

Apuntes
de
Redes de Ordenadores

Tema 3
Ethernet

Uploaded by

IngTeleco

<http://ingteleco.iespana.es>
ingtelecoweb@hotmail.com

La dirección URL puede sufrir modificaciones en el futuro. Si no funciona contacta por email

3.- ETHERNET

3.1.- Historia de Ethernet

El Nacimiento

En 1970, mientras Abramson montaba ALOHANET en Hawaii, un estudiante del MIT llamado Robert Metcalfe experimentaba con la recién estrenada ARPANET y conectaba ordenadores en un laboratorio. Metcalfe conocía las experiencias de Abramson y empezó una tesis doctoral en Harvard (que terminaría en 1973), en la que desde un punto de vista teórico planteaba mejoras que se podrían introducir al protocolo ALOHA para aumentar su rendimiento. 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 antes de transmitir. Además, cada estación mientras transmitiera estaría continuamente vigilando el medio físico por si se producía alguna colisión, en cuyo caso pararía y transmitiría más tarde. Años después este protocolo MAC recibiría 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 diseñaba 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 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 inicial 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 portadora). 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 ponía en marcha el mecanismo de 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/s 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 actual XNS (Xerox Network System).

En vez de utilizar cable coaxial de 75 Ω , más habitual por ser el utilizado en 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). Las reflexiones se producen en cada empalme del cable y en cada 'pincho' vampiro (transceiver). En la práctica el número máximo de pinchos vampiro, y por tanto el número máximo de estaciones en un segmento de cable coaxial, viene 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), que fue publicado en 1976; **Error!No se encuentra el origen de la referencia.** 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.

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*.

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 entre el terminal y el 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 más 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, ya que así obtendría un mayor impulso comercial y tecnológico. Propuso a IBM formar una alianza con Xerox, pero la oferta no fue aceptada, probablemente porque IBM ya estaba trabajando en otro tipo de red local en topología de anillo (que más tarde se convertiría en la actual Token Ring), o quizá porque el funcionamiento no orientado a conexión de Ethernet no encajaba muy bien con la arquitectura SNA, jerárquica y orientada a conexión. Metcalfe hizo entonces la misma propuesta a Digital Equipment Corporation (DEC) que aceptó. A petición de Xerox Intel se incorporó también al grupo, para asegurar que los productos se pudieran integrar en chips de bajo costo.

El acuerdo de la alianza DIX (DEC-Intel-Xerox) fue satisfactorio 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 podía conseguirse 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.

En septiembre de 1980 DIX publicó las especificaciones de Ethernet Versión 1.0 conocidas como 'libro azul'. Como parte de la política aperturista Xerox aceptó licenciar su tecnología patentada a todo el que lo quisiera por una cuota reducida, consistente en el pago de 1,000 dólares por cada rango de 24 bits de 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 siguió (y sigue) cobrando actualmente 1,250 dólares por rango en concepto de tareas administrativas. 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. En 1982 se publicó Ethernet Versión 2.0, que fue la última especificación de Ethernet publicada por DIX. En estas especificaciones 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.

Una vez constituida la alianza DIX Metcalfe estimó que se produciría mucha 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 abandonó Xerox para crear su propia empresa especializada en Computadores, Comunicaciones y Compatibilidad, mas conocida como 3Com. En 1990 Metcalfe, ya multimillonario, se retiró de 3Com. Actualmente vive en Boston donde escribe artículos, da charlas y organiza eventos y debates sobre el presente y futuro de las tecnologías de la información y las comunicaciones.

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

Las relaciones con IEEE y la estandarización

A finales de los 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 construidos 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 del futuro. 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, nombre que provenía del año y mes de su constitución. Inicialmente el proyecto (o comité) 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 a su vez otra de una red con topología de anillo y paso de testigo que recibía el nombre de Token Ring. Finalmente, viendo que no sería posible satisfacer a todos con un único estándar, y considerando que el apoyo de la industria a

cada una de las tres propuestas era demasiado importante como para descartar cualquiera de ellas, el comité 802 en una polémica decisión optó en 1982 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.

Dado su polémico comienzo 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 susceptibles de modificación, por lo que si se dispone del tiempo suficiente para discutir todos los detalles seguro que algunos se decidirán 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 del campo *tipo* (que especifica el protocolo del nivel de red) por un campo *longitud*, inexistente hasta entonces. Los diseñadores originales de Ethernet consideraron este campo innecesario porque la mayoría de los protocolos a nivel de red (y ciertamente todos aquellos en los que estaban interesados) incluyen en la información de cabecera un campo indicando la longitud, y cuando esto no es así 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). 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. 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.

Xerox resolvió en parte el problema de incompatibilidad producido por la decisión del IEEE asignando a todos los protocolos códigos superiores a 1536, valor máximo del campo longitud; por ejemplo el código correspondiente a IP es 2048. Así analizando el valor de este campo podemos saber si la trama tiene formato DIX u 802.3. Los dos formatos son incompatibles entre sí, pero al menos pueden 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 parte de datos de la trama, en una cabecera LLC (Logical Link Control) 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 complejo que hace que en la mayoría de los protocolos sea necesario analizar los cuatro campos y los ocho bytes de la cabecera LLC para averiguar lo que Xerox obtenía usando solo dos bytes en la cabecera DIX. Esto complica el proceso de los paquetes y añade un overhead innecesario, sobre todo en el caso de tramas pequeñas. Por este motivo incluso hoy en día el formato DIX es el 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 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. Entonces se definió un protocolo de red específico para el control de flujo (es decir un nuevo valor del campo tipo para este protocolo), y se apreciaron considerables ventajas en 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 estandarizado 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 todos los protocolos en el formato DIX considerando válidos los dos significados, tipo y longitud, para este campo de dos bytes. La elección de cual significado es aplicable en cada caso se haría en función del valor de este campo. Dicho de otro modo el comité estandarizó lo que era ya una práctica generalizada en todas las implementaciones existentes. De alguna manera esto representa una reconciliación quince años mas tarde con DIX (y con el mundo real).

Tradicionalmente Xerox se ocupaba de la asignación de número a cada protocolo que se registraba. Desde 1997, con la inclusión del campo tipo en la trama 802.3 como parte del estándar 802.3x, el IEEE pasó a ocuparse de la labor administrativa de registrar protocolos y asignarles número. Los valores se pueden consultar en el RFC de Números Asignados vigente, actualmente el RFC1700.

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 10BASE5. En el estándar se recomienda que el cable sea de color amarillo para 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 1994, 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. 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.

El precio importa: nuevos medios físicos

Los componentes de las primeras redes Ethernet (repetidores, transceivers, tarjetas de red, etc.) eran muy caros. El cable coaxial y el cable drop (que conectaba el equipo al cable coaxial), aunque de 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 barato. 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 bus 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'). Este cable 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 10BASE-2 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 por el IEEE en 1989, y permitía unir repetidores a una distancia máxima de 1000 m. Actualmente FOIRL está en desuso, en su lugar se emplea 10BASE-FL que permite unir repetidores y equipos con una distancia máxima de 2.000 m.

Hacia 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 redes de telefonía que utilizaban 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 una decisión judicial histórica, que rompió en Estados Unidos el monopolio ostentado hasta entonces por AT&T en telefonía. 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 pudieran a partir de entonces 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. 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. Después de todo AT&T y las telefónicas de todo el mundo llevaban muchos años cableando edificios y algo debían saber del tema. Además, la red telefónica tenía una topología en estrella organizada jerárquicamente que la hacía más versátil y robusta que una de tipo bus. El diagnóstico y aislamiento de problemas era más rápido y sencillo. Esto provocó una demanda por parte de los usuarios en el sentido de aprovechar el cableado telefónico 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.

En el 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 Synoptics 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 StarLAN 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') que utilizaba cable de pares trenzados no apantallado (UTP, Unshielded Twisted Pair). Esto marcó el final de StarLAN ya que la mayoría de los usuarios que habían optado provisionalmente por StarLAN 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, DECConnect, 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.

Puentes y conmutadores

Ya en su artículo de 1976 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 Kalpana comercializó un nuevo tipo de puentes Ethernet con un número elevado de interfaces y alto rendimiento (supuestamente capaces de dar los 10 Mb/s 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.

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

Llevada al extremo la filosofía de los conmutadores LAN producía redes en las que cada puerto era dedicado a un ordenador. De esta forma cada usuario podía disfrutar de 10Mb/s y su tráfico no era visto por ningún otro ordenador salvo por aquel al que iba dirigido, con lo que se mejoraba el rendimiento y la seguridad de la red. El uso de redes conmutadas llevaba de una situación de medio compartido a una de medio dedicado donde ya no era necesario el uso del protocolo CSMA/CD. Por otro lado, los dos medios mas populares de Ethernet (10BASE-T y 10BASE-FL) ofrecen un canal físico diferente para cada sentido de la comunicación. Aprovechando estas dos circunstancias se implementó lo que se denomina Ethernet full-dúplex, que en esencia consiste en aprovechar 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 estan 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 establece como ya hemos comentado un control de flujo para su funcionamiento.

Mas rápido, por favor

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 (probablemente la persona que mas ha contribuido a mejorar el rendimiento del TCP), envió un artículo a 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, 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. Además 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 mas aun si habían de coexistir ambas redes.

En un intento por cubrir esta demanda Grand Junction 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. Se plantearon dos propuestas:

- Mantener el protocolo CSMA/CD en todos sus aspectos, pero aumentar en un factor 10 la velocidad de la red. Al mantener el tamaño de trama mínimo (64 bytes) se reducía en diez veces el tamaño máximo de la red, 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, aprobado en junio de 1995 como el suplemento a la norma ya existente, a propuesta del grupo de trabajo 802.3u. Para acelerar el proceso de estandarización se utilizaron para el nivel físico buena parte de las especificaciones ya desarrolladas por ANSI para FDDI. Los medios físicos soportados por Fast Ethernet son fibra óptica multimodo, cable UTP categoría 3 y categoría 5 y cable STP (Shielded Twisted Pair).

Los partidarios de la segunda propuesta, considerando que sus ideas podían tener cierto interés, decidieron crear otro subcomité del IEEE, el 802.12, que desarrolló la red conocida como 100VG-AnyLAN. Durante cierto tiempo hubo competencia entre ambas redes por conseguir cota 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.

La red Fast Ethernet se extendió con una rapidez incluso superior a las expectativas más optimistas. Como consecuencia de esto los precios bajaron y su uso se popularizó hasta el usuario final. Esto generaba un requerimiento de velocidades superiores en el backbone que no podían ser satisfechas por otras tecnologías (salvo quizá por ATM a 622 Mb/s, pero a unos precios astronómicos). 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 estas velocidades para redes convencionales, las previsiones de aumento en rendimiento y nivel de integración de los chips hacían prever que para 1998 sería factible construir controladores de red para esas velocidades con tecnología convencional a precios asequibles. 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 Fiber Channel a 800 Mb/s, aumentando adecuadamente las velocidades. Se pretendía poder utilizar los mismos medios físicos que en Fiber 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 segregarse 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 suplemento 802.3ab se aprobó en 1999 y constituye ya una realidad comercial constituyendo el medio habitual de conexión de alta capacidad dentro de entornos LAN. Simultáneamente se constituyeron la Gigabit Ethernet Alliance y el Gigabit Ethernet Forum con el objetivo de ayudar a la elaboración del estándar, proporcionar recursos para establecer y demostrar la interoperabilidad entre productos y favorecer el desarrollo e implantación de la tecnología Gigabit Ethernet.

Casi paralelamente, fue creado otro grupo de trabajo, el 802.3 ad que se encargó del desarrollo de las especificaciones para la agregación de múltiples enlaces sobre un mismo medio de transmisión. El origen de estos trabajos hay que buscarlos en el desarrollo de técnicas de multiplexación sobre fibra óptica que permitían alcanzar velocidades muy superiores al Gbps y a la presión de los fabricantes de desarrollar un estándar para la agrupación del tráfico de varios segmentos sobre un mismo enlace.

En el año 2000 se publicó una nueva versión del estándar 802.3, 2000 edition que hace obsoleta todas las anteriores y que ya incluye las especificaciones 802.3 ab, 802.3 ac y 802.3 ad.

El último esfuerzo de estandarización del grupo 802.3 se está llevando a cabo para establecer un estándar para 10 Gbps Ethernet, apoyados por la Gigabit Ethernet Alliance. El grupo de estudio fue creado en marzo de 1999, y en marzo de 2000 se creó el grupo de trabajo 802.3 ae 10 Gigabit Ethernet estando prevista la finalización de sus trabajos en la primavera de 2002.

CRONOLOGÍA DE ETHERNET

1970	<ul style="list-style-type: none"> • Primeras experiencias de redes broadcast en Hawaii: ALOHANET. Protocolos MAC ALOHA puro y ranurado.
22/5/1973	<ul style="list-style-type: none"> • 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.
Mayo 1975	<ul style="list-style-type: none"> • Metcalfe y Boggs escriben un artículo describiendo Ethernet, y lo envían para su publicación a <i>Communications of the ACM</i>.
1976	<ul style="list-style-type: none"> • Xerox crea SSD, una división para el desarrollo de los ordenadores personales y la red X-wire (nuevo nombre de Etherent).
1979	<ul style="list-style-type: none"> • 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. • Metcalfe abandona Xerox y crea 3Com.
Febrero 1980	<ul style="list-style-type: none"> • El IEEE crea el proyecto 802.
Abril 1980	<ul style="list-style-type: none"> • DIX anuncia al IEEE 802 que está desarrollando una tecnología de red local que pretende estandarizar.
Septiembre 1980	<ul style="list-style-type: none"> • DIX publica Ethernet (libro azul) versión 1.0. Velocidad 10 Mb/s.
1981	<ul style="list-style-type: none"> • 3Com fabrica las primeras tarjetas Ethernet para PC (10BASE5).
1982	<ul style="list-style-type: none"> • DIX publica Ethernet (libro azul) versión 2.0. • 3Com produce las primeras tarjetas 10BASE2 para PC.
24/6/1983	<ul style="list-style-type: none"> • IEEE aprueba el estándar 802.3, que coincide casi completamente con DIX Ethernet. El único medio físico soportado es 10BASE5.
1/1/1984	<ul style="list-style-type: none"> • 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	<ul style="list-style-type: none"> • DEC comercializa los primeros puentes transparentes
21/12/1984	<ul style="list-style-type: none"> • ANSI aprueba el estándar IEEE 802.3.
1985	<ul style="list-style-type: none"> • Se publica el estándar IEEE 802.3 • ISO/IEC aprueba el estándar 8802-3, versión adaptada del IEEE 802.3. • IEEE añade al estándar el cable 10BASE2. • Primeros productos 10BASE-T de Synoptics.
1987	<ul style="list-style-type: none"> • IEEE estandariza StarLAN (1BASE5, Ethernet a 1 Mb/s con cable UTP). • Comienza la estandarización de los puentes transparentes
1989	<ul style="list-style-type: none"> • IEEE estandariza FOIRL (Fiber Optic Inter-Repeater Link)
1990	<ul style="list-style-type: none"> • IEEE estandariza 10BASE-T. • Primeros conmutadores Ethernet de Kalpana • Se aprueba el estándar 802.1d (puentes transparentes)
1992	<ul style="list-style-type: none"> • Primeros productos Fast Ethernet, fabricados por Grand Junction • IEEE crea el grupo de estudio para redes de alta velocidad (100 Mb/s)
1993	<ul style="list-style-type: none"> • Primeros conmutadores Full Dúplex
Junio 1995	<ul style="list-style-type: none"> • Se estandariza Fast Ethernet (100BASE-FX, 100BASE-TX y 100 BASE-T4)
Octubre 1995	<ul style="list-style-type: none"> • IEEE crea el grupo de estudio para redes de 1 Gb/s
Julio 1996	<ul style="list-style-type: none"> • Se aprueba el grupo de trabajo 802.3z para la estandarización de Gigabit Ethernet
Marzo 1997	<ul style="list-style-type: none"> • 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	<ul style="list-style-type: none"> • Se aprueba el estándar Ethernet full-dúplex (802.3x), incluyendo en el estándar el formato de trama DIX. • Se publican los drafts 802.1p y 802.1Q (VLANs y prioridades) • Primeros productos comerciales Gigabit Ethernet
29/6/1998	<ul style="list-style-type: none"> • Se estandariza Gigabit Ethernet (802.3z) que comprende los medios físicos 1000BASE-SX, 1000BASE-LX y 1000BASE-CX.
Marzo 1999	<ul style="list-style-type: none"> • Se estandariza 1000BASE-TX (Gigabit Ethernet sobre cable UTP-5).
Marzo 1999	<ul style="list-style-type: none"> • Se crea un grupo de estudio para redes de 10 Gbps
Marzo 2000	<ul style="list-style-type: none"> • Se crea el grupo de trabajo 802.3ae para estandarizar 10 Gigabit Ethernet.

Tabla 3.1

3.2.- El medio físico

3.2.1.- Cable coaxial y conectores

La especificación original de Ethernet y de IEEE 802.3 contemplaba la utilización de cable coaxial como único medio de transmisión. Sin embargo, en los últimos años este tipo de medio físico ha sido completamente desplazado por el par trenzado y la fibra óptica quedando restringido, a instalaciones antiguas, cada vez más raras y poco frecuentes.

El estándar original Ethernet definía el uso de un cable coaxial conocido como cable Ethernet grueso, 10 Base 5 o amarillo (esto último por motivos obvios). Este cable se utilizó exclusivamente en este tipo de redes y más específicamente para la creación de segmentos troncales, debido a su grosor (1 cm de diámetro o más) y su limitada flexibilidad hacía su instalación muy complicada.

La topología de la red era la de bus, estando constituido por un segmento de cable coaxial al que se unían las estaciones mediante transceptores. La longitud máxima de un segmento de cable coaxial permitida por el estándar era de 500 metros y los transceptores se conectaban al cable coaxial espaciados en al menos 2,5 metros (para lo cual el cable disponía de marcas uniformemente espaciadas en esta distancia), hasta un máximo de 100 por segmento. Debido al apantallamiento este cable coaxial era muy resistente a las interferencias eléctricas de fuentes externas.

Los transceptores, dispositivos que se encargaban de las funciones de Control de Acceso al medio y de la codificación/decodificación y transmisión/recepción de la señal desde y hacia el medio físico. Generalmente un transceptor se conectaba a una única estación mediante un cable AUI, pero existieron versiones de transceptores que podían controlar la transmisión de hasta 8 o 16 estaciones.

En este tipo de cable, cada transceptor puede ser conectado sin romper su continuidad o bien cortando y reconectándolo.

En las terminaciones del cable y para la conexión de los transceptores a los cables coaxiales gruesos en el punto de corte se utilizan conectores de tipo N. Cuando se utilizan estos conectores para conectar un transceptor, el cable se corta en una de las marcas, colocando dos conectores machos de tipo N en los extremos del cable cortado, que se atornillan en los correspondientes conectores hembra del transceptor, que se encarga de reconectar eléctricamente el cable, además de extraer la señal del mismo hacia a estación. Los cables coaxiales precisan de una terminación que evite la reflexión de la señal eléctrica al llegar al extremo del cable; para ello, se instala en el extremo un conector de tipo N al que se rosca un terminador con una impedancia de 50 Ω .

La inserción de un transceptor también puede hacerse mediante una técnica no intrusiva utilizando transceptores conocidos como "vampiros". En estos, una punta metálica recubierta de material aislante penetra en el cable atravesando el aislante y el apantallamiento para entrar en contacto con el conductor central del cable coaxial, y permitiendo, de este modo, que la señal circule hacia y desde el conductor a la estación sin interrumpir la continuidad del cable. Esto presenta la ventaja de alterar mínimamente las características del cable al insertar un nuevo transceptor y, sobre todo, que se pueden instalar nuevos transceptores sin tener que interrumpir la operación de la red.

En ambos casos, el transceptor se conecta al dispositivo Ethernet mediante un cable denominado AUI (Attachmente Unit Interface) que es un cable multipar (4 pares) completamente apantallado y terminado en un conector AUI (Conector DB15). La distancia máxima definida en el estándar para el cable AUI es de 50 metros

Con posterioridad al esquema anterior, se reconoció la utilización de otro cable coaxial más sencillo, el cable Ethernet fino, "cheapernet", RG-58 A/U o 10 Base 2. Este tipo de cable tiene menor apantallamiento y como consecuencia un peor comportamiento eléctrico; por ello la longitud máxima definida para un segmento era de sólo 185 metros. Por el contrario resultaba mucho más barato y sencillo de instalación. Con este tipo de cable era posible conectar hasta 30 transceptores sobre el mismo segmento, con una separación de al menos 0,5 metros.

El cable coaxial fino sólo permite conexiones intrusivas, siendo preciso en cualquier caso la ruptura del cable para la instalación de una nueva estación. Los conectores empleados con este tipo de cable son los BNC (Building Network Coax), que se utilizan tanto en los extremos del segmento de cable para conectar un terminador de 50Ω que evite la reflexión de la señal como para la conexión de las estaciones al cable. En este caso, la inserción de nuevas estaciones (a diferencia del caso anterior las funciones de control de acceso al medio y de transmisión/recepción están implementadas en el propio interfaz de red y no precisan de un transceptor externo) se realiza mediante el corte del cable coaxial, la conectorización con conectores machos BNC en ambos extremos que se unen a los extremos hembra de un conector en T. Este conector cumple las funciones de restaurar eléctricamente la continuidad del cable coaxial y la extracción/inserción de la señal hacia/desde la estación. En este caso, el tercer extremo del conector en T se une directamente al interfaz del dispositivo Ethernet. A diferencia del cable coaxial grueso, el cable fino debe llegar a cada una de las estaciones, lo que resulta posible dado que por su menor grosor resulta mucho más sencillo de instalar.

3.2.1.- Par trenzado

Actualmente casi todo el cable de cobre utilizado en redes Ethernet es el de pares trenzados sin apantallar (UTP); más raramente se emplea cable de pares trenzados apantallados (ScTP o SSTP). Esto se debe en parte a la mejora de las virtudes del cable UTP, que ha alcanzado rendimientos que antes sólo eran alcanzables sobre medios apantallados y sobre todo a su bajo costo que permite un cableado integrado de voz y datos.

Como ya hemos visto en el tema 2 las normativas de cableado estructurado clasifican los diferentes tipos de cable de pares trenzados en categorías de acuerdo con sus características. Las categorías superiores están diseñados para trabajar con un rango de frecuencias mayores, lo que supone una mayor capacidad para transmitir datos.

Cuando se publicó la primera normativa de cableado estructurado en julio de 1991 (la ANSI/EIA/TIA 568) solo se especificaba la categoría 3, si bien un mes más tarde se publicaba la especificación de las categorías 4 y 5. La utilización de estos pares en redes Ethernet a 100 Mbps y ATM a 155 Mbps hizo que el margen de seguridad de las instalaciones se redujera sustancialmente.

Como es lógico estos problemas crecieron con la aparición de Gigabit Ethernet, para el cual las especificaciones de la categoría 5 no resultaban suficientemente precisas para asegurar el funcionamiento de 1000BASE-TX. Por esto a petición del IEEE se inició un proceso para añadir parámetros adicionales al proceso de certificación de cables categoría 5. Estos parámetros, fueron incluidos en la normativa TIA/EIA 568-A en lo que se denomina categoría 5e ("e" de "Enhanced", mejorada). En ISO/IEC 11801 se realizaron las mismas modificaciones, pero en vez de definir una categoría nueva se añadió 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 sigue siendo 100 MHz.

Con estas adiciones a la norma se tiene 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 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.

Las últimas versiones de los estándares ANSI/EIA/TIA 568-B y ISO 1181 recogen respectivamente los requisitos de la categoría 6 de cableado y las clases E y F (que corresponderá a la categoría 7 de la TIA todavía pendiente de publicación). Son numerosos los fabricantes que ya disponían de cableado con características similares a las de la categoría 6 incluso antes de publicarse el estándar correspondiente. 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 los requisitos de la categoría 6, sin embargo, todavía está muy extendida la utilización del cableado de categoría 5e, siendo el nuevo estándar 10 Gigabit Ethernet quien probablemente dará un empujón a la utilización del cableado de categoría 6.

El cable normal UTP está formado por una funda de PVC que envuelve 4 pares. Los estándares 10BASE-T y 100BASE-TX utilizan dos de estos pares (transmiten por el par 3 y reciben por el par 2). El conector utilizado es el RJ45, generalmente de plástico transparente y con 8 contactos directamente conectados a cada uno de los hilos del UTP.

El cableado en grandes instalaciones requiere la instalación de múltiples cables paralelos entre dos puntos, situación en la que para ahorrar costes se recurre a cable de 25 pares, una versión más gruesa de UTP. Este tipo de cable permite realizar hasta 12 conexiones entre estaciones Ethernet. En este caso el tipo de conector utilizado es el RJ21 (Telco), un conector de tipo D y 50 contactos.

La tabla siguiente resume los medios de cobre más usados 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 A/U (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*
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-TX	UTP cat. 5e	4	Sí	RJ-45	100 m

Tabla 3.2

3.2.3.- 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 misma empleada en FDDI; la mayor velocidad requiere menor atenuación, lo cual se consigue cambiando de ventana para mantener el alcance máximo en 2Km; a cambio la optoelectrónica es bastante más cara (por este motivo la relación 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 (400-760nm). 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 50/125. Sin embargo el uso de fibra 50/125 provoca una pérdida de señal que puede llegar a ser de 5 ó 6 dB debido al desacoplamiento (o diferente apertura numérica) entre el transceiver y la fibra. La pérdida de una unión 62,5 - 50 es de $10\log_{10}(62,5/50)^2 = 1,9$ dB, a lo que habría que añadir la pérdida de 0,3-0,5 dB de una conexión normal; un acoplamiento multimodo - monomodo provocaría una pérdida de $10\log_{10}(62,5/10)^2 = 16$ dB, lo que haría que el enlace no funcionara en la mayoría de los casos. 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. Aún 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.

El uso de LEDs en redes locales reduce costos, pero limita la velocidad máxima a unos 400-600 Mb/s (actualmente el límite se encuentra en los 622 Mb/s de un ATM OC-12). Por encima de esta velocidad es preciso utilizar un emisor láser, que permite enviar pulsos más cortos, cualquiera que sea la distancia a cubrir. Pero tradicionalmente los emisores láser se han utilizado solo con fibras monomodo, que no suelen estar disponibles en el cableado de edificios. Este problema se planteó por primera vez en la red local Fibre Channel que transmite a 800 Mb/s; la solución adoptada fue acoplar un emisor láser de primera ventana a fibra multimodo 50/125 para distancias muy cortas; para distancias mayores Fibre Channel utiliza fibra monomodo en segunda ventana.

En Gigabit Ethernet se decidió ampliar el 'truco' de Fibre Channel a fibras de 62,5/125 (mucho más extendida en las instalaciones) y emplearlo en distancias tan grandes como fuera posible. Las primeras experiencias a este respecto pusieron de manifiesto un fenómeno hasta entonces desconocido denominado 'retardo del modo diferencial' que tenía el efecto de ensanchar el pulso luminoso de forma proporcional a la distancia recorrida; esto reducía la distancia máxima permisible a valores menores de los esperados (ya que a partir de una cierta distancia un pulso se solapaba con el siguiente). La solución de este problema retrasó unos meses la aprobación del estándar, respecto a lo inicialmente previsto. Finalmente se resolvió y se aprobaron dos sistemas denominados 1000BASE-SX (S de 'Short wavelength', o sea primera ventana) y 1000BASE-LX (L de 'Long wavelength', segunda ventana). El SX funciona en fibra multimodo únicamente (50/125 ó 62,5/125), mientras que el LX puede utilizar multimodo (ambos tipos) o monomodo.

Los emisores láser de primera ventana emplean una técnica denominada VCSEL (Vertical Cavity Surface Emitting Laser) muy similar a la de los lectores de CDs, 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 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 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 han prosperado, por lo que los interesados, siguiendo una actitud claramente pragmática, han creado un grupo de trabajo en el seno de la TIA para elaborar este estándar denominado 100BASE-SX. Es de esperar que una vez aprobado por la TIA el estándar sea adoptado por el IEEE. Actualmente ya existen en el mercado productos 100BASE-SX, y su costo es ya aproximadamente la mitad que el de los 100BASE-FX. El alcance propuesto es de unos 500m y viene limitado por la atenuación. La principal finalidad del 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 3.3 resume las principales características de todos los medios de fibra óptica actualmente utilizados en Ethernet, y sus alcances.

Es importante mencionar que la práctica, utilizada frecuentemente en 10BASE-FX, 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 ya que tiene toda su potencia concentrada en una banda de solo 0,5nm alrededor de los 850nm.

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

Tabla 3.3 Estándares de FO utilizados en Ethernet

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 más 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 e inversamente proporcional 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.

Tres factores principales influyen en el ancho de banda de una fibra:

- 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 la fibra de 62,5/125 tiene menor ancho de banda que la de 50/125, y el retardo en modo diferencial 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 más situaciones, no teniendo que recurrir a los de segunda ventana (1000BASE-LX) más caros. A título de ejemplo mostramos en la tabla siguiente 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 (mm)	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 3.4

Las distancias entre paréntesis corresponden a las máximas permitidas con Gigabit Ethernet. Aunque hay una correlación entre el ancho de banda y la distancia máxima la proporción no es lineal, por lo que resultaría muy arriesgado extrapolar para valores no recogidos en el estándar. Además habría que cuidar de no superar el valor máximo de la atenuación, que ha sido fijado con criterios muy severos. En cualquier caso siempre que se realice una conexión Gigabit Ethernet, además de comprobar que se establece el enlace se debería hacer un seguimiento de la tasa de errores, al menos al principio, para comprobar que funciona correctamente.

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 estudiar 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 generalmente tiene un ancho de banda mayor en primera ventana, o incluso fibra monomodo que nos permitirá grandes distancias en segunda ventana. 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 el funcionamiento en entornos mixtos donde haya también Ethernet o Fast Ethernet.

3.2.4.- Fiabilidad

El estándar 802.3 establecía inicialmente una tasa de error máxima o BER (Bit Error Rate) 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 tasa de errores no superior a 4×10^{-11} , y Fibre Channel (en que se basa 1000BASE-X) una tasa no superior a 10^{-12} ; para 1000BASE-TX se exige una tasa de 10^{-10} . Una buena instalación de red Ethernet actual en un entorno de oficina puede dar sin problemas una tasa de 10^{-12} . Esto representa menos de un error por día en una red Ethernet de 10 Mb/s completamente saturada, por lo que los errores de CRC en una red Ethernet (y en cualquier red local excepto las inalámbricas) deberían ser virtualmente inexistentes.

Debido a la elevada fiabilidad 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 en el caso de que se produzcan errores el rendimiento decae de forma espectacular. Es importante por tanto hacer un seguimiento regular de la tasa de errores de la red para detectar lo antes posible cualquier anomalía que pueda producirse.

3.2.5.- Dispositivos Ethernet

En este apartado vamos a mencionar y describir someramente los dispositivos que pueden aparecer en una red Ethernet.

Estaciones Ethernet. Son nodos direccionables capaces de transmitir, recibir y repetir información, como por ejemplo estaciones de trabajo, servidores e impresoras.

Transceptores Ethernet. Son dispositivos que conectan las estaciones al cableado de la red. Es responsable de implementar el esquema de control de acceso al medio (escuchar el cable para averiguar si está libre, detectar las colisiones y notificarlas a la estación a través del cable AUI).

Repetidor Ethernet. Es un dispositivo que permite unir dos segmentos entre sí, retransmitiendo hacia el otro segmento lo que recibe por uno de ellos, regenerando a la vez el preámbulo y amplificando y resincronizando la señal recibida. Los repetidores pueden tener dos o más puertos (repetidor multipuerto). Un repetidor que detecte una colisión es responsable de asegurar que la señal de la colisión se transmita a todos los segmentos conectados a él.

Puentes Ethernet. Son dispositivos que permiten extender la red más allá de las limitaciones de 802.3 estableciendo dominios de colisión separados. A diferencia del repetidor que envía las tramas que recibe a todos los segmentos conectados a él, un puente reenvía las tramas en función de su dirección de destino sólo a los segmentos oportunos.

Routers. Son dispositivos que operan al nivel de red, que deciden si reenviar o no un paquete a partir de la dirección de red de destino del mismo y la información de encaminamiento de la que dispone.

3.3.- Codificación

En Ethernet, como en todas las redes locales, la transmisión se realiza de manera asíncrona, es decir, sin la existencia de un reloj maestro. 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 (concretamente +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-alto. Según cual sea la secuencia de bits a transmitir habrá o no otra transición además entre los bits; ésta carece de importancia a la hora de interpretar la información transmitida pero es la que permite mantener sincronizados los equipos. El código Manchester tiene el inconveniente de que su aprovechamiento frecuencial es muy pobre, duplicando la frecuencia de funcionamiento, el emisor debe poder generar doble número de pulsos de lo que haría falta con un código binario simple como por ejemplo NRZ (Non Return to Zero). Dicho de otro modo, en Manchester se transmiten 20 Mbaudios 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...).

El código Manchester es poco eficiente, tiene un overhead del 100% (el número de baudios es doble que el número de bits por segundo), pero resulta sencillo y por tanto barato de implementar. Su mayor inconveniente estriba en la elevada frecuencia de la señal, que requiere un cable de mejores prestaciones. Pero esto no preocupaba a los diseñadores originales de Ethernet que utilizaban cable coaxial, que transmite frecuencias elevadas sin problemas. 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 implemente. Esto se debe a que en Ethernet a 10 Mb/s la codificación se realiza en el controlador y no el transceptor. Dicho de otro modo, el código Manchester ya está presente en el conector AUI, por lo que se ha de emplear independientemente del medio físico utilizado. En cambio a 100 Mb/s y 1000 Mb/s la codificación se realiza en el transceptor, por lo que para cada medio físico puede elegirse el código que mas convenga: los diseñadores de Fast y Gigabit Ethernet ya habían aprendido los errores cometidos por sus predecesores.

En Fast Ethernet el uso de código Manchester habría requerido transmitir 200 Mbaudios, lo cual no habría permitido llegar con cable categoría 5 a la distancia de 100m. Por ello se eligieron códigos más ricos, con menos overhead, que permitían reducir la frecuencia de la señal, y en consecuencia el requerimiento en cuanto al cable utilizado. Se dice que un código es mas 'rico' cuando el cociente (*bits por segundo*)/*baudios* es mayor. Por ejemplo Manchester tiene un cociente 0,5 (100% de overhead), mientras que el código 4B/5B (4 bits/5 baudios) tiene un cociente 0,8 (25% de overhead).

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 sincronismo, 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).

El medio 100BASE-T4 (que utiliza cable categoría 3) es un caso bastante más complejo. Para bajar la frecuencia se reparte el tráfico entre varios pares. El protocolo CSMA/CD, para poder notificar la presencia de colisiones, requiere que en todo momento exista un par disponible para la transmisión en cada sentido; por tanto los pares 1 y 2 se reservan de forma permanente para la comunicación en sentido de ida y de vuelta. Los pares 3 y 4 se utilizan en uno u otro sentido según lo requiera la transmisión en curso (pero no en ambos de forma simultánea). De esta forma se dispone siempre de tres pares, cada uno de los cuales ha de transmitir por tanto 33,33 Mb/s. Para reducir aún más la frecuencia de señalización se utiliza un sistema de codificación ternario: en cada baudio se envían tres símbolos ternarios (uno por cada par de cables) que dan un total de $3^3 = 27$ posibles estados, pudiendo así enviar 4 bits ($2^4 = 16$ estados) con 11 estados sobrantes, lo cual da alguna redundancia para sincronismo y detección de errores; enviando 4 bits en cada terna de símbolos se obtienen los 100 Mb/s utilizando una frecuencia de tan sólo 25 Mbaudios (12,5 MHz de frecuencia fundamental). En la práctica la codificación convierte grupos de 8 bits en conjuntos de 6 símbolos ternarios, por lo que se la conoce como 8B6T (8 bits/6 trits, un trit = señal que puede tener tres valores, o sea tres voltajes). La mayor complejidad de 100BASE-T4 se refleja en el mayor costo de las tarjetas de red.

La más reciente incorporación a la lista de medios físicos de Fast Ethernet es el denominado 100BASE-T2, consistente en dar una comunicación full dúplex utilizando únicamente dos pares de cable categoría 3. Para esto ha sido preciso aplicar dos técnicas muy novedosas. En primer lugar, se emplea una codificación quinario denominada PAM 5x5 emplea 5 posibles voltajes. 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. Esto permite elegir los 16 valores más adecuados y descartar los 9 menos interesantes (por ejemplo los que no provocan transiciones), con lo que se tiene cierta capacidad de sincronismo y detección de errores. De esta forma enviando 25 Mbaudios por dos pares simultáneamente se transmiten los 100 Mb/s. Para que el receptor pueda distinguir entre cinco posibles niveles es preciso tener una relación señal/ruido más alta de lo habitual. En segundo lugar, para evitar utilizar dos pares en cada sentido de la transmisión y permitir el funcionamiento en modo full-dúplex se emplea lo que se conoce como transmisión dual-duplex, consistente en transmitir y recibir datos *simultáneamente* en ambas direcciones por cada par; esto requiere el uso de circuitos híbridos que filtran la señal de transmisión en el receptor. La electrónica utilizada en 100base-T2 es bastante más cara que la utilizada en los otros medios físicos de Fast Ethernet.

Según el teorema de Nyquist el ancho de banda mínimo necesario para transmitir n baudios es $n/2$ Hertzios. En las señales digitales esa frecuencia mínima (llamada frecuencia de Nyquist) es la frecuencia fundamental máxima de la señal. Por ejemplo, con un código binario simple (1 bit = 1 baudio) podríamos enviar 10 Mb/s utilizando una frecuencia fundamental máxima de 5 MHz. Ahora bien, para recibir con fiabilidad suficiente la señal digital hay que transmitir no solo la frecuencia fundamental sino también componentes de frecuencia superior. Para conseguir tasas de error de 10^{-10} , que son las habituales en redes locales sobre cable de cobre, es necesario transmitir un rango de frecuencias aproximadamente doble que la frecuencia de Nyquist. Esto significa que en la práctica el medio de transmisión debe permitir enviar señales hasta una frecuencia igual al número de baudios a transmitir. Por tanto el medio 100BASE-TX requiere enviar señales hasta un 25% superiores al valor máximo permitido en cable categoría 5. Esto supone utilizarlo en frecuencias para las cuales no ha sido certificado, con lo que sus prestaciones son desconocidas. Normalmente esto no supone un problema con 100BASE-TX porque el límite se supera en un pequeño margen, pero por ejemplo en el caso de ATM a 155,52 Mb/s sobre cable categoría 5 que utiliza código NRZ la frecuencia a transmitir llega a ser de 155,52 MHz; está demostrado que en determinadas circunstancias un cable categoría 5 puede no ser capaz de dar la tasa de errores exigida por los estándares.

En el caso de Gigabit Ethernet en los medios 1000BASE-SX, 1000BASE-LX y 1000BASE-CX (genéricamente 1000BASE-X) se emplea el código 8B/10B (8 bits en 10 baudios) que ya se utilizaba en Fibre Channel. Este código tiene un overhead del 25%, igual que 4B/5B, pero al agrupar más 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 era válida una de cada dos ($2^5/2^4 = 32/16 = 1/2$). A cambio se pierde más información en caso de error, ya que se manejan bloques de 8 bits en vez de 4. La señalización se realiza a 1250 Mbaudios.

Para conseguir enviar Gigabit Ethernet por cable UTP categoría 5 (1000BASE-TX) se han adoptado tres medidas tecnológicamente muy avanzadas, que ya se emplearon en 100BASE-T2:

- Se utiliza PAM 5x5, un código muy rico que ya se empleaba en 100BASE-T2.
- Se reparte la señal en cuatro pares (la mayoría del cableado UTP que se instala tiene cuatro pares). Cada par envía 250 Mb/s y 125 Mbaudios.
- Se usa cada par simultáneamente en ambos sentidos, como también se hacía ya en 100BASE-T2, haciendo uso de circuitos híbridos similares a los de las redes telefónicas.

Con todo esto se pretende enviar 1 Gb/s full-dúplex sobre cable UTP categoría 5 con una frecuencia de 125 Mbaudios, la misma que emplea 100BASE-TX. Se prefirió utilizar códigos más ricos y mantener la frecuencia de señalización en un valor similar al de Fast Ethernet para evitar problemas como el antes mencionado de ATM a 155 Mb/s. Al tener la misma frecuencia de señalización que Fast Ethernet se puede aprovechar circuitería común para la sincronización de la señal y para la supresión de interferencia electromagnética.

Resumiendo, el caudal máximo de datos que puede transmitirse por un cable viene determinado por tres factores:

- El ancho de banda del cable (en MHz*Km). En el caso de cable de cobre UTP la longitud máxima es siempre de 100m, por lo que el ancho de banda viene fijado por la frecuencia, es decir la categoría del cable. Por ejemplo el cable categoría 5 (100 MHz) tiene un ancho de banda de 10 MHz*Km.
- El esquema de codificación utilizado.
- El número de pares empleados.

Ajustando adecuadamente estos tres parámetros es posible en teoría conseguir cualquier caudal de datos por un cable UTP. Por ejemplo, sería en principio posible transmitir 1 Gb/s por un solo par categoría 5 (o incluso categoría 3) si se utilizara un código suficientemente rico. Lógicamente el uso de códigos más ricos y con más posibles estados requiere una relación señal/ruido mayor, lo cual a su vez supone más silicio en el transceiver y un mayor costo de los equipos.

A título de ejemplo mostramos a continuación 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-TX	1000	PAM 5x5	4	125	5
ATM	155,52	NRZ	1	155,52	5
1000BASE-X	1000	8B/10B	1	1250	-

Tabla 3.5 Esquemas de codificación en LAN

3.4.- Topología

El correcto funcionamiento de CSMA/CD requiere que el tiempo de ida y vuelta entre dos estaciones cualesquiera de la red no supere el tiempo que tarda en emitirse la trama mínima permitida. Este tiempo, que depende de la velocidad de la red, 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 siguiente:

Velocidad (Mb/s)	Tamaño de trama mínimo (bits)	Tiempo de ida y vuelta (ms)	Distancia máxima (m)
10	512	51,2	4000
100	512	5,12	412
1000	4096	4,096	330

Tabla 3.6

Las distancias indicadas en la tabla son el caso óptimo; en la práctica la distancia depende de múltiples factores, como el número de repetidores intermedios o el tipo de cable utilizado. La comprobación última de que una determinada topología de red es válida sería medir o calcular el tiempo de ida y vuelta entre cada posible par de estaciones de la red para comprobar que es inferior al que aparece en la tabla.

El estándar IEEE 802.3 establece dos formas de verificar que una determinada topología Ethernet es válida. La primera, denominada Modelo 1, corresponde a un conjunto de reglas 'enlatadas' sobre la distancia máxima y el número máximo de repetidores que puede haber entre dos estaciones. Cumpliendo esas reglas el usuario se asegura de que su red no excede los valores máximos en el tiempo de ida y vuelta. Ahora bien, el Modelo 1 adopta una actitud conservadora y presupone las longitudes máximas en el enlace del usuario final. Si éste no está utilizando la longitud máxima es posible aumentar la distancia en los enlaces intermedios. En este caso hay que verificar la topología siguiendo el Modelo 2, que consiste en realizar cálculos detallados del retardo para cada componente y para cada tramo de cable en cada trayecto. Una topología en principio inaceptable según el Modelo 1 puede resultar válida aplicando las reglas del Modelo 2.

3.4.1.- Configuración de una Ethernet a 10 Mbps

El primer modelo de configuración recogido en el estándar 802.3 corresponde a una serie de reglas de configuración multisegmento para una red compuesta por varios segmentos Ethernet a 10 Mbps.

- Se requieren repetidores para todas las conexiones entre segmentos.
- Las MAU que son parte de los repetidores deben ser tenidas en cuenta a la hora de calcular el número máximo de MAUs en un segmento.
- El camino de transmisión entre dos DTEs puede constar de 5 segmentos, cuatro repetidores, dos MAUs y dos AUIs.
- Los cables AUI para 10Base-FP y 10Base-FL no excederán de los 25 metros.
- Cuando un camino de transmisión consta de cuatro repetidores y cinco segmentos, hasta tres de estos pueden ser mixtos y los restantes deben ser segmentos de enlaces entre repetidores. Cuando existen cinco segmentos, cada segmento de enlace de fibra óptica (FOIRL, 10Base-FB o 10Base-FL) no debe exceder de 500 metros y cada segmento 10Base-FP no debe exceder de los 300 metros.
- Cuando un camino consta de tres repetidores y cuatro segmentos se aplican las siguientes restricciones:
 - La longitud máxima permitida para segmentos de fibra entre repetidores (FOIRL, 10Base-FB o 10Base-FL) no debe exceder de 100 metros y los segmentos y cada segmento 10Base-FP no debe exceder de los 700 metros.
 - La longitud máxima para cualquier segmento de fibra entre repetidor y DT no excederá de 400 metros para 10Base-FL, de 300 metros para 10Base-FP y de 400 metros para 10Base-FL.
 - No existe ninguna restricción al número de segmentos mixtos en este caso.

El segundo modelo proporciona una serie de elementos para la realización de cálculos que validen sistemas Ethernet complejos. Este modelo se basa en calcular el retraso en la ida y vuelta de la señal a partir de los retrasos que cada componente de un sistema Ethernet introduce (valores que aparecen detallados en el estándar).

El primer paso es identificar el peor camino posible (el de mayor retraso), que será el de segmentos más largos y con más repetidores entre dos estaciones. En caso de que no resulte evidente cuál es el peor de los caminos será preciso identificar todos los candidatos para aplicar los cálculos sobre todos ellos.

Una vez identificado el peor camino, debe modelizarse el peor camino utilizando el modelo propuesto en el estándar, que incluye un segmento en los extremos derecho e izquierdo y tantos segmentos intermedios como sea preciso.

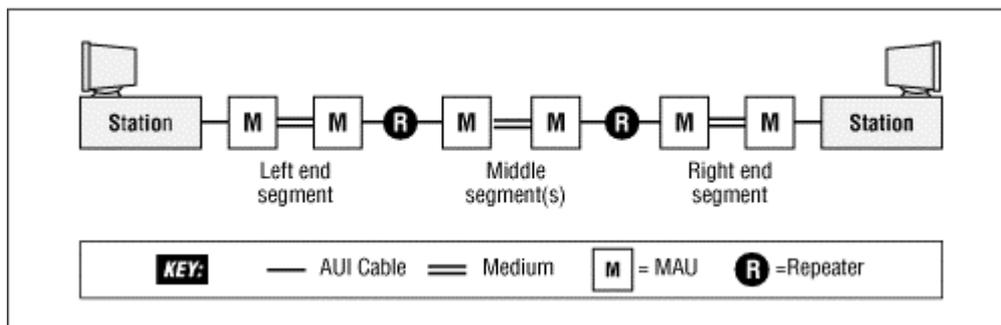


Figura 3.1 Modelo de red para el cálculo del round trip timing

El siguiente paso es calcular el retraso total de la señal en el camino, o tiempo de ida y vuelta, sumando los retrasos introducidos por cada segmento.

La Tabla 3.7 recoge los retrasos (medidos en bits) introducidos por cada tipo de cable usado en Ethernet.

Tipo de Segmento	Longitud Máxima (metros)	Extremo izquierdo		Segmento intermedio		Extremo derecho		Retraso ida y vuelta/ metro
		Base	Max	Base	Max	Base	Max	
10BASE5	500	11.75	55.05	46.5	89.8	169.5	212.8	0.0866
10BASE2	185	11.75	30.731	46.5	65.48	169.5	188.48	0.1026
FOIRL	1000	7.75	107.75	29	129	152	252	0.1
10BASE-T	100	15.25	26.55	42	53.3	165	176.3	0.113
10BASE-FL	2000	12.25	212.25	33.5	233.5	156.5	356.5	0.1
Excess AUI	48	0	4.88	0	4.88	0	4.88	0.1026

Tabla 3.7

El estándar recomienda que se añada 5 bits al tiempo total calculado y que el resultado sea menor o igual a 575 bits.

Cuando el camino tiene extremos izquierdo y derecho de diferentes tipos de cable, es preciso realizar los cálculos dos veces con los extremos invertidos porque los resultados pueden diferir.

Además del tiempo de ida y vuelta es preciso calcular cuanto se reduce el tiempo entre tramas (“interframe gap shrinkage”). Este tiempo permite la recuperación de los interfaces y otros componentes entre la transmisión de dos tramas y puede verse reducido como consecuencia de los retrasos introducidos por los segmentos en la transmisión. Un intervalo muy pequeño entre tramas puede hacer que los interfaces no se asegure la capacidad de recepción de los interfaces con la posible pérdida de tramas.

El modelo propuesto en el estándar para estos cálculos es similar al anterior con la diferencia que sólo incluye el segmento del extremo transmisor para los cálculos.

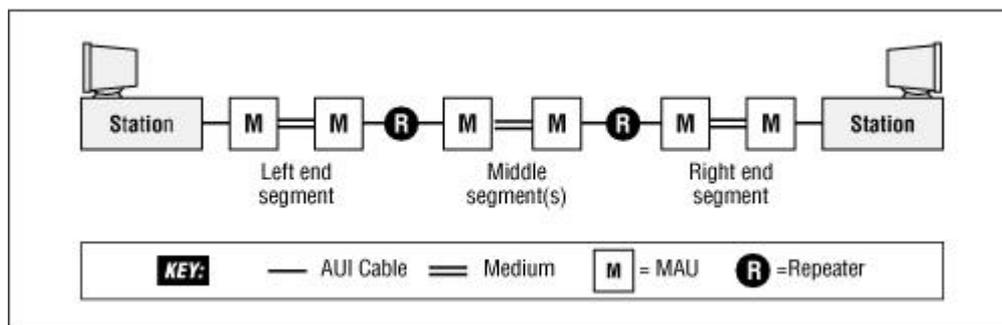


Figura 3.2 Modelo de red para el cálculo del interframe gap shrinkage

La tabla 3.x recoge los valores que deben usarse para el cálculo de encogimiento del intervalo entre tramas, cuyo valor deberá ser menor o igual que 49 bits.

Tipo de Segmento	Extremo transmisor	Segmento medio
Coaxial	16	11
Segmento de enlace	10.5	8

Tabla 3.8

3.4.2- Configuración de una Ethernet a 100 Mbps

Las reglas básicas del primer modelo para asegurar el funcionamiento de una red Ethernet multisegmento son las siguientes:

- Todos los segmentos de cobre deben tener una longitud menor o igual a 100 metros.
- Los segmentos de fibra deben tener una longitud menor o igual a 412 metros.
- Si se utilizan cables MII no deben exceder de 0,5 metros cada uno.

Con estas reglas en mente, la tabla 3.9 recoge los diámetros máximos del dominio de colisión de segmentos utilizando repetidores de Clase I y II (en Fast Ethernet existen dos tipos de repetidores, 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). Este diámetro máximo del dominio de colisión es la mayor distancia que puede darse entre dos estaciones dentro de un dominio de colisión.

Tipo de repetidor	Todo Cobre	Todo Fibra	Mezcla de cobre y fibra (p.e. , T4 y FX)	Mezcla de cobre y fibra (TX y FX)
Segmento simple DTE-DTE	100	412	N/A	N/A
Un Repetidor de Clase I	200	272	231	260.8
Un Repetidor de Clase II	200	320	N/A	308.8
Dos Repetidores de Clase II	205	228	N/A	216.2

Tabla 3.9

El modelo 2 para Fast Ethernet resulta mucho más simple que el de Ethernet a 10 Mbps. Una vez calculado el peor camino posible, el siguiente paso es calcular el retraso total de ida y vuelta, sumando los retrasos de cada segmento individual y los retrasos introducidos por cada estación y repetidor. La tabla 3.10 recoge los valores de los retrasos medidos en bits necesarios para realizar los cálculos.

Componente	Retraso de ida y vuelta en bits por metro	Retraso de ida y vuelta máximo en bits
Dos DTEs TX/FX	N/A	100
Dos DTEs T4	N/A	138
Un DTE T4 y otro TX/FX	N/A	127
Cable de Categoría 3	1.14	114 (100 meters)
Cable de Categoría 4	1.14	114 (100 meters)
Cable de Categoría 5	1.112	111.2 (100 meters)
Cable STP	1.112	111.2 (100 meters)
Fibra Optica	1.0	412 (412 meters)
Repetidor de Clase I	N/A	140
Repetidor de Clase II con todos los puertos TX/FX	N/A	92
Repetidor de Clase II con algún puerto T4	N/A	67

Tabla 3.10

Para calcular el retraso se multiplica la longitud de los segmentos por el retraso por el valor de la tabla (si son de la longitud máxima se utiliza directamente el valor indicado en la misma). Se suma el retraso de las dos estaciones (DTEs) y el de los repetidores en el camino (los fabricantes de cables y dispositivos suelen proporcionar los valores de los retrasos de sus productos que pueden utilizarse en lugar de los de la tabla anterior, puesto que suelen ser retrasos inferiores a los recogidos en el estándar). Al resultado se le agregarán 4 bits de seguridad y el resultado debe ser menor de 512 bits.

Los retrasos de los segmentos dependen del tipo de segmento utilizado, y de la calidad del cable cuando este es de cobre. Los fabricantes suelen proporcionar un valor preciso de la velocidad de propagación de la señal por su cable o NVP (Nominal Velocity of Propagation). Si se conoce este valor, en la tabla siguiente puede encontrarse un valor más preciso para el retraso a utilizar en este modelo.

Velocidad relativa a c	Bit/Metro		
	Ns/Metro	100 Mbps Fast Ethernet	1000 Mbps Gigabit Ethernet
0.4	8.34	0.834	8.34
0.5	6.67	0.667	6.67
0.51	6.54	0.654	6.54
0.52	6.41	0.641	6.41
0.53	6.29	0.629	6.29
0.54	6.18	0.618	6.18
0.55	6.06	0.606	6.06
0.56	5.96	0.596	5.96
0.57	5.85	0.585	5.85
0.58	5.75	0.575	5.75
0.5852	5.70	0.570	5.70
0.59	5.65	0.565	5.65
0.6	5.56	0.556	5.56
0.61	5.47	0.547	5.47
0.62	5.38	0.538	5.38
0.63	5.29	0.529	5.29

0.64	5.21	0.521	5.21
0.65	5.13	0.513	5.13
0.654	5.10	0.510	5.10
0.66	5.05	0.505	5.05
0.666	5.01	0.501	5.01
0.67	4.98	0.498	4.98
0.68	4.91	0.491	4.91
0.69	4.83	0.483	4.83
0.7	4.77	0.477	4.77
0.8	4.17	0.417	4.17
0.9	3.71	0.371	3.71

Tabla 3.11 Tabla de conversión para tiempos de propagación del cable.,

4.4.3- Configuración de una Gigabit Ethernet

Las reglas básicas del primer modelo son las siguientes:

- El sistema estará limitado a un solo repetidor
- Las longitudes de los segmentos serán inferiores a 316 metros o la distancia máxima de transmisión según el tipo de segmento.

La tabla siguiente muestra el diámetro máximo del dominio de colisión en un sistema Gigabit Ethernet.

Configuración	UTP Categoría 5	1000BASE-CX	Fibra Optica 1000BASE-SX/LX	UTP Categoría 5 y Fibra Optica	1000BASE-CX y 1000BASE-SX/LX
Segmento sencillo DTE-DTE	100	25	316	N/A	N/A
Un repetidor	200	50	220	210	220

Tabla 3.12 Modelo 1, Dominio máximo de colisión Gigabit Ethernet en metros

El modelo 2 es el más simple de los tres puesto que sólo permite segmentos de enlace y un único repetidor, por lo tanto el único cálculo necesario es el del peor caso de valor de retraso en el camino (PVD), que está formado por la suma de los valores del retraso en los segmentos, el retraso del repetidor, del DTE y un margen de seguridad.

La Tabla siguiente proporciona un conjunto de valores para el cálculo del retraso:

Component	Round-Trip Delay in Bit Times per Meter	Maximum Round-Trip Delay in Bit Times
Two DTEs	N/A	864
Category 5 UTP Cable Segment	11.12	1112 (100 m)
Shielded Jumper Cable (CX)	10.10	253 (25 m)
Fiber Optic Cable Segment	10.10	1111 (110 m)
Repeater	N/A	976

Tabla 3.13 Componentes del retraso en 1000Base-T

Con estos valores se puede calcular el retraso de ida y vuelta para el segmento de mayor longitud. También puede utilizarse la tabla 3.13 para calcular retrasos de cable y usar la conversión adecuada.

Para completar el cálculo del PVD deben sumarse los retrasos de todos los segmentos junto con los introducidos por las dos estaciones (DTEs) y el de los repetidores, más un margen de 0 a 40 bits (el estándar recomienda 32). Si el resultado es menor o igual a 4096 bits la configuración es correcta.

Hoy en día es relativamente raro verificar la validez de una topología. La razón es que normalmente las topologías de red desde el punto de vista del dominio de colisiones son triviales, puesto que los ordenadores o bien se conectan directamente a conmutadores, prescindiendo totalmente de los concentradores, o si se utilizan concentradores se conectan directamente de puertos de conmutador, no encadenando más de un nivel de concentradores, para evitar que haya muchos ordenadores compartiendo ancho de banda en una misma red.

3.5.- La trama Ethernet/802.3

La estructura de trama 802.3 es la siguiente:

Campo	Tamaño (Bytes)
Preámbulo	7
Delimitador inicio de trama	1
Dirección de destino	6
Dirección de origen	6
Longitud	2
Datos	0-1500
Relleno	0-46
Secuencia de comprobación (CRC)	4

Tabla 3.14

Entre dos tramas siempre existe un período de tiempo en el que no se transmite nada, de duración equivalente a 12 bytes (por ejemplo 96 ns a 10 Mb/s) y cuya función es separar las tramas consecutivas entre sí. Este hueco entre tramas es el único mecanismo fiable para detectar cuando termina una trama, ya que el campo longitud puede no existir (dependiendo del estándar utilizado) y aunque exista no se utilizará en tiempo de captura para averiguar cuándo termina la trama. El intervalo entre tramas sirve también para dar un respiro al receptor, que puede necesitar un cierto tiempo 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 preámbulo.

El preámbulo está formado por la secuencia 10101010 repetida siete veces, y el delimitador de inicio por la secuencia 10101011. Esto al ser transmitido con codificación Manchester genera una onda cuadrada de 10 MHz durante 5,6 μ s, lo cual permite a los demás ordenadores sincronizar sus relojes con el emisor. El delimitador de inicio de trama marca 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 describimos más adelante.

El campo longitud indica la longitud del campo de datos. Este campo, en el estándar Ethernet se denomina "Tipo" e indica el protocolo que ha generado esta trama.

El campo datos puede tener una longitud variable entre 0 y 1500 bytes. 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 medir la longitud de la trama, el preámbulo y el delimitador de inicio de trama no se consideran parte de la misma. La longitud máxima de una trama 802.3 es 1518 bytes.

La secuencia de comprobación es un CRC de 32 bits basado en un generador polinómico de grado 32.

La longitud mínima de una trama Ethernet fija el diámetro de la red, 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. 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. 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.

Existen, sin embargo, varios tipos de tramas Ethernet/802.3 que debemos conocer :

- Ethernet II
- 802.3 "raw"
- Ethernet 802.2
- Ethernet SNAP

En la definición original de Ethernet, Digital, Xerox e Intel definieron un formato de trama ligeramente diferente del que posteriormente sería propuesto por el comité IEEE 802.3.

Campo	Tamaño (Bytes)
Preámbulo	8
Dirección de destino	6
Dirección de origen	6
Tipo	2
Datos	0-1500
Relleno	0-46
Secuencia de comprobación (CRC)	4

Tabla 3.15

La diferencia fundamental estriba en la existencia de un campo tipo que especifica el protocolo de nivel superior que ha generado la trama.

El segundo formato, 802.3 "raw" es el explicado inicialmente. Un dispositivo puede diferenciar entre estos dos tipos de trama a partir del campo longitud/tipo puesto que los valores del campo tipo asignados a las tramas Ethernet II son siempre mayores de 1500, mientras que el campo longitud siempre es menor que este valor.

Sin un campo que identifique el protocolo de destino, y si existen varios protocolos posibles, no es factible interpretar el campo de datos de la trama 802.3, por ello se desarrolló el estándar 802.2 (subcapa de Control de Enlace Lógico) que proporciona las funciones no contempladas en la subcapa MAC, como por ejemplo ésta.

Campo	Tamaño (Bytes)
Preámbulo	7
Delimitador inicio de trama	1
Dirección de destino	6
Dirección de origen	6
Longitud	2
DSAP (Punto de Acceso al Servicio de Destino)	1
SSAP (Punto de Acceso al Servicio de Origen)	1
Control	1
Datos	0-1500
Relleno	0-43
Secuencia de comprobación (CRC)	4

Tabla 3.16

La cabecera 802.2 envuelve los datos antes de que sean encapsulados por la cabecera 802.3, añadiendo tres campos a la cabecera. Los Puntos de Acceso al Servicio indican el protocolo de alto nivel que generó o al que va dirigida la trama y el campo de control tiene varios propósitos administrativos que estudiaremos más detalladamente con el protocolo 802.2.

Posteriormente a la publicación del estándar 802.2 y considerando que los campos DSAP y SSAP no eran apropiados para algunos protocolos, principalmente los de Apple y TCP/IP, se definió otro estándar denominado SNAP (Sub Network Access Protocol), cuyo formato de trama es el siguiente:

Campo	Tamaño (Bytes)
Preámbulo	7
Delimitador inicio de trama	1
Dirección de destino	6
Dirección de origen	6
Longitud	2
DSAP (Punto de Acceso al Servicio de Destino)	1 (10101010)
SSAP (Punto de Acceso al Servicio de Origen)	1 (10101010)
Control	1 (0000011)
Identificador de Protocolo	5
Datos	0-1500
Relleno	0-38
Secuencia de comprobación (CRC)	4

Tabla 3.17

En esta especificación se añadió al final de la cabecera 802.2 un campo de 5 bytes para identificar el protocolo de red. Para que fuera posible diferenciar las tramas SNAP de las 802.2 se asignó el valor AA hexadecimal a los campos DSAP y SSAP en las primeras.

3.6.- Direcciones IEEE

Los diseñadores de Ethernet decidieron asignar direcciones globalmente únicas a cada dispositivo Ethernet direccionable (es decir a cada estación). Para ello utilizaron 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 de registro de los prefijos que hasta entonces había desempeñado. Actualmente el IEEE cobra una cuota de 1500 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 incompletas 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 otras redes locales, como FDDI y Fibre Channel. También se está 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 (20 ó 16 bytes respectivamente) permite emplear 6 en la dirección MAC.

Los dos primeros bits de los 48 que componen una dirección MAC IEEE tienen un significado especial:

- El bit menos significativo del primer byte indica el ámbito del envío. Se contemplan tres posibilidades: envío unicast (a un destino), envío multicast (a un grupo de destinos) o envío broadcast (a todos los destinos). Si el bit menos significativo del primer byte 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 todos los bits de la dirección sean 1s 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 bit menos significativo del primer byte, viniendo especificado por el resto de la dirección el grupo multicast al que va dirigida. En una trama unicast este 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 bit menos significativo del primer byte siempre debe estar a cero.
- El segundo bit menos significativo 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). En la práctica totalidad de las situaciones las direcciones utilizadas son globales.

3.7.- Método de Control de Acceso al Medio

Para regular el acceso de los dispositivos a un medio compartido se utiliza la técnica CSMA/CD (Carrier Sense Multiple Access / Collision Detection).

De manera esquemática (se verá con más detalle al analizar los métodos de control de acceso al medio) el procedimiento seguido por las estaciones que siguen esta técnica es el siguiente. Antes de transmitir, una estación monitoriza el medio para escuchar si alguna otra estación está transmitiendo. Si se detecta una transmisión, la estación espera un tiempo aleatorio antes de volver a intentar la transmisión, escuchando de nuevo el medio en primer lugar. Si no detecta ninguna transmisión sobre el medio físico, la estación comienza su transmisión.

Durante la transmisión de una trama la estación monitoriza el medio continuamente y si no detecta la transmisión de ninguna otra estación, continúa su transmisión hasta completar la trama.

Una vez que se completa la transmisión de la trama, la estación espera un intervalo de 9,6 μs (intervalo entre tramas ya mencionado) antes de volver a efectuar ninguna transmisión. Este intervalo se aprovecha para una comprobación.

Después de pasar los primeros 0,6 μs del intervalo entre tramas, el transceptor dispone de 1,4 μs para probar su circuitería de detección de colisiones (SQE Test). Durante este tiempo la estación verá la señal de test SQE (Signal Quality Error), que le informa de que la circuitería de detección de colisión del transceptor funciona y si se produjera una colisión esta sería notificada.

Debido a los retrasos en la propagación en el medio es posible que dos estaciones transmitan simultáneamente si encuentran el medio físico libre. Cuando sus transmisiones se encuentran en el cable se produce una colisión. Las estaciones que están transmitiendo y monitorizando el medio detectarían que se ha producido una colisión cuando la lectura del medio físico proporcione una tensión anormal. En esta situación interrumpirán inmediatamente la transmisión de una secuencia de "jam", que consiste en cualquier combinación de valores que no sea un CRC válido para la trama que fue interrumpida por la colisión (y que se denomina habitualmente "runt") y que habitualmente es una secuencia de 32 unos. El propósito de esta secuencia de jam es inundar el medio de transmisión evitando que ningún otro dispositivo transmita.

3.7.1.- La colisión

Un aspecto fundamental del protocolo CSMA/CD es la detección de colisiones y el procedimiento a seguir en su caso. Empezaremos por describir en detalle este evento.

Se produce una colisión cuando dos o más dispositivos empiezan a transmitir simultáneamente, o más exactamente cuando lo hacen con una separación menor que el tiempo de ida y vuelta que los separa (que como máximo puede ser de 51,2 μs , 5,12 μs o 4,096 μs , según se trate de una red a 10, 100 o 1000 Mb/s). En este caso, cuando la señal de uno de los dispositivos todavía no ha alcanzado al otro, este segundo monitoriza el medio para iniciar una transmisión y dado que no detecta ninguna señal, comienza ésta produciéndose la colisión al encontrarse ambas señales en el medio compartido.

Supongamos que tenemos una red de 10 Mb/s en la que dos ordenadores intentan transmitir a la vez. Al detectar la colisión ambos dejan de transmitir y a partir de ese momento consideran el tiempo dividido en intervalos de 51,2 μs . Entonces esperan 0 ó 1 intervalos para reintentar (la elección entre 0 y 1 la hace cada uno de forma aleatoria, por lo que la probabilidad de que haya una nueva colisión es ahora de 0,5). Si se produce una segunda colisión cada ordenador espera aleatoriamente 0, 1, 2 ó 3 intervalos para reintentar, con lo que la probabilidad de una tercera colisión baja a 0,25. El número de intervalos se va duplicando sucesivamente hasta que eventualmente alguno de ellos elige un intervalo anterior al otro y transmite; el otro lo hará más tarde cuando haya agotado el número de intervalos que ha elegido y el primero haya terminado.

En caso de colisión recurrente el número de intervalos se sigue duplicando, de forma que el n-ésimo reintento abarca 2^n intervalos. El proceso se repite hasta diez colisiones consecutivas ($n=10$) momento a partir del cual se sigue reintentando pero manteniendo constante el número de intervalos, que es en estos momentos de 1024. Si se producen seis colisiones sucesivas más (hasta un total de 16) el protocolo MAC abandona y reporta el fallo a los niveles superiores, que podrán tomar la decisión de repetir el proceso o bien abandonar la tarea (en el caso de IP el evento es ignorado, por lo que serán los niveles superiores los que por omisión supondrán que se ha perdido la trama y solicitarán reenvío, originando enormes retardos y una merma considerable del rendimiento). Este mecanismo se conoce como *retroceso exponencial binario truncado*, y tiene la virtud de permitir la autoregulación de las estaciones en función del tráfico existente en la red. Con tráfico reducido ofrece bajos retardos, mientras que con elevado tráfico las colisiones van resolviéndose y los envíos repartiéndose en el tiempo disponible, dando un rendimiento bastante aceptable en la mayoría de las situaciones.

Veamos un ejemplo concreto. Supongamos que una estación ha sufrido una colisión, por lo que se encuentra en el intento número 1; aquí elegirá uno de dos posibles intervalos (numerados 0 y 1). Si elige el intervalo 0 procederá a transmitir inmediatamente; mientras que si elige el intervalo 1 esperará $51,2 \mu\text{s}$ antes de empezar a transmitir. Estadísticamente este reintento introduce un retardo medio de $25,6 \mu\text{s}$ ($0+51,2 / 2 = 25,6$), si suponemos un reparto equitativo entre ambas posibilidades. Si se produce una segunda colisión la estación tendrá que iniciar un nuevo intento eligiendo esta vez uno entre cuatro posibles intervalos (numerados 0, 1, 2 y 3) que causarán un retardo medio de $76,8 \mu\text{s}$ ($0 + 51,2 + 102,4 + 153,6 = 307,2 / 4 = 76,8$) (suponemos nuevamente que la probabilidad de cada intervalo es la misma). Como este retardo se sumaría al ya sufrido en el primer intento podemos estimar que el retardo acumulado en el segundo intento es de $25,6 + 76,8 = 102,4 \mu\text{s}$.

En la tabla siguiente se muestra la evolución en el rango de intervalos, rango de tiempo, retardo medio y retardo acumulado medio para los 16 intentos que como máximo pueden tener lugar:

Número del Intento	Rango de Intervalos	Rango de Tiempo (ms)	Retardo medio (ms)	Retardo acumulado Medio (ms)
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 3.18

En el caso de agotar los 16 intentos el retardo acumulado medio llega a ser cercano a los 200 ms. Si el crecimiento exponencial no se truncara en la iteración número 10 el retardo acumulado medio sería de más de tres segundos cuando se llegara a los 16 intentos. Al considerarse este un valor inaceptable se introdujo el truncamiento del crecimiento exponencial en la décima iteración.

Un caso interesante es el que se da cuando dos estaciones colisionan y la que transmite primero envía una trama de 1518 bytes. En este caso ocupará el medio durante 12 ms, con lo que la estación 'perdedora' incrementará su contador de intervalos varias veces hasta llegar a un valor de 8 ó 9 iteraciones, aproximadamente; si entretanto aparece una tercera estación deseando transmitir es muy probable que lo consiga antes, ya que su contador de intervalos será menor y por tanto adoptará una postura más 'agresiva' con la red.

Cuando una estación consigue finalmente transmitir una trama su contador de iteraciones se pone a cero, con lo que cuando tenga que transmitir la siguiente empezará el proceso desde el principio, como si nada hubiera ocurrido. Dicho de otro modo, el mecanismo de retroceso exponencial binario no tiene memoria entre tramas. Esta circunstancia discrimina positivamente a la estación afortunada en una colisión, ya que además de haber enviado su trama se encuentra en situación ventajosa para los nuevos intentos que tenga que celebrar más tarde con la estación (o estaciones) perdedoras. Esta es la causa del *efecto captura* del que hablaremos más adelante.

La colisión es el mecanismo de regulación del tráfico en una red Ethernet, por lo que una cierta proporción de colisiones es algo completamente normal, especialmente si tiene tráfico elevado y se transmiten tramas pequeñas. La denominación *colisión* es desafortunada, ya que hace pensar en un suceso incorrecto, que normalmente no debería ocurrir. Probablemente si se hubiera elegido el término *coincidencia* o *solapamiento* el evento parecería más normal y la industria de los LEDs amarillos no se habría desarrollado tanto como lo ha hecho.

3.7.2.- Excesivas colisiones y colisiones tardías

Mientras que una tasa importante de colisiones (10-30%) en una red puede ser normal en determinadas circunstancias como veremos luego, hay dos situaciones excepcionales que como tales merecen un comentario especial, ya que en caso de producirse tendrán un impacto fuerte en el rendimiento y deben evitarse en lo posible; estas son la ocurrencia de 16 colisiones consecutivas (también denominadas 'excesivas colisiones') y las colisiones tardías.

Como ya hemos comentado cuando una estación sufre más de 16 colisiones consecutivas abandona, con lo que la trama a nivel MAC se pierde. En caso de que los niveles superiores suministren un servicio fiable (por ejemplo TCP) se iniciará un proceso que terminará con el reenvío de la trama, pero a costa de un aumento considerable en el retardo y una notable merma en el rendimiento. La ocurrencia de 16 colisiones consecutivas en una red es un síntoma claro de saturación o problemas físicos, por ejemplo en el cableado o alguna tarjeta o transceptor se encuentra averiado. Si nos encontramos en esta situación es importante localizar la causa y remediarla, aislando el componente averiado, aumentando la capacidad o reorganizando la red para repartir mejor el tráfico (por ejemplo mediante el uso de conmutadores). Los sucesos de este tipo se pueden monitorizar mediante un analizador o analizando los contadores de muchos dispositivos (por ejemplo conmutadores).

El otro tipo de suceso anormal relacionado con las colisiones es el que se conoce como colisión tardía, y es aún mas grave que el anterior. Cuando una estación Ethernet transmite supone que se encuentra en riesgo de colisión únicamente durante los 512 primeros bits, ya que a partir de ese momento todas las demás estaciones deben saber que está emitiendo. Si se produce una colisión pasado el bit 512 significa que existe una estación que se encuentra a una distancia mayor de la permitida; esto se debe normalmente a una topología inválida, y es lo que se conoce como una colisión tardía (Out of Window Collision)

Supongamos, por ejemplo, una red formada por dos concentradores Fast Ethernet conectados por un cable de 100 metros, y unido a cada uno de ellos un ordenador con 100 m de cable. El retardo, calculado aplicando el modelo 2 correspondiente es de 621 bits, superando el valor máximo permitido. Como la detección de las colisiones sólo está garantizada para tramas superiores a 621 bits; cuando se 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:

- I. La colisión es detectada antes de transmitir el bit 512: en este caso se considera una colisión normal y se realiza el retroceso exponencial binario. Por ejemplo si ambas estaciones empiezan a transmitir a la vez ambas detectarán la colisión cuando estén transmitiendo el bit 310.
- II. La colisión es detectada después de transmitir el bit 512 (y antes del 621): en este caso se considera una colisión tardía; se aplica el retroceso exponencial binario, pero el suceso se reporta (por ejemplo incrementando un contador de colisiones tardías). Por ejemplo en nuestra red esto ocurriría si la estación A empieza a transmitir 300 μ s antes que la estación B, ya que A detectará colisión cuando esté transmitiendo el bit 610 de la trama; B por su parte detectará colisión normal, pues la detectará cuando esté transmitiendo el bit 10.
- III. La colisión no es detectada. En este caso la trama se perderá. Si los protocolos de nivel superior implementan un servicio fiable la trama será retransmitida mas tarde a costa de una pérdida importante de rendimiento. Por ejemplo en nuestra red si A empieza a transmitir una trama de 600 bits 300 μ s antes que B cuando se produzca la colisión A ya habrá terminado y habrá liberado el medio se producirá una colisión que A no detectará (para cuando esta se produzca A ya habrá 'desconectado'); por su parte B detectará una colisión en el bit 10 de la trama, como en el caso anterior.

Curiosamente el problema de las colisiones tardías no son éstas (caso II anterior) sino el caso III, o sea las tramas perdidas. Una red Ethernet puede estar funcionando normalmente y tener decenas de colisiones por segundo, pero una sola colisión tardía es síntoma de un problema serio en la red que debe ser investigado.

Además de por topologías inválidas también pueden producirse colisiones tardías en una red por problemas de nivel físico (en el cableado, por ejemplo).

3.8.- Capacidad de Ethernet

Pocos aspectos en redes de computadores son tan comentados y poco comprendidos como la eficiencia de una red Ethernet. Esa confusión tiene su origen en parte en el artículo original de Metcalfe y Boggs sobre Ethernet, en el cual se realiza una estimación de rendimiento basada en datos puramente teóricos. Según este estudio cuando en una red Ethernet de 10 Mb/s hay un número muy elevado de estaciones, todas ellas separadas por la distancia máxima y transmitiendo tramas del tamaño mínimo de acuerdo con una distribución de Poisson la situación es equivalente a la de un ALOHA ranurado con intervalo de 51,4 μ s. Como es bien sabido el rendimiento máximo de este sistema es del 36,8%. Esto provocó la creencia muy extendida (y recogida en la literatura) de que una red Ethernet se saturaba cuando su nivel de ocupación era del 30-40%. Pero hay que tener en cuenta que este dato se obtuvo a partir de cuatro suposiciones que no se dan en la realidad:

- La separación entre las estaciones es casi siempre menor que la distancia máxima (a veces mucho menor).
- Las tramas transmitidas son muchas de ellas mayores de 64 bytes.
- El número de estaciones en una red Ethernet nunca es muy elevado. El valor máximo teórico es 1024, pero raramente se encuentran más de 100 estaciones en una misma red.
- El tráfico en una red local no corresponde a una distribución de Poisson, sino que tiene un comportamiento autosimilar.

Cuando se intenta corregir cada una de estas suposiciones se produce un aumento en el rendimiento; por tanto la estimación del 36,8% es un valor extremadamente conservador que no refleja la realidad. La confusión creada en los primeros años respecto al rendimiento de una red Ethernet fue tal que en 1988 Boggs escribió (junto con otros autores) un artículo titulado 'Measured Capacity of an Ethernet: Myths and Reality' en el que se realizaban medidas con tráfico real en redes con diversos retardos y tamaños de trama, y se comprobaba la influencia decisiva de estos factores en el rendimiento de una red. 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 detecta inestabilidad o problemas de rendimiento en una Ethernet la causa es una implementación incorrecta del protocolo (sobre todo del algoritmo de retroceso exponencial binario).

Las mediciones realizadas por Boggs demuestran que el rendimiento de una red Ethernet depende de los siguientes factores:

- El *tamaño de trama* utilizado. A mayor tamaño de trama mayor rendimiento.
- El *retardo*, es decir la separación o distancia física entre las estaciones. A menor distancia mayor rendimiento
- El *número de estaciones*. A menor número de estaciones mayor rendimiento.

Boggs extrae de los estudios sobre rendimiento de Ethernet una serie de recomendaciones que reproducimos a continuación:

- **No instalar 'cables' largos (dominios de colisión extensos):** para cubrir un área extensa es preferible dividir el cable con puentes o routers, no con repetidores.
- **No poner demasiados ordenadores en un 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 o el software del host son esenciales para un buen rendimiento.
- **Utilizar el tamaño de paquete máximo posible:** esto reduce la probabilidad de colisión y el overhead interno 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 pueden coexistir).

Vamos a comentar algunos de estos factores con más detalle.

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 64 bytes de la trama, si ésta tiene 64 bytes de longitud se encuentra en riesgo todo el tiempo, mientras que si tiene 1518 bytes la colisión sólo puede producirse durante los primeros 64 bytes, el resto del tiempo la estación 'posee' el medio de transmisión (recordemos que la red es 'carrier sense'). El riesgo de colisión es pues en este caso unas 24 veces más pequeño. Por tanto *a iguales niveles de ocupación el número de colisiones se reduce si se aumenta el tamaño de trama*. Otras consideraciones (tiempo de proceso, cabeceras, etc.) aconsejan también la utilización de tramas grandes para mejorar la eficiencia de una red Ethernet.

En el caso de Gigabit Ethernet el riesgo de colisión se da durante los primeros 512 bytes, debido a la extensión de portadora. Esto significa que a igual tamaño de trama y con un mismo nivel de ocupación relativa hay una probabilidad mucho mayor de colisión en Gigabit Ethernet que en Ethernet o Fast Ethernet.

Otro factor que influye en la eficiencia, es el *número de estaciones* que transmiten. Esto se puede comprender fácilmente de manera intuitiva. Supongamos que en una red hay una sola estación que transmite a 8 Mb/s: en tal caso no podrá haber colisiones (ya que una estación nunca compite consigo misma). Si hay dos estaciones, cada una transmitiendo a 4 Mb/s, existirá un cierto riesgo de colisión. Si hay ocho estaciones, cada una a 1 Mb/s el riesgo será mayor, ya que hay más estaciones y más probabilidad de que dos o más colisionen. Así pues *a iguales niveles de ocupación el número de colisiones disminuye si se reduce el número de estaciones transmisoras*. Por ejemplo si tenemos un servidor conectado con dos tarjetas diferentes a una misma red Ethernet tendremos una mayor cantidad de colisiones que si solo utilizamos una (sin embargo el uso de dos tarjetas aumentaría el rendimiento en el caso de que con una tarjeta no seamos capaces de saturar la red; la solución óptima sería conectar las dos tarjetas a dominios de colisión diferentes).

Por desgracia raramente es posible modificar el tamaño de trama o el número de estaciones de una red. Sin embargo hay un tercer parámetro sobre el que a menudo sí podemos actuar. Se trata de la *distancia entre estaciones*. Sabemos que las colisiones siempre ocurren en los primeros 64 bytes de la trama. En realidad generalmente ocurren mucho antes, ya que la distancia entre las estaciones raramente es igual a la distancia máxima permitida. Para comprenderlo mejor consideremos por ejemplo la red Fast Ethernet descrita en el apartado anterior; estaba formada por dos ordenadores unidos a través de dos concentradores y separados por 200 m de cable, lo cual daba una distancia equivalente a 506 bits. Las colisiones entre estos dos ordenadores siempre ocurrirán en el bit 506, o antes. Si todas las tramas que se transmiten son de 512 bits esto significa que en el caso más desfavorable hay riesgo de colisión el 99% del tiempo ($506/512 = 0,99$). Si en vez de conectar los dos equipos a concentradores diferentes los conectamos al mismo concentrador suprimimos un repetidor (92 ns) y 100 m de cable (111 ns), con lo que reducimos la distancia entre ellos a 303 bits (100ns de las tarjetas, 92ns de un concentrador y 111ns de 100m de cable), con lo que el riesgo de colisión en el caso más desfavorable es del 59% ($303/512 = 0,59$). Así pues con este cambio hemos reducido las colisiones en un 40% ($0,59/0,99$, o lo que es equivalente $303/506$). Puede demostrarse fácilmente que esta mejora se aplica por igual a cualquier tamaño de trama, no solo al tamaño mínimo. Por consiguiente *el número de colisiones disminuye si se reduce la distancia entre las estaciones*. Esta medida tendrá un efecto mayor si la aplicamos en las estaciones que generan más tráfico, que normalmente serán también las que tendrán mayor riesgo de colisión; la regla práctica sería pues reorganizar la red minimizando la distancia entre estaciones, especialmente las que soporten más tráfico, por ejemplo conectando los servidores siempre que sea posible al mismo concentrador.

Una consecuencia curiosa de lo anterior es que, dada una misma topología y distancias entre las estaciones, la probabilidad de colisión aumenta con la velocidad de la red, ya que la distancia en términos de bits aumenta. Supongamos por ejemplo una red formada por un concentrador al que se conectan diversas estaciones, todas ellas con cables de 100 m. La distancia entre estaciones (calculada aplicando las reglas del Modelo 2) es de 203 bits a 10 Mb/s, 414 bits a 100 Mb/s y 3860 bits a 1000 Mb/s. Por tanto si los demás factores se mantienen constantes (tamaño de trama y número de estaciones) la probabilidad de colisión, para un mismo nivel de ocupación relativa, será 2 veces mayor a 100 Mb/s que a 10 Mb/s, y 19 veces mayor a 1000 Mb/s que a 10 Mb/s.

A menudo se plantea la pregunta de cual es la proporción máxima aceptable de colisiones en una red Ethernet. Lamentablemente no hay una respuesta única, ya que las colisiones pueden variar en un rango muy amplio en función de los factores que hemos comentado, especialmente el tamaño de trama. Por ejemplo con elevado número de tramas pequeñas puede ser normal tener una tasa de hasta el 30-40% de colisiones; en cambio, si todas las tramas son de 1500 bytes la proporción difícilmente superará el 4-5%. En realidad el nivel de ocupación de una red es un parámetro mucho mas indicativo de su grado de saturación que la tasa de colisiones.

En cualquier caso, para poder valorar la tasa de colisiones o el rendimiento de una red Ethernet es fundamental tener una idea del tamaño de las tramas que viajan por la red, es decir caracterizar el tipo de tráfico que soporta nuestra red. En estudios de tráfico se ha observado que la distribución de tramas es fuertemente bimodal, es decir que la mayoría se encuentran cerca del valor mínimo o cerca del valor máximo permitido en la red. Esto es consecuencia de la manera como funcionan la mayoría de los protocolos y aplicaciones.

En una primera aproximación podemos distinguir tres tipos de tráfico según el tamaño de trama utilizado:

- **Tipo 100/0:** 100% de tramas pequeños, 0% de grandes. Ejemplos: telnet (especialmente si se utiliza eco remoto), voz sobre IP (paquetes de 100-200 bytes).
- **Tipo 50/50:** 50% de pequeñas y 50% de grandes. Ejemplos: FTP o HTTP (pero no todo son tramas grandes, recordar el ACK de TCP)
- **Tipo 1/99:** 1% de tramas pequeñas, 99% de tramas grandes. Ejemplos: flujos UDP (vídeo MPEG, H.263, etc.)

Normalmente el tráfico real será una mezcla en diversas proporciones de los tres tipos. Si no tenemos ni idea del tipo de aplicaciones que se utilizan en la red podemos averiguar el tamaño medio de las tramas dejando un analizador conectado durante un período de tiempo suficientemente largo (por ejemplo un día); esto nos permitirá obtener el tamaño medio de trama y un histograma de su distribución por longitudes (además de mucha otra información de interés). Si tampoco disponemos de un analizador, o no podemos medir el tráfico podemos utilizar como último recurso el valor de 534 bytes, que es según estudios realizados el tamaño medio de trama en una red Ethernet típica en un entorno de estaciones de trabajo.

3.8.1.- Tasa de colisiones y rendimiento

Se ha escrito mucho, y no siempre correctamente, sobre que es una proporción razonable de colisiones en Ethernet. Conviene aclarar que una tasa de colisiones determinada, por ejemplo de un 10%, no significa que se este perdiendo el 10% de la capacidad en colisiones, sino que el 10% de los intentos de envío de tramas son fallidos debido a una colisión. Dado que el tiempo empleado en una colisión es normalmente pequeño (en teoría nunca superior a 512 bits) la interpretación de que es una tasa de colisiones excesiva o preocupante depende del tamaño medio de trama utilizado en nuestra red. Por ejemplo si todas las tramas tienen el tamaño mínimo y la tasa de colisiones es del 10% la pérdida de eficiencia puede calcularse como:

$$(10\% * 512 \text{ bits}) / (10\% * 512 \text{ bits} + 90\% * 512 \text{ bits}) = 10\%$$

Por tanto en este caso la tasa de colisiones reflejaría aproximadamente la pérdida producida en la eficiencia. En cambio con un tamaño medio de trama de 534 bytes una tasa de colisiones del 10% resulta en una pérdida de eficiencia de:

$$(10\% * 512 \text{ bits}) / (10\% * 512 \text{ bits} + 90\% * 4272 \text{ bits}) = 1,3\%$$

Dado que como hemos visto 534 bytes es un valor razonable en la mayoría de situaciones podemos concluir como regla aproximada que *la pérdida de eficiencia por colisiones en una red es aproximadamente igual a la décima parte de la tasa de colisiones medida*. Si disponemos de información más precisa sobre el tamaño de trama medio es posible hacer este cálculo de manera más exacta. Estos valores solo solo orientativos, ya que en la práctica el tiempo empleado en una colisión dependerá de la distancia entre las estaciones de la red.

Un fenómeno que merece la pena comentar respecto a las colisiones es el que se da cuando una estación transmite una trama grande en una red con elevada ocupación. En este caso existe una gran probabilidad de que mientras esa estación está transmitiendo aparezcan otras queriendo transmitir; todas ellas esperarán a que la primera termine y transmitirán inmediatamente después, ya que el protocolo de Ethernet es lo que se conoce como 1-persistente; en ese caso se producirá una colisión entre todas ellas que normalmente se resolverá en pocas iteraciones. La probabilidad de que este evento ocurra es proporcional al tiempo de espera, es decir al tamaño de la trama transmitida por la primera estación. Por tanto el uso de tramas grandes tiene el efecto curioso de incrementar la proporción de colisiones; sin embargo si calculamos la eficiencia de la red tomando en cuenta el tamaño de trama como hemos hecho en los ejemplos anteriores observamos que a pesar de este aumento en colisiones la eficiencia aumenta.

3.8.2.- *Reparto no equilibrado de recursos y Efecto captura*

Uno de los objetivos de diseño de cualquier red local como Ethernet es que efectúe un reparto equilibrado de recursos (es decir de capacidad) entre las estaciones en condiciones de saturación (evidentemente si sobran recursos, es decir si no hay saturación, nadie se preocupa de su reparto). A primera vista cabría pensar que el protocolo CSMA/CD cumple esta condición, ya que carece de un mecanismo de reserva o asignación de prioridades. La realidad es muy distinta. Debido a la forma como se resuelven las colisiones el ancho de banda que obtiene una estación en una red saturada depende del tamaño de las tramas que emite; una estación que emita tramas grandes conseguirá más ancho de banda que una que envíe tramas pequeñas. El mecanismo del retroceso exponencial binario tiende a hacer un reparto equitativo del número de tramas transmitidas por segundo por estación, independientemente de su longitud.

Como consecuencia de lo anterior, si en una red saturada se encuentran compitiendo usuarios cuyas aplicaciones manejan tamaños de tramas muy diferentes se pueden producir diferencias importantes en la cantidad de recursos utilizados por cada uno de ellos. Por ejemplo un usuario utilizando telnet verá perjudicado su tiempo de respuesta por otros que utilicen FTP o HTTP; o un usuario que transmita voz sobre IP y tenga que competir con otros que transmiten flujos de vídeo MPEG detectará fallos en la transmisión de sus paquetes, aunque este utilizando una proporción pequeña de la capacidad de la red. En estos casos habría que diseñar la red de forma que dichos usuarios no compartan ancho de banda.

Otro desequilibrio más sutil que el anterior es el que puede darse en una circunstancia como la que describimos a continuación: supongamos que dos ordenadores, A y B, disponen cada uno de una cola infinita de tramas a enviar e intentan enviar a la vez, con lo que se produce una colisión. La colisión se repite una o varias veces hasta que eventualmente A elige un intervalo inferior y consigue transmitir primero. Mientras A envía su trama B seguirá esperando y ampliando cada vez más su número de intervalos, a la espera de encontrar el medio libre, es decir hasta que detecte la ausencia de portadora. Pero supongamos que cuando termina de enviar una trama A es lo bastante rápido para preparar la siguiente durante el tiempo del hueco entre tramas (9,6 μ s a 10 Mb/s por ejemplo). En este caso A tendrá una probabilidad de transmitir mucho mayor que B, ya que su contador se ha puesto a cero después de la anterior transmisión con lo que adopta una actitud mas 'agresiva', mientras que B tiene el contador de intervalos en un valor mayor. Este proceso se repite varias veces (la situación se vuelve cada vez más desfavorable a B) hasta que B abandona por excesivas colisiones (es decir agota el máximo de 16 iteraciones), momento en el cual descarta la trama. Entonces B pone a cero su contador de iteraciones y puede competir para la siguiente trama en igualdad de condiciones con A. Aun suponiendo que B consiga esta vez transmitir primero, si su velocidad de proceso no le permite preparar la siguiente trama en 9.6 μ s (el tiempo del intervalo entre tramas) B perderá su oportunidad ya que A conseguirá transmitir entretanto, con lo que se producirá una colisión y se repetirá el proceso anterior, es decir A acaparará la red para su uso exclusivo durante largos períodos de tiempo. Este fenómeno se conoce como *efecto captura* y para que se dé es preciso que la estación A pueda encadenar tramas, es decir sea capaz de saturar la red. El efecto captura se puede detectar por diversos síntomas, siendo el mas obvio una proporción anormal de excesivas colisiones. En la práctica esto hace que una estación monopolice la red durante largos períodos de tiempo con lo que los retardos percibidos por el resto de los usuarios son muy grandes e impredecibles. También se puede producir el efecto captura por la acción combinada de dos estaciones, actuando en 'tándem', que conjuntamente sean capaces de saturar la red.

El efecto captura es consecuencia del funcionamiento del retroceso exponencial binario, y de su ausencia de 'historia', es decir del borrado del contador de colisiones que se produce después de una transmisión. Algunos autores lo consideran un fallo del diseño original de Ethernet. La verdad es que cuando Metcalfe diseñó una hipótesis de partida de Ethernet era que la capacidad de la red fuera bastante superior que la capacidad de los ordenadores a ella conectados; en 1974 no era imaginable que un ordenador fuera capaz de saturar una red de 2,94 Mb/s, mucho menos una de 10 Mb/s como se estandarizaría unos años más tarde (un gran ordenador de finales de los 70 difícilmente podía enviar datos a 500 Kb/s, por lo que el efecto captura era inconcebible). En cambio hoy en día un simple ordenador personal es capaz de saturar una red de 100 Mb/s.

Se han planteado diversas soluciones al problema del efecto captura. Algunas representan pequeñas modificaciones al algoritmo del retroceso exponencial binario, y otras suponen su completa sustitución por otros algoritmos, como el denominado Método de Arbitración Logarítmico Binario (BLAM, Binary Logarithmic Arbitration Method) propuesto en 1994. Con este algoritmo se asegura un reparto más homogéneo de los recursos. El IEEE ha puesto en marcha el grupo de trabajo 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 sólo IBM ha desarrollado un chip que incorpora BLAM, pero ninguna interfaz de red. Además la actual tendencia a constituir redes conmutadas, en las que cada estación dispone de una puerta de conmutador dedicada, tiene el efecto colateral de resolver el problema del efecto captura, ya que la estación dispone de un enlace full dúplex donde no se producen colisiones.

3.9.- Transmisión full dúplex y control de flujo

Una red Ethernet puede funcionar en modo full-dúplex si se dan las tres condiciones siguientes:

- a) Que el medio físico permita transmisión full-dúplex; esto se cumple en todos los casos habituales excepto 10BASE5, 10BASE2 y 100BASE-T4.
- b) Que solo haya dos equipos conectados entre sí (por ejemplo conmutador-conmutador, conmutador-host o host-host).
- c) Que los controladores y transceivers de ambos equipos soporten el funcionamiento en modo full-dúplex.

El funcionamiento full-dúplex se aprovecha de la existencia de sólo dos estaciones en la red y de un canal de comunicación en cada sentido entre ambas para inhibir el protocolo MAC CSMA/CD; de esta forma se maneja el medio físico como si se tratara de un enlace punto a punto full dúplex de la velocidad de la red. Al no haber colisiones éstas no han de detectarse, por lo que en full dúplex no rige la limitación de distancia impuesta por el tiempo de ida y vuelta de la Ethernet 'tradicional'. La restricción la impone únicamente la atenuación de la señal según el medio físico utilizado. Por ejemplo en 100BASE-FX, que tiene una distancia máxima en half dúplex de 412m, se llega en full dúplex a 2 Km.

Si una estación se configura en modo full dúplex sin que se den las tres condiciones antes mencionadas su rendimiento decae de forma espectacular, ya que no será capaz de detectar las colisiones que sin duda se producirán.

Cuando se utiliza modo full-dúplex en Gigabit Ethernet no se utilizan la extensión de portadora y las ráfagas de tramas, puesto que son innecesarias. Por tanto las ventajas de rendimiento en Gigabit Ethernet full dúplex son aun mayores que las obtenidas en Ethernet o Fast Ethernet. Hasta tal punto presenta ventajas Gigabit Ethernet full duplex que la utilización de Gigabit Ethernet half dúplex resulta dudosa.

Para permitir el funcionamiento full dúplex en Gigabit Ethernet sin tener que recurrir a la conmutación por puerta, que podría resultar excesivamente cara en algunas situaciones, se han ideado unos dispositivos nuevos denominados 'buffered repeaters', también llamados 'buffered distributor', 'full duplex repeater' o 'full duplex distributor', que son algo intermedio entre los concentradores y los conmutadores. Un 'buffered repeater' es un conmutador que carece de tabla de direcciones MAC, por lo que cualquier trama que recibe es replicada en todas sus interfaces por inundación, actuando de la misma forma que lo hace un conmutador con una trama dirigida a una estación que no aparece en sus

tablas. Por tanto desde este punto de vista un buffered repeater actúa como un concentrador. Sin embargo a diferencia del concentrador, que reproduce la trama bit a bit, el buffered repeater la almacena en su totalidad en su buffer antes de reenviarla; esto le permite actuar como una estación y funcionar en modo full duplex, con lo que no sufre las severas limitaciones de distancia del half dúplex; tampoco tiene que detectar colisiones o generar extensiones de portadora. Se espera que el buffered repeater sea bastante mas barato de fabricar que un conmutador de Gigabit Ethernet, ya que debido a su funcionamiento el tráfico total agregado de un buffered repeater está limitado a 1 Gb/s, lo cual simplifica el diseño respecto a un conmutador normal, que en principio debe poder soportar un tráfico total agregado igual a la suma del de todas sus interfaces. Estrictamente hablando los buffered repeaters no son parte del estándar Gigabit Ethernet; dado que su funcionamiento se basa en el de los conmutadores, es decir en el de los puentes transparentes, corresponden al estándar 802.1D.

Con todos estos desarrollos, que muy probablemente dejarán en desuso la Gigabit Ethernet half dúplex, cabría preguntarse por que razón el subcomité 802.3z emprendió la ardua tarea de estandarizar Gigabit Ethernet half dúplex, con toda la complejidad que esto supuso; después de todo si solo se hubiera estandarizado la transmisión full dúplex no habría sido necesario definir la extensión de portadora y las ráfagas de tramas. La explicación es de tipo político: para que el grupo que definía Gigabit Ethernet pudiera constituirse como un subcomité de 802.3 era necesario que contemplara el uso de CSMA/CD (y por ende del funcionamiento half dúplex), ya que este protocolo es la característica esencial que identifica al comité 802.3. En caso de no haber contemplado el funcionamiento CSMA/CD el grupo de Gigabit Ethernet habría tenido que solicitar al IEEE la creación de un nuevo comité 802, lo cual habría retrasado considerablemente la estandarización, cosa no deseada por ninguno de los participantes en el grupo Gigabit Ethernet.

3.9.1.- Control de flujo

Además de aumentar el rendimiento y permitir distancias mayores el uso de full dúplex simplifica el funcionamiento, puesto que se suprime el protocolo MAC. El aumento en el rendimiento obtenido por la transmisión full dúplex normalmente sólo es significativo en conexiones conmutador-conmutador o conmutador-servidor. En un equipo monousuario el full dúplex supone una mejora marginal ya que las aplicaciones casi siempre están diseñadas para dialogar de forma half-dúplex.

El funcionamiento full dúplex se introdujo inicialmente como una extensión no estándar por parte de varios fabricantes. En 1997 el subcomité 802.3x estandarizó el funcionamiento full dúplex y además incluyó una nueva funcionalidad, el control de flujo. El control de flujo en Ethernet se implementa mediante el comando PAUSE. El receptor puede en cualquier momento enviar al emisor un comando PAUSE indicándole por cuanto tiempo debe dejar de enviarle datos. Durante la pausa el receptor puede enviar nuevos comandos PAUSE prolongando, reduciendo o suprimiendo la pausa inicialmente anunciada (es decir, puede anunciar un tiempo mayor, menor o cero). De esta forma se evita el desbordamiento de los buffers del receptor con el consiguiente descarte de tramas, lo cual causaría males mayores. El control de flujo está especialmente indicado en el caso de conmutadores, sobre todo si forman parte del backbone de una red. Puede establecerse de forma asimétrica, por ejemplo en una conexión conmutador-host puede que se considere conveniente dar al conmutador la potestad de parar al host, pero no en sentido opuesto.

Desde el punto de vista de Ethernet el control de flujo se implementa como un nuevo tipo de protocolo de red. Para que funcione correctamente es fundamental que las tramas de control de flujo sean rápidamente reconocidas por los conmutadores, por lo que esta función se implementa normalmente en hardware. Para esto se vió que era mas eficiente utilizar la trama en formato DIX, ya que permitía poner el campo *tipo* en la cabecera MAC. Se propuso pues un nuevo formato de trama, que coincidía precisamente con el formato DIX. El comité 802.3 decidió aceptar la propuesta y estandarizó el nuevo formato de trama para todos los tipos de protocolos de Ethernet, no solo para el control de flujo. Como consecuencia de esto desde 1997 los dos formatos de trama: el 802.2 y el DIX son 'legales' según el estándar 802.3; la distinción entre ambos se hace según el valor del campo *tipo/longitud*, cosa que ya era habitual en todas las implementaciones.

Aprovechando la supresión de la restricción en distancia debida al CSMA/CD algunos fabricantes suministran transceivers láser que utilizando fibra monomodo en tercera ventana permiten llegar en Ethernet a distancias de más de 100 Km, a cualquiera de las velocidades habituales (10, 100 o 1000 Mb/s). Mediante dispositivos regeneradores de la señal de bajo costo es posible extender este

alcance en principio indefinidamente, habiéndose hecho pruebas en distancias de hasta 800 Km. De esta forma Ethernet se convierte en una alternativa interesante en redes de área extensa. Estos equipos no están estandarizados por lo que si se utilizan es conveniente poner en ambos extremos sistemas del mismo fabricante, o asegurarse previamente de su compatibilidad e interoperabilidad.

Aunque un enlace full dúplex no tiene mas limitación en la distancia que la impuesta por la atenuación de la señal, hay dos factores que se ven afectados por la longitud del enlace: el retardo y, en caso de que se realice control de flujo, el espacio necesario para buffers:

- El retardo es debido a la velocidad con que viaja la onda electromagnética en el medio físico (200.000 Km/s aproximadamente en el caso de cobre o fibra óptica). Por ejemplo para una distancia de 40 Km el tiempo de propagación de la señal es de 200 μ s aproximadamente, lo cual da un tiempo de ida y vuelta de 400 μ s. Si se utilizan dispositivos regeneradores de la señal o repetidores estos también pueden influir en un aumento del retardo.
- Cuando se implementa control de flujo es preciso reservar en cada equipo espacio en buffers suficiente para aceptar todo el tráfico proveniente del otro extremo en el caso de que se envíe un comando PAUSE. Dicho espacio ha de ser como mínimo igual a la cantidad de datos que se pueden transmitir durante el tiempo de ida y vuelta, ya que mientras el comando PAUSE viaja hacia el emisor éste continúa enviando datos. Dicho de otro modo, hay que reservar un espacio igual al doble de lo que 'cabe' en el cable. Por ejemplo en una conexión 1000BASE-LX full dúplex de 5 Km cada equipo deberá disponer de 50 Kbits (6,25 KBytes) para buffers.

3.10.- Autonegociación

Con la aparición de Fast Ethernet varios medios físicos compartían el conector RJ45 (100BASE-TX, 10BASE-T, etc.). Además el funcionamiento full dúplex que apareció poco después era una opción no disponible en todos los equipos. Había por tanto varias posibilidades de cometer errores al conectar físicamente equipos, lo cual causaba cierta confusión y problemas al usuario final. Para evitarlo se añadió al estándar 802.3 una característica opcional denominada autonegociación, consistente en que cuando dos equipos se conectan intercambian unas señales anunciando sus posibilidades, de acuerdo con un protocolo especial. Esto les permite 'negociar' y funcionar de la forma compatible mas eficiente posible. La negociación se realiza de acuerdo con el siguiente orden de prioridades:

- 1) 100BASE-T2 full dúplex
- 2) 100BASE-T2 half dúplex
- 3) 100BASE-TX full dúplex
- 4) 100BASE-TX half dúplex
- 5) 100BASE-T4 full dúplex
- 6) 100BASE-T4 half dúplex
- 7) 10BASE-T full dúplex
- 8) 10BASE-T half dúplex

Por ejemplo, supongamos que conectamos dos equipos, uno de los cuales puede funcionar de todas las maneras posibles y otro únicamente con 100BASE-TX y 10BASE-T half o full dúplex; la conexión se establecerá como 100BASE-TX full dúplex, ya que es el primer sistema en el que ambos coinciden.

La autonegociación puede causar problemas en algunos casos. Por ejemplo, supongamos que conectamos mediante cableado categoría 3 dos equipos que soportan 100BASE-TX y 100BASE-T4; las señales de autonegociación, que tienen unos requerimientos ínfimos en cuanto a la calidad del cableado, se transmiten perfectamente en cableado categoría 3, pero no verifican o miden su categoría (ya que esto sería técnicamente muy costoso). Por tanto la negociación dará como resultado 100BASE-TX. Una conexión 100BASE-TX sobre cableado categoría 3 no funcionará o lo hará con muchísimos errores. En este caso será necesario configurar manualmente los equipos y forzar el uso de 100BASE-T4 para que la red funcione correctamente. Afortunadamente esta situación se da raramente ya que muy pocos equipos implementan 100BASE-T4.

Cuando se estandarice 1000BASE-TX este medio se añadirá al principio de la lista de prioridades, con lo que será posible negociar velocidades de 1000/100/10 Mb/s.

También se puede negociar el uso o no de control de flujo, y si éste se establece con carácter simétrico o asimétrico.

La autonegociación de la velocidad ha simplificado la migración de muchas instalaciones de Ethernet a Fast Ethernet. En fibra óptica no es posible negociar la velocidad, ya que la longitud de onda es diferente a 10 y 100 Mb/s (primera y segunda ventana, respectivamente). Los únicos parámetros que se negocian en 10BASE-FL y 100BASE-FX son el funcionamiento full/half dúplex y el control de flujo, siempre dentro de la misma velocidad. Probablemente este ha sido, junto al elevado costo, el factor que más ha frenado el desarrollo de Fast Ethernet en fibra. Con 100BASE-SX, que utiliza primera ventana igual que 10BASE-FX se prevé poder ofrecer negociación 10/100. Esto unido al bajo costo de 100BASE-SX puede suponer un avance de la conectividad en fibra en el puesto del usuario final.

La autonegociación solo es posible en conmutadores y hosts, no en concentradores, ya que estos requieren funcionar a la misma velocidad en todos sus puertos, y siempre en modo half dúplex. En el mercado existen equipos denominados concentradores con autonegociación 100/10 por puerto; estos equipos en realidad son internamente un conmutador con dos puertos, uno de 10 y uno de 100 Mb/s, que tiene un concentradores de 10 y uno de 100 Mb/s conectados a cada puerto del conmutador; los puertos físicos se adscriben internamente a uno u otro concentrador en función de la velocidad del equipo que se conecta.

La autonegociación es una característica opcional, que no suele estar presente en los equipos de gama baja; conviene comprobar siempre que se está utilizando el modo más eficiente, configurando manualmente los equipos en caso necesario.

3.11.- Agregación de enlaces, trunking o multiplexado inverso

Hace varios años Kalpana desarrolló una técnica que permitía utilizar varios enlaces Ethernet full-dúplex para conectar dos equipos, realizando reparto del tráfico entre ellos. Hoy en día esta funcionalidad, denominada agregación de enlaces, multiplexado inverso o etherchannel (nombre dado por Cisco), es ofrecida por diversos fabricantes.

En principio según el estándar si dos conmutadores se unen por dos o más enlaces el protocolo Spanning Tree desactivaría todos menos uno (normalmente el de mayor velocidad), dejándolos preparados para entrar en funcionamiento en caso de fallo del primero por algún motivo. La agregación de enlaces requiere deshabilitar el Spanning Tree entre los enlaces que se agregan, para así poder repartir el tráfico entre ellos aumentando la capacidad.

El grupo de trabajo 802.3ad finalizó su trabajo en marzo de 2000, con un gran apoyo de la industria, interesada en poder utilizar masivamente las grandes capacidades de la fibra ya instalada. Desde hace varios años existen productos comerciales, lo que hace prever un rápido desarrollo e implantación de esta tecnología.

Actualmente existen en el mercado productos que permiten agregar hasta 32 enlaces full dúplex. Sin embargo parece que cuatro es un límite razonable, ya que al aumentar el número de enlaces la eficiencia disminuye, y por otro lado el costo de las interfaces aconseja en ese caso pasar a la velocidad superior en vez de agregar enlaces. Los enlaces pueden ser de 10, 100 o 1000 Mb/s, pero han de ser todos de la misma velocidad.

La agregación de enlaces requiere evidentemente el uso de múltiples cables, cosa que no siempre es posible, sobre todo si se trata de enlaces a gran distancia. En el caso de fibra óptica monomodo el problema puede resolverse mediante la técnica WDM (Wavelength Division Multiplexing) que consiste en multiplexar varias señales en una misma fibra utilizando longitudes de onda ligeramente distintas dentro de la misma ventana (equivalente a usar luz de diferentes 'colores'). Existen dispositivos comerciales que pueden utilizarse para multiplexar cuatro señales Gigabit Ethernet en una misma fibra, pudiendo así transmitir 4 Gb/s full dúplex por un solo par de fibras. Como detalle curioso comentaremos que con WDM también es posible multiplexar el canal de ida y el de vuelta en una misma fibra, con lo que es posible tener comunicación full dúplex por una sola fibra.

3.12.- Calidad de servicio y prioridades en Ethernet

Hay dos sucomités del IEEE, el 802.1p y el 802.1Q, que han estudiado la posibilidad de ofrecer un mecanismo para 'etiquetar' tramas de forma que, entre otras cosas, pueda indicarse la prioridad o clase de servicio deseada.

Es dudosa la utilidad que los mecanismos de asignación de prioridades puedan tener en la red local, ya que el ancho de banda es tan barato que en la mayoría de casos puede ser más sencillo sobredimensionar los enlaces adecuadamente para evitar la congestión. Otra cosa sería en las eventuales aplicaciones futuras de Ethernet en redes metropolitanas o de área extensa, donde el aumento de capacidad puede tener unos costos importantes.

Por otro lado, el uso de un sistema de prioridades o reserva de recursos requiere mecanismos de control de acceso y contabilidad de recursos consumidos, a fin de que el usuario utilice los privilegios con moderación. A modo de ejemplo cabe mencionar aquí el caso de Token Ring, que dispone de ocho niveles de prioridad posibles, de forma que en teoría es una red más adecuada que por ejemplo Ethernet para tráfico en tiempo real. Prácticamente todas las aplicaciones que se han escrito para Token Ring emiten sus tramas en la prioridad más alta, ya que ningún programador está interesado en ceder el paso al resto de aplicaciones. Como consecuencia de esto el campo prioridad solo ha servido para complicar inútilmente la implementación de Token Ring, y con ello el costo de esta red.

En todo caso los desarrollos en Ethernet se centran en la definición de prioridades o clases de servicio más que en calidad de servicio propiamente dicha, entendiendo por esta última la posibilidad de reservar a priori recursos en la red. La calidad de servicio está muy relacionada con las redes orientadas a conexión, por lo que no es un mecanismo que se pueda implementar de manera fácil en Ethernet. Sin embargo parece que la combinación de un mecanismo de prioridades y la flexibilidad de redimensionar adecuadamente los enlaces críticos de la red puede dar una respuesta aceptable a las necesidades de tráfico en tiempo real, tales como aplicaciones multimedia.

3.13.- Planificación de capacidad. Dimensionamiento

El responsable de una red local tiene a menudo que plantearse la mejora de partes de la misma para evitar que los niveles de saturación produzcan una merma en la calidad de servicio percibida por los usuarios, cosa que no debería ocurrir en una red local donde en principio el ancho de banda está disponible a bajo costo.

Para esta toma de decisiones es necesario disponer de parámetros de medida objetivos, que nos permitan comparar los niveles de calidad de servicio de acuerdo con criterios homogéneos para toda la red. Como ya hemos comentado las colisiones de una red Ethernet no son en sí mismas una medida adecuada del grado de saturación de una red, ya que su interpretación está íntimamente ligada al tamaño de trama medio de una red.

Un parámetro mucho más apropiado es el nivel de ocupación medio de la red. Este valor puede obtenerse a partir de los contadores de tráfico de las interfaces en los diversos dispositivos de la red (conmutadores, routers, etc.), por ejemplo cada cinco minutos vía SNMP. De esta forma es posible calcular y representar gráficamente el tráfico medio en una red a intervalos de cinco minutos. Una vez hemos recopilado esta información para todas las interfaces que constituyen nuestra red local podemos comparar los valores y aplicar criterios objetivos para decidir donde es pertinente adoptar medidas para ampliar la capacidad.

Según Seifert, en el caso de una red local utilizada para aplicaciones típicas de ofimática con decenas de estaciones por red se puede considerar que se da una carga excesiva en la red si se da alguna de las siguientes circunstancias:

- Se supera el 50% de ocupación durante 15 minutos, o
- Se supera el 20-30% durante una hora, o
- Se supera el 10-20% durante ocho horas.

En principio una red podría estar al 100% de ocupación durante cinco minutos, y eso no sería motivo para plantearse un aumento de capacidad. La razón es la siguiente: esa ocupación podría estar provocada por un usuario que transfiere un fichero grande (por ejemplo 400 Mbytes en una red de 10 Mb/s). Si ese tipo de utilización es esporádico normalmente el tiempo de respuesta será aceptable, y si es frecuente provocará que se supere alguno de los umbrales antes mencionados.

Una posible excepción a la regla anterior serían las redes en las que se utilicen aplicaciones en tiempo real (vídeoconferencia o vídeo bajo demanda, por ejemplo). En este caso el criterio debería ser mas exigente (por ejemplo 50% de ocupación durante 5 minutos) y aun así se pueden producir colapsos momentaneos. En realidad si se quiere utilizar este tipo de aplicaciones con garantías en una red Ethernet es preciso utilizar conmutadores hasta el puesto del usuario final.

3.14.- Diseño de redes Ethernet

Gracias a los desarrollos habidos en los últimos años Ethernet presenta una enorme gama de posibilidades: diversos medios físicos (cobre y fibra), velocidades (10/100/1000 Mb/s) y modos de funcionamiento (puertos compartidos/conmutados, transmisión half/full dúplex y agregación de enlaces). Esto da una gran versatilidad que permite diseñar una red local completa cualesquiera que sean las necesidades que se presenten. Vamos a dar en este apartado algunas indicaciones generales sobre aspectos a tener en cuenta al diseñar una red local basada en Ethernet.

En primer lugar se plantea la disyuntiva del medio compartido o conmutado, es decir, si se debe conectar los equipos de usuario final a concentradores (hubs) o directamente a conmutadores.

Analizando la evolución a lo largo de varios años del costo por puerto de los concentradores frente a los conmutadores observamos que la diferencia es cada vez menor.

Tipo de red	1991	1993	1996	1998
10 Mb/s compartidos	15-30	7-15	3-10	1,5-6
10 Mb/s conmutados	150-200	40-90	15-30	4-10
Ratio 10 Mb/s	8:1	6:1	3:1	2:1
100 Mb/s compartidos			15-30	5-10
100 Mb/s conmutados			70-150	10-20
Ratio 100 Mb/s			5:1	2:1
1 Gb/s compartidos				(70-150)
1 Gb/s conmutados				(100-300)
Ratio 1 Gb/s				2:1

Tabla 3.19

En 1991 la relación para Ethernet 10 Mb/s conmutado:compartido era de 8:1, mientras que en 1998 se había reducido a 2:1. Una evolución análoga ha ocurrido con Fast Ethernet, que también se encuentra actualmente en 2:1. Es previsible que para Gigabit Ethernet se mantenga una relación similar (en el caso de que se lleguen a desarrollar concentradores de Gigabit Ethernet).

Esta evolución se explica porque el costo de la electrónica de conmutación disminuye a mayor velocidad que el del resto de componentes. Extrapolando los datos de la tabla anterior podemos esperar que el ratio descienda aún más en el futuro. Si además tenemos en cuenta que el costo de la instalación física (cableado) y de las interfaces de red son los mismos en ambos casos, el ratio es aún menor. Por todos estos motivos hoy en día se considera que el diseño de una red Ethernet debe basarse normalmente en el uso de conmutación a nivel del usuario final, es decir se recomienda la completa supresión de los concentradores.

El uso de conmutadores permite suprimir totalmente el protocolo CSMA/CD, y eventualmente extender el funcionamiento en modo full dúplex a toda la red. El uso de la transmisión full dúplex es especialmente importante en el caso de conexiones conmutador-conmutador, conmutador-router y conmutador-servidor.

Respecto a los medios físicos disponemos básicamente de tres alternativas cuyas distancias y costo relativo aparecen en la tabla siguiente:

Medio físico	10 Mb/s	100 Mb/s	1000 Mb/s	Costo relativo
Cobre UTP-5	150 m	100 m	100 m (futura)	1
F.O. 1ª ventana	2 Km	500 m	275-550m	2
F.O. 2ª ventana	-	2 Km	550m-5Km	6

Tabla 3.20

A pesar del desarrollo de optoelectrónica VCSEL de bajo costo en primera ventana, las interfaces en fibra óptica seguirán siendo más caras que las de UTP-5. Por tanto es preferible utilizar cable de cobre siempre que las distancias lo permitan, salvo que las condiciones ambientales aconsejen otra cosa.

En cuanto a la elección de velocidad de la red, esto dependerá evidentemente del tipo de aplicaciones y de las necesidades. A título orientativo daremos las siguientes indicaciones:

Equipo a conectar	Tipo de conexión aconsejada
Puesto de trabajo	<ul style="list-style-type: none"> • 10BASE-T conmutada full duplex • 100BASE-TX conmutada full duplex
Servidor	<ul style="list-style-type: none"> • 100BASE-TX conmutada full duplex • 2, 3 ó 4 100BASE-X conmutada full duplex (etherchannel, 802.3ad) • 1000BASE-TX conmutada full duplex con buffered repeater
Backbone (conmutador-conmutador)	<ul style="list-style-type: none"> • 100BASE-X conmutada full duplex • 2, 3 ó 4 100BASE-X conmutada full duplex (etherchannel, 802.3ad) • 1000BASE-X conmutada full duplex • 2, 3 ó 4 1000BASE-X conmutada full duplex (etherchannel, 802.3ad)

Tabla 3.21

3.15.- 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. Es muy posible que cuando aparezca la tarjeta con interfaz 1000BASE-TX tenga un precio similar al de la OC-3c. 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 discorra 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.

3.16.- 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 $20 * 4/5 = 16$ Mb/s. Solo están soportados 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.

3.- ETHERNET	1
3.1.- Historia de Ethernet	1
3.2.- El medio físico	10
3.2.1.- Cable coaxial y conectores	10
3.2.1.- Par trenzado.....	11
3.2.3.- Fibras ópticas	12
3.2.4.- Fiabilidad.....	15
3.2.5.- Dispositivos Ethernet.....	15
3.3.- Codificación.....	16
3.4.- Topología	19
3.4.1.- Configuración de una Ethernet a 10 Mbps	19
3.4.2- Configuración de una Ethernet a 100 Mbps	21
4.4.3- Configuración de una Gigabit Ethernet	23
3.5.- La trama Ethernet/802.3	24
3.6.- Direcciones IEEE.....	27
3.7.- Método de Control de Acceso al Medio.....	27
3.7.1.- La colisión	28
3.7.2.- Excesivas colisiones y colisiones tardías	30
3.8.- Capacidad de Ethernet	31
3.8.1.- Tasa de colisiones y rendimiento.....	33
3.8.2.- Reparto no equilibrado de recursos y Efecto captura	34
3.9.- Transmisión full dúplex y control de flujo.....	35
3.9.1.- Control de flujo	36
3.10.- Autonegociación	37
3.11.- Agregación de enlaces, trunking o multiplexado inverso.....	38
3.12.- Calidad de servicio y prioridades en Ethernet.....	39
3.13.- Planificación de capacidad. Dimensionamiento.....	39
3.14.- Diseño de redes Ethernet.....	40
3.15.- Comparación con otras tecnologías	41
3.16.- Ethernet isócrona.....	42