeña.

4.9.2 ALOHA

Como ya hemos visto, el uso de ALOHA puro da un rendimiento máximo del 18%. Con ALOHA ranurado podemos doblar la eficiencia, pero hemos de suministrar por algún medio la señal de reloj maestra a todas las estaciones. Esto puede conseguirse de manera sencilla con el propio satélite, ya que todas las estaciones captan su señal. En la práctica la señal de referencia es generada en una estación en tierra, denominada *estación de referencia*, y retransmitida a través del satélite a todas las estaciones, que la utilizan para sincronizarse. La señal se repite cada cierto tiempo para corregir posibles

desplazamientos. Además las estaciones toman en cuenta su distancia respecto al satélite para compensar las diferencias de tiempo que la señal tarda en llegar a cada una de ellas.

Con el ALOHA ranurado el rendimiento puede llegar al 37%. Para aumentar aún más la eficiencia se utilizan en sentido ascendente dos canales independientes; cada estación elige al azar uno de ellos (en sentido descendente sigue habiendo un único canal, ya que ahí no hay problema de contención). Si llegan dos tramas a la vez al satélite éste deberá reenviar una y almacenar la otra en su buffer para enviarla en el intervalo siguiente, suponiendo que en dicho intervalo no reciba ninguna trama. Dado que cada canal ascendente funciona como un sistema ALOHA independiente del otro el rendimiento máximo del conjunto podría llegar al 74%, por lo que no sería preciso un espacio en buffers exagerado para reducir a una cantidad despreciable la probabilidad de que se agote el espacio en buffers del satélite. Con este sistema se multiplica por 2 la eficiencia habiendo incrementado en 1,5 el ancho de banda utilizado (hemos pasado de 1+1 a 2+1).

4.9.3 FDM

La multiplexación por división de frecuencias resuelve el problema de acceso al medio repartiendo el canal de manera más o menos estática entre las estaciones que lo requieren. Una vez asignado un ancho de banda a una estación ésta lo tendrá reservado para su uso mientras no lo libere, independientemente de que lo use o no. Existen sin embargo algunos sistemas FDM que asignan canales a las estaciones de manera dinámica de acuerdo a sus necesidades.

La FDM tiene el inconveniente de que en general no se adapta bien a un tratamiento digital; la elevada componente analógica requiere establecer márgenes de seguridad entre los canales asignados, ya que los transmisores no pueden evitar emitir parte de su potencia fuera del canal (o dicho de otra manera, la representación de potencia frente a frecuencia no es una onda cuadrada).

4.9.4 TDM

Con TDM se resuelven algunos de los problemas de FDM, especialmente los relativos al proceso analógico de la señal y a la asignación de márgenes de seguridad debido a la naturaleza no abrupta de las señales FDM. Con TDM es preciso disponer de un reloj que sincronice todas las estaciones, para lo que se utilizan mecanismos similares al que hemos visto para el ALOHA ranurado.

En su versión más simple TDM reparte la capacidad del satélite en canales o intervalos de tiempo (slots) que asigna a las estaciones que lo solicitan. Cuando una estación solicita uno o varios canales se le reserva esa capacidad hasta que la libere, independientemente de que la utilice o no.

En un nivel de sofisticación superior los slots TDM se pueden asignar dinámicamente a las estaciones que lo requieran; esto permite un mayor aprovechamiento de la capacidad del satélite. Existen varios mecanismos para la asignación dinámica de slots:

- Si el número de slots es mayor que el número de estaciones, se asigna a cada estación un slot 'de su propiedad'; los slots sobrantes quedan sin asignar y pueden ser utilizados por cualquier estación que lo solicite. Cuando en una trama una estación no ocupa su slot éste queda marcado como disponible y puede ser 'prestado' a otra. Si la estación propietaria desea recuperar su slot mas tarde transmite algo y fuerza así una colisión; en ese momento se le devuelve 'su' slot.
- El segundo mecanismo consiste sencillamente en que las estaciones compitan usando ALOHA ranurado por cada uno de los slots; una vez una estación adquiere un slot lo utiliza mientras tenga datos que enviar (siguiendo algunas reglas mínimas de cortesía). Si cada estación utiliza el slot únicamente una vez este mecanismo tiene la eficiencia de ALOHA ranurado, pero si como es de esperar la estación retiene el slot durante varias tramas la eficiencia mejora notablemente.
- En el tercer mecanismo existe un slot especial en la trama que se divide en 'subslots' donde las estaciones pueden 'solicitar' slots; si una estación solicita un slot y no colisiona con otra dicho slot le queda asignado en la siguiente trama.

4.9.5 CDMA

CDMA (Code Division Multiple Access) es un sistema de asignación de canal utilizado en telefonía celular, que también se emplea en redes de satélite.

4.10 REFERENCIAS

- [1] R. M. Metcalfe y D. R. Boggs: "Ethernet: Distributed Packet Switching for Local Computer Networks" Communications of the ACM 19 (7), julio 1976. Disponible en <http://www.acm.org/classics/apr96/>
- [2] D.R. Boggs, J. C. Mogul y C. A. Kent. "Measured Capacity of an Ethernet: Myths and Reality", ACM SIGCOMM'88 Symposium on Communications Architectures & Protocols, pp. 222-234, agosto 1988. Disponible en <http://www.research.digital.com/wrl/publications/abstracts/88.4.html>
- [3] H. W. Johnson: "Fast Ethernet - Dawn of a New Network", pag. 19, Prentice Hall, 1996
- [4] R. Perlman: "Interconnections: Bridges and Routers", Addison-Wesley, 1992
- [5] "Gigabit Ethernet Over Copper". URL:http://www.gigabit-ethernet.org/technology/whitepapers/gige_1098/Gea_Cop.pdf, o mas concretamente http://www.gigabit-ethernet.org/technology/whitepapers/gige_1098/copper_2.html#correcting, octubre de 1998.
- [6] "Anixter Levels Channel Solutions: Performance, not Promises". URL:<http://www.anixter.com/solution/cabling/levels97/>
- [7] "Testing Fiber Optic Cabling for Gigabit Ethernet". URL:ftp://ftp.scope.com/whitepap/GigEN_fiber.pdf, julio de 1998.
- [8] "Analysis of Physical Layer Requirements For 155 Mb/s Twisted Pair ATM". URL: <http://www.scope.com/whitepap/WHITE12.HTM>. 1998.
- [9] "The ATM Controversy". URL: <http://www.scope.com/whitepap/WHITE18.HTM>. Julio de 1996.
- [10] "Energy of 155 Mb/s ATM Power Spectrum Above 100 MHz". URL: <http://www.scope.com/whitepap/WHITE13.HTM>. 1998.
- [11] ATM Forum: AF-PHY-0015.000, "ATM Physical Medium Dependent Interface Specification for 155 Mb/s over Twisted Pair Cable", 9/1994
- [12] TIA/EIA-568-A-5 Addendum 5 (draft) "Additional Transmission Performance Specifications for 100 ohm 4-Pair Enhanced Category 5 Cabling", 8/1998.
- [13] R. Seifert, "Gigabit Ethernet". Addison Wesley, 1998.
- [14] C. E. Spurgeon, "Charles Spurgeon's Ethernet Web Site". URL:<http://wwwhost.ots.utexas.edu/ethernet/Topol>.
- [15] C. E. Spurgeon, "Practical Networking With Ethernet". International Thomson Computer Press, 1998.
- [16] R. Seifert: "The Effect of Ethernet Behavior on Networks using High-Performance Workstations and Servers", URL:<http://wwwhost.ots.utexas.edu/ethernet/pdf/techrept13.pdf>. Technical Report, Networks and Communications Consulting, marzo 1995

[17] Mart L. Molle: "A New Binary Logarithmic Arbitration Method for Ethernet".
URL:<ftp://www.cs.utoronto.edu/pub/blam/report.ps> Technical Report CSRI-298, Computer Systems Research Institute, University of Toronto, Toronto, Canada, M5S 1A1, abril 1994.

[18] B.E. Carpenter. "Characteristics and Practical use of Networks for High Energy Physics", Proc. 1986 CERN School of Computing, CERN, p. 3, 1987

4.11 EJERCICIOS

1. Indique si es verdadera o falsa cada una de las siguientes afirmaciones:
 - a) En un protocolo MAC de tipo ALOHA el rendimiento es bajo, al no haber detección de portadora.
 - b) Un protocolo MAC sin colisiones (por ejemplo Token Ring) tiene siempre una latencia menor que uno con colisiones (por ejemplo Ethernet).
 - c) En Ethernet el mecanismo del retroceso exponencial binario asegura que en caso de producirse contención la capacidad disponible se reparte de forma equilibrada entre las estaciones.
 - d) La longitud máxima de una red Ethernet viene fijada por el tamaño de trama máximo y su velocidad.
 - e) En una red Token Ring no es posible reservar una determinada capacidad a una estación concreta de la red.
 - f) La codificación 8B/10B, empleada en Fibre Channel y Gigabit Ethernet, supone el envío de 10 bits codificados en 8 baudios.
 - g) Las direcciones IEEE (direcciones MAC de seis bytes) solo pueden utilizarse en tecnologías de red que han sido estandarizadas por dicha organización (por ejemplo IEEE 802.3, 802.5, etc.).
2. El IEEE cobra 1250 dólares USA por cada rango de direcciones MAC asignado. Calcule cuales serán los ingresos máximos que podría obtener el IEEE por este concepto.
3. Suponga que se desarrolla una variante de Fast Ethernet en la que el tamaño de trama máximo es diez veces mayor que el actual (es decir, 15180 bytes) manteniendo la velocidad de 100 Mb/s. ¿Que consecuencia tendría esto en la distancia máxima entre estaciones, también llamada *diámetro* de la red? Explique su respuesta.
4. Suponga que se le pide desarrollar una LAN a 10 Mb/s, optimizada para tramas de pequeño tamaño. El protocolo será CSMA/CD, idéntico a Ethernet, pero las distancias y el número máximo de repetidores entre estaciones se han definido de forma que el RTT (Round Trip Time) máximo es de 40 μ s. Calcule el tamaño de trama mínimo que podría utilizarse en dicha red.
5. Cual sería la longitud mínima de cable en una red Token Ring de 4 Mb/s para que todo el token se pudiera mantener en el cable? Suponga que el cable tiene una velocidad de propagación de 0,77 c.
6. La estructura de trama Token Ring prevé la utilización de los últimos tres bits del campo AC (Access Control) para reserva de prioridad, tanto en las tramas de token como en las de datos. ¿Como

cambiaría el funcionamiento del protocolo si se suprimieran estos tres bits en las tramas de datos y se mantuvieran únicamente en las de Token?

Suponga que se trata de una red de 4 Mb/s, que no utiliza por tanto el mecanismo de Early Token Release.

7. Suponga que quiere transmitir información de un host A a otro B por una red ethernet (802.3) usando tramas LLC 802-SNAP. Calcule la velocidad máxima teórica con que podrá transmitirse la información del nivel de red (cabeceras incluidas) en el caso mas favorable (usando tramas del tamaño máximo posible) y en el más desfavorable (usando tramas con un byte de información útil). Repita el cálculo usando tramas en formato DIX. Suponga que la estación A es la única que transmite en la red y que su capacidad le permite saturarla.

Si con un analizador medimos el tráfico a nivel físico en la red que resultado obtendremos en cada caso?

8. Repita el ejercicio anterior para una red Token Ring; suponga que el token holding-time es de 10 ms y que hay 20 estaciones en el anillo (aunque solo la estación A genera tráfico).
9. En una red IEEE 802.3 se envía un fichero de un ordenador a otro empleando LLC tipo 1, mediante tramas de la longitud máxima permitida; el protocolo de transporte utilizado implementa un mecanismo de acuse de recibo que permite solicitar retransmisión selectiva en caso de pérdida de una trama. Los respectivos subniveles LLC disponen de sendos contadores de las tramas enviadas y recibidas, y se quiere utilizar éstos para estimar la fiabilidad de la conexión física entre ambos ordenadores. Se contemplan dos posibles causas por las que una trama puede no ser recibida por el subnivel LLC en el receptor:
 - Colisión en la red: en este caso la trama no llega a ser recibida ni siquiera por el subnivel MAC del receptor; dado que las pruebas se realizan en un momento en que no hay otra actividad en la red, este efecto se considera despreciable.
 - Error en la transmisión: en este caso el subnivel MAC del receptor al comprobar el CRC descartará la trama silenciosamente sin pasarla al subnivel LLC; se supone que el nivel de transporte pedirá retransmisión más tarde (si se utiliza un protocolo de transporte fiable).

Se efectuó una prueba en la que el LLC del emisor contó 75000 tramas y el del receptor contó 74991.

Se le pide que calcule:

- a) El BER (Bit Error Rate) de la conexión física entre ambos ordenadores.
 - b) Cada cuantas tramas transmitidas se producirá una trama errónea que será aceptada como válida al tener por pura casualidad un CRC correcto.
10. Se tiene una red Fast Ethernet formada por varios ordenadores conectados con tarjetas 100BASE-TX y cables de 10m de longitud a un concentrador clase II (bajo retardo).

El nivel de ocupación del medio físico medido con un analizador es del 40%, es decir el 40% del tiempo hay portadora en la red (la portadora indica que una o más estaciones están transmitiendo, si son más de una se producirá una colisión). El analizador detecta también una tasa de colisiones del 30%, es decir que el 30% de las tramas que se transmiten terminan en una colisión.

Calcule el 'goodput' de la red (es decir la tasa de información útil transferida) en Mb/s. Suponga que todas las tramas emitidas son de la longitud máxima permitida en Ethernet. Considere que la duración de una colisión es constante e igual al tiempo de ida y vuelta de la señal entre las estaciones que colisionan.

¿Podría decir de forma cualitativa como evolucionaría la tasa de colisiones y el goodput si los ordenadores se conectan con cables de 100 metros? Intente cuantificar su respuesta.

Información adicional

La tasa de colisiones se define como:

$$\text{Tasa de colisiones} = \frac{\text{Número de colisiones}}{\text{Número de tramas transmitidas correctamente} + \text{número de colisiones}}$$

Por ejemplo una tasa de colisiones del 10% significa que de cada diez intentos en nueve se ha transmitido correctamente la trama y en uno se ha producido una colisión.

11. De los tres tipos de redes que se enumeran a continuación indique cual es la más adecuada y cual la menos adecuada para establecer una videoconferencia que necesita 256 Kb/s:
- ☐ Token Ring
 - ☐ Ethernet Isócrona
 - ☐ Fast Ethernet

4.12 SOLUCIONES

S1.-

- a) **Verdadera.** El rendimiento máximo puede ser del 18% o del 37%, según se trate de ALOHA puro o ranurado, respectivamente. Los protocolos CSMA (con detección de portadora) dan rendimientos superiores en todas las circunstancias.
- b) **Falsa.** Si la carga de la red es baja (y por tanto la probabilidad de colisión también) Ethernet tiene una latencia menor, ya que la estación emite cuando lo desea, sin tener que esperar a que le llegue el token.
- c) **Falsa.** En una situación de contención la estación 'ganadora' (la que consigue transmitir) pone a cero su contador, con lo que adoptará una postura mas agresiva para los envíos sucesivos que las demás; cosa que la sitúa en posición ventajosa. Esto produce el fenómeno conocido como 'efecto captura' en el que una o unas pocas estaciones pueden llegar a saturar una red.
- d) **Falsa.** La longitud máxima viene fijada por el tamaño de trama mínimo y su velocidad.
- e) **Verdadera.** A lo sumo es posible fijar prioridades, pero no reservar capacidad como se hace en IsoEthernet o FDDI II.
- f) **Falsa.** La codificación 8B/10B envía 8 bits codificados en 10 baudios.
- g) **Falsa.** También se utilizan en FDDI, Fibre Channel, y ATM, por ejemplo.

S2.-

El IEEE asigna 22 bits (los 3 primeros bytes menos los dos primeros bits, que se utilizan para indicar si la dirección es unicast o broadcast/multicast y para indicar si es local o global). Por tanto podrá asignar como máximo $2^{22} = 4194304$ direcciones, que da un total de 5 242 880 000 dólares.

S3.-

El diámetro de una red tipo ethernet viene fijado por el valor del tiempo de ida y vuelta 2τ , el cual a su vez depende del tamaño de trama mínimo utilizado (normalmente 64 bytes). El tamaño de trama máximo no tiene ninguna influencia en el diámetro de la red.

S4.-

La trama mínima debe tardar en emitirse 40 μ s, lo cual a 10 Mb/s supone 400 bits. El tamaño de trama mínimo será pues de 50 bytes.

S5.-

La señal eléctrica se propaga con una velocidad de $0,77 * 3 * 10^8 = 2,31 * 10^8$ m/s

A 4 Mb/s un bit tarda en emitirse 0,25 μ s; en este tiempo la señal viaja:

$$2,31 * 10^8 * 0,25 * 10^{-6} = 57,75 \text{ m}$$

El token tiene en total 24 bits, por tanto:

$$57,75 * 24 = 1386 \text{ m}$$

S6.-

En el funcionamiento normal de token ring cuando una estación tiene para enviar en su buffer una trama de datos con prioridad n pueden ocurrir tres cosas:

- Que pase por ella una trama de datos, en cuyo caso anotará en el campo reserva la prioridad que desea utilizar (salvo que este campo ya tuviera anotada una prioridad igual o superior).
- Que pase por ella un token de prioridad m (m igual o menor que n), en cuyo caso toma el token y transmite inmediatamente. Después restaura un token con prioridad m . En el caso de que alguna otra estación le hubiera solicitado entretanto (en la trama de datos) una prioridad p (p mayor que m) generará un token con prioridad p , y solo cuando se agoten todas las peticiones de prioridad superiores a m generará el token con prioridad m . La estación que sube la prioridad del token es siempre la responsable de volverlo al valor con que lo recibió, para lo cual debe recordar la prioridad inicial.
- Que pase por ella un token con una prioridad mayor que n ; en este caso anotará en el campo de reserva de prioridad la prioridad n (salvo que ya hubiera reservada allí una prioridad igual o superior).

Obsérvese que el único mecanismo que permite aumentar la prioridad del token es el b), reserva en una trama de datos, ya que la reserva en una trama de token solo permite solicitar una prioridad inferior a la actual.

Por tanto, si se suprimen los bits de reserva de prioridad en las tramas de datos las estaciones no tienen forma de solicitar una mayor prioridad cuando otra esta transmitiendo; el token nunca cambiaría de prioridad y permanecería siempre con su valor inicial, que es cero. El resultado sería pues equivalente a haber suprimido totalmente el mecanismo de prioridades de token ring.

Así el campo reserva en las tramas de token resultaría inútil, ya que el único caso en que puede servir (supuesto c) anterior) desaparece al no poderse crear nunca tokens de prioridad superior a cero.

S7.-

En el caso más favorable la parte de datos de la trama 802.3 tendrá 1500 bytes, de los cuales 8 corresponden a la cabecera 802.2, por lo que en cada trama viajan 1492 bytes de información útil.

La información de control 802.3 añade 18 bytes a la trama 802.2 (6 dirección origen, 6 dirección destino, 2 longitud y 4 checksum) mas los 8 correspondientes al preámbulo y delimitador de inicio, lo cual nos da una trama a nivel físico de 1526 bytes. En el caso ideal cada trama estará separada de la siguiente por el interframe gap, de 9,6 μ s de duración. Por sencillez vamos a considerar el interframe gap como un campo adicional de 12 bytes, ya que su duración es equivalente (aunque sabemos que durante el interframe gap no se transmite señal alguna por la red). Podemos por tanto considerar que se transmiten 1492 bytes de información útil (a nivel de red) en tramas de 1538 bytes; la eficiencia será por tanto:

$$1492/1538 = 0,97009$$

Así pues, la velocidad máxima con que puede transferirse información a nivel de red es en este caso de **9,7009 Mb/s**.

En el caso de tener solo un byte de información útil a nivel de red tendremos toda la información de control de 802.2 y 802.3 (26 bytes en total) mas 37 bytes de relleno para asegurar que la trama 802.3 tiene como mínimo una longitud de 64 bytes. Estos 64 bytes unidos al preámbulo y delimitador de inicio nos dan una trama física de 72 bytes, y con el interframe gap tenemos una trama 'virtual' de 84 bytes:

$$1/84 = 0,011905$$

La velocidad máxima con que se transfiere la información en este caso es pues de **0,11905 Mb/s**

Para saber el tráfico máximo que puede circular por la red calcularemos la relación entre la trama física real y la trama mas el interframe gap. En el caso de tramas del tamaño máximo será:

$$1526/1538 = 0,99220 \rightarrow \mathbf{9,9220\ Mb/s}$$

y en el de tramas de 64 bytes:

$$72/84 = 0,85714 \rightarrow \mathbf{8,5714\ Mb/s}$$

S8.-

Supongamos una red Token Ring a 4 Mb/s (Interframe Gap 1 byte)

Con Token Holding Time = 10 ms la trama máxima es de 5000 bytes.

En 802.5 tenemos 21 bytes de información de control, que con los ocho de 802.2 nos da 29 en total. La trama puede contener pues 4971 bytes de información útil a nivel de red. La eficiencia será:

$$4971/(5000+1) = 0,99400 \rightarrow 4 * 0,99400 = 3,976\ Mb/s$$

Pero esto sería suponiendo que cada trama fuera seguida inmediatamente de otra; el protocolo token ring obliga a la estación a regenerar el token después de cada trama (pues ha consumido el token holding time); como suponemos que las demás estaciones no transmiten nada el token volverá enseguida a la estación emisora, que podrá enviar otra trama, y así sucesivamente.

Tenemos pues que en el caso óptimo se alternará una trama de datos con una de token indefinidamente. Dado que el token es una trama de 3 bytes (y su interframe gap) bastará para tenerla en cuenta añadir 4 bytes de overhead en el cálculo anterior:

$$4971/(5001+4) = 0,99321 \rightarrow 4 * 0,99321 = \mathbf{3,973\ Mb/s}$$

En el caso de tramas del tamaño mínimo tendremos tramas de 30 bytes (29 de overhead mas 1 de información útil) y un byte de interframe gap; como el token holding time nos permite enviar durante el tiempo equivalente a 5000 bytes podremos enviar 161 de estas tramas ($5000/31 = 161,2$) antes de tener que regenerar el token; la eficiencia será por tanto de:

$$161 / (161*31+4) = 0,0322 \rightarrow 4 * 0,0322 = \mathbf{0,1289\ Mb/s}$$

Para calcular el nivel de ocupación bastará tener en cuenta el interframe gap; en el primer caso cada 5003 bytes de datos hay dos 'interframe gaps':

$$5003/5005 = 0,9996 \rightarrow 4 * 0,9996 = \mathbf{3,998\ Mb/s}$$

En el segundo caso se envían grupos de 161 tramas de 30 bytes seguidas de un token, y así sucesivamente:

$$(161*30+3) / (161*31 + 4) = 4833/4995 = 0,9676 \rightarrow 4 * 0,9676 = \mathbf{3,870\ Mb/s}$$

En el caso de una red de 16 Mb/s los cálculos serían análogos, salvo por el interframe gap que sería equivalente a 5 bytes.

S9.-

- a) La trama 802.3 esta compuesta por los siguientes campos:

Dirección de destino (6 bytes)
Dirección de origen (6 bytes)
Longitud del campo datos (2 bytes)
Datos (hasta 1500 bytes)
CRC (4 bytes)

Esto nos da una longitud máxima de 1518 bytes. Los demás campos de la trama 802.3 (preámbulo, delimitador de inicio e interframe gap) no se utilizan en el cómputo del CRC, por lo que no están cubiertos por éste y en principio no deberían ser considerados en este caso; sin embargo un error en el preámbulo o el delimitador de inicio, aunque no cubiertos por el CRC, tendría la consecuencia de producir una trama errónea en la dirección de destino por lo que sería igualmente descartada; por consiguiente estos ocho bytes también han de tenerse en cuenta a efectos de este cálculo.

Como se nos dice que se han enviado 75000 y cada una tiene 1526 bytes se han enviado en total:

$$75000 * 1526 * 8 = 915\,600\,000 \text{ bits}$$

De las 75000 tramas se han recibido correctamente 74991; por tanto 9 tramas tenían al menos un bit erróneo. Vamos a suponer en principio que cada una de estas tramas tiene solo un bit erróneo (esta suposición la comprobaremos mas tarde). En tal caso el BER sería:

$$\text{BER} = 9 / 915\,600\,000 = 9,83 * 10^{-9} \approx 10^{-8}$$

Con un BER de esta magnitud la probabilidad de tener una trama con un bit erróneo es de:

$$1518 * 8 * 10^{-8} = 0,00012144$$

o sea una cada 8234 tramas ($1 / 0,00012144 = 8234$).

Ahora bien, la probabilidad de tener una trama con dos bits erróneos es aproximadamente de:

$$1518 * 8 * 10^{-8} * 10^{-8} = 1,2144 * 10^{-12}$$

o sea, una cada 823 mil millones ($1 / (1,2144 * 10^{-12}) = 823 * 10^9$). Comprobamos así que es razonable la aproximación inicialmente adoptada, de que la probabilidad de que se den dos errores en una misma trama es despreciable.

- b) La probabilidad de que el CRC de una trama sea correcto por pura casualidad es de 1 en 2^{32} , o sea $2,33 * 10^{-10}$. La probabilidad de que esto ocurra con una trama errónea será pues:

$$2,33 * 10^{-10} * 0,00012 = 2,79 * 10^{-14}$$

Por tanto se aceptará como correcta una trama errónea cada $1 / (2,79 * 10^{-14}) = 3,58 * 10^{13}$ tramas transmitidas.

S10.-

Calcularemos en primer lugar el retardo de ida y vuelta de la red:

Componente	Retardo (en μs)	Retardo (en bits)
2 Tarjetas de red 100BASE-TX	1,00	100
1 Repetidor clase II	0,92	92
20 metros de cable UTP-5	0,22	22
TOTAL	2,14 μs	214 bits

Como la tasa de colisiones es del 30% significa que en 30 de cada 100 tramas emitidas se produce una colisión; las 70 restantes transmiten con éxito la trama.

El tiempo de cada colisión lo estimamos igual al tiempo de ida y vuelta de la red, o sea 214 bits, o 2,14 μs (a 100 Mb/s). El tiempo de transmitir correctamente una trama es de 12144 bits (1518 * 8) o sea 121,44 μs . Por tanto la eficiencia relativa es de:

$$(70 * 12144) / (30 * 214 + 70 * 12144) = \mathbf{0,9925}$$

y el goodput será:

$$100 * 0,4 * 0,9925 = \mathbf{39,7 \text{ Mb/s}}$$

Por tanto la capacidad 'desperdiciada' por colisiones será de 0,3 Mb/s.

En el caso de conectar los mismos ordenadores con cables de 100m el retardo aumentara de la siguiente forma:

Componente	Retardo (en μs)	Retardo (en bits)
2 Tarjetas de red 100BASE-TX	1,00	100
1 Repetidor clase II	0,92	92
200 metros de cable UTP-5	2,22	222
TOTAL	4,14 μs	414 bits

Suponiendo que la tasa de colisiones sea ahora la misma de antes, es decir el 30%, la eficiencia sería:

$$(70 * 12144) / (30 * 414 + 70 * 12144) = 0,9856$$

y el goodput:

$$100 * 0,4 * 0,9856 = 39,4 \text{ Mb/s}$$

Sin embargo en el cálculo anterior hemos supuesto que el riesgo de colisión no variaba al aumentar la distancia entre las estaciones. Esto evidentemente no es así, ya que sabemos que al aumentar la distancia el retardo aumenta y con él el riesgo de colisión. Antes la colisión solo se podía producir durante los primeros 214 bits de la trama, mientras que ahora puede ocurrir en los primeros 414 bits. Suponiendo que la probabilidad de colisión por bit es la misma en ambos casos (cosa bastante razonable dado que tenemos el mismo nivel de ocupación) significa que en el segundo caso la probabilidad de colisión es $414/214 = 1,93$ veces la del primero. Si esa probabilidad era antes de 0,3 ahora será pues de $0,3 * 1,93 = 0,58$. Por tanto la tasa de colisión en la nueva red será del 58% aproximadamente, si los demás factores se mantienen constantes. Esto nos da pues una eficiencia de:

$$(42 * 12144) / (58 * 414 + 42 * 12144) = \mathbf{0,9550}$$

y el goodput será:

$$100 * 0,4 * 0,9550 = \mathbf{38,2 \text{ Mb/s}}$$

En este caso se pierden 1,8 Mb/s por colisiones.

Obsérvese que, con las simplificaciones que hemos aplicado, la tasa de colisiones es directamente proporcional a la distancia entre las estaciones de la red. Al aumentar ese valor aproximadamente al doble del original la tasa de colisiones prácticamente se ha duplicado. Sin embargo la capacidad 'perdida' por este efecto aumenta de forma mas acentuada, ya que se ha multiplicado por seis (ha pasado de 0,3 a 1,8 Mb/s).

S11.-

La más adecuada es Ethernet Isócrona, ya que es la única que permite reservar capacidad, con lo cual se tiene garantizada una calidad de servicio constante. En segundo lugar esta token ring, ya que nos da la posibilidad de marcar tráfico prioritario y además el protocolo MAC asegura un mínimo de recursos independientemente de la carga de la red. En último lugar esta Fast Ethernet, ya que aunque es la mas rápida de las tres no permite reservar capacidad, no establece prioridades y no garantiza una latencia máxima. La mayor capacidad de Fast Ethernet no es requerida por la aplicación que se plantea.