

Redes LAN de alta velocidad

16.1. Surgimiento de las redes LAN de alta velocidad

16.2. Ethernet

Control de acceso al medio en IEEE 802.3

Especificaciones IEEE 802.3 10 Mbps (Ethernet)

Especificaciones IEEE 802.3 100 Mbps (Fast Ethernet)

Gigabit Ethernet

Ethernet de 10 Gpbs

16.3. Anillo con paso de testigo

Funcionamiento del anillo

Control de acceso al medio

Opciones de medios de transmisión en IEEE 802.5

16.4. Canal de fibra

Elementos del canal de fibra

Arquitectura de protocolos del canal de fibra

Medios físicos y topologías del canal de fibra

Perspectivas del canal de fibra

16.5. Lecturas y sitios web recomendados

16.6. Términos clave, cuestiones de repaso y ejercicios

Términos clave

Cuestiones de repaso

Ejercicios

Apéndice 16A. Codificación de señales digitales para redes LAN

4B/5B-NRZI

MLT-3

8B6T

8B/10B

Apéndice 16B. Análisis de prestaciones

Efecto del retardo de propagación y la velocidad de transmisión

Modelos sencillos de eficiencia para las técnicas de paso de testigo y CSMA/CD



CUESTIONES BÁSICAS

- El estándar IEEE 802.3, conocido como Ethernet, comprende actualmente velocidades de datos de 10 Mbps, 100 Mbps, 1Gbps y 10 Gbps. En el caso de las velocidades más bajas se utiliza el protocolo MAC CSMA/CD, mientras que a 1 Gbps y 10 Gbps se emplea una técnica de conmutación.
- El estándar de paso de testigo IEEE 802.5 ofrece velocidades de datos desde 4 Mbps hasta 1 Gbps.
- El canal de fibra es una red conmutada de nodos diseñada para proporcionar enlaces de alta velocidad para aplicaciones como las redes de almacenamiento.



Los años recientes han sido testigos de cambios vertiginosos en aspectos como la tecnología, el diseño y las aplicaciones comerciales de las redes de área local (LAN, *Local Area Network*). Una de las principales características de esta evolución es la introducción de toda una gama de nuevos esquemas en las redes locales de alta velocidad. Los distintos enfoques para el diseño de redes LAN de alta velocidad se han plasmado en productos comerciales con objeto de dar solución a las continuas necesidades del mercado. De entre ellas, las más importantes son:

- **Fast Ethernet y Gigabit Ethernet:** la extensión de la técnica de acceso múltiple con detección de portadora y detección de colisiones de 10 Mbps (*CSMA/CD, Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection*) a altas velocidades constituye una estrategia lógica, puesto que tiende a preservar la inversión realizada en los sistemas actuales.
- **Canal de fibra:** este estándar proporciona una solución de bajo coste y fácilmente escalable para alcanzar tasas de datos elevadas en áreas locales.
- **Redes LAN inalámbricas de alta velocidad:** la tecnología y estándares de redes LAN inalámbricas han alcanzado por fin madurez y las normativas y productos de alta velocidad están siendo introducidos.

La Tabla 16.1 enumera algunas de las características de estos enfoques. El contenido restante de este capítulo aborda en mayor profundidad los detalles concernientes a Ethernet, canal de fibra y anillo con paso de testigo. Por su parte, las redes LAN inalámbricas serán tratadas en el Capítulo 17.

Tabla 16.1. Características de algunas redes LAN de alta velocidad.

	Fast Ethernet	Gigabit Ethernet	Canal de fibra	LAN inalámbrica
Velocidad de datos	100 Mbps	1 Gbps, 10 Gbps	100 Mbps-3,2 Gbps	1 Mbps-54 Mbps
Medio de transmisión	UTP, STP, fibra óptica	UTP, cable apantallado, fibra óptica	Fibra óptica, cable coaxial, STP	Microondas, 2,4 GHz, 5 GHz
Método de acceso	CSMA/CD	Conmutado	Conmutado	CSMA/Sondeo
Estándar	IEEE 802.3	IEEE 802.3	Asociación del canal de fibra	IEEE 802.11

16.1. SURGIMIENTO DE LAS REDES LAN DE ALTA VELOCIDAD

Los computadores personales y las estaciones de trabajo comenzaron a recibir una amplia aceptación en los entornos comerciales a principios de la década de los ochenta, habiendo alcanzado actualmente un estatus similar al del teléfono: **una herramienta esencial en cualquier oficina**. Hasta hace relativamente poco, las redes LAN en las oficinas proporcionaban servicios básicos de conectividad (conexión de computadores personales y terminales a grandes servidores y estaciones que ejecutaban aplicaciones corporativas) y ofrecían una conectividad para trabajo en grupo entre departamentos o divisiones. Los patrones de tráfico en ambos casos presentaban una carga relativamente baja, estando principalmente influenciados por la transferencia de ficheros y de correo electrónico. Las redes que se encontraban disponibles para este tipo de carga, principalmente Ethernet y anillo con paso de testigo, se ajustaban satisfactoriamente a tales entornos.

En los últimos años se han manifestado **dos tendencias significativas que han alterado el papel que desempeñan los computadores personales y, por tanto, los requisitos de las redes LAN:**

- **La velocidad y potencia de cálculo de los computadores personales ha continuado disfrutando de un crecimiento explosivo.** Actualmente, las plataformas más potentes soportan aplicaciones con un alto contenido en gráficos e incluso sistemas operativos con una interfaz gráfica de usuario muy elaborada.
- **Las organizaciones de gestión de sistemas de información han reconocido las redes LAN no sólo como una tecnología viable sino también esencial, promoviendo así el trabajo en red.** Esta tendencia comenzó con el **paradigma cliente/servidor**, que se ha convertido en la arquitectura dominante en los **entornos de negocio** y, más recientemente, **en las redes privadas**. Estos dos enfoques implican transferencias frecuentes de volúmenes de datos potencialmente grandes en un entorno orientado a transacciones.

El efecto de estas tendencias ha sido **el incremento del volumen de datos que debe ser manejado por las redes LAN** y, dado que las **aplicaciones son más interactivas**, una reducción del retardo aceptable en las transferencias. **La primera generación de Ethernet de 10 Mbps y anillo con paso de testigo de 16 Mbps simplemente no fueron diseñadas para dar cabida a estos requisitos.**

Los siguientes ejemplos ilustran algunos entornos que requieren redes LAN de alta velocidad:

- **Agrupación centralizada de servidores:** en muchas aplicaciones existe la necesidad de que los sistemas cliente sean capaces de recuperar cantidades enormes de datos de un conjunto centralizado de servidores (*server farm*). Un ejemplo lo constituyen las aplicaciones de publicación de contenidos en color, en las que los servidores contienen generalmente decenas de gigabytes de imágenes que deben ser descargadas a las estaciones de dibujo. A medida que el **rendimiento de los servidores se incrementa, el cuello de botella se ha ido desplazando hacia la red**. Una Ethernet conmutada no resolvería este problema debido al límite de 10 Mbps por enlace hacia el cliente.
- **Grupos de trabajo con altos requisitos:** estos grupos constan generalmente de un número reducido de usuarios que **cooperan entre sí y que mueven archivos masivos de datos a lo largo de la red**. Algunos ejemplos son los grupos de desarrollo de software que ejecutan comprobaciones sobre una versión nueva de un software, o **una compañía de diseño asistido por computador (CAD) que ejecuta regularmente simulaciones de los nuevos diseños**. En estos casos existe una gran cantidad de datos que es **distribuida a varias estaciones de trabajo, procesada en las mismas y devuelta de nuevo a una alta velocidad**, repitiéndose iterativamente este proceso.

- **Red troncal local de alta velocidad:** a medida que las demandas de capacidad de procesamiento crecen, las redes LAN proliferan en una entidad y se hace cada vez más necesario proporcionar una interconexión de alta velocidad entre ellas.

16.2. ETHERNET

Las redes LAN de alta velocidad más ampliamente utilizadas en la actualidad son las basadas en Ethernet, desarrolladas por el comité de estándares IEEE 802.3. Al igual que sucede con otros estándares de redes LAN, existe una capa de control de acceso al medio y una capa física las cuales se estudian a continuación.

CONTROL DE ACCESO AL MEDIO EN IEEE 802.3

El funcionamiento de la técnica CSMA/CD se puede entender más fácilmente si primero se estudian los esquemas a partir de los que evolucionó.

Precusores

La técnica CSMA/CD y sus precursoras pueden ser denominadas de acceso aleatorio o de contención. Se denominan de acceso aleatorio en el sentido de que no existe un tiempo preestablecido o predecible para que las estaciones transmitan, sino que las transmisiones se organizan aleatoriamente. Son de contención en el sentido de que las estaciones compiten para conseguir el acceso al medio.

Aleatorio , Contención (compiten)

La primera de estas técnicas, conocida como ALOHA, se desarrolló para redes de paquetes de radio, siendo, a pesar de ello, aplicable a cualquier medio de transmisión compartido. ALOHA, o ALOHA puro, como también es denominado algunas veces, permite que una estación transmita una trama siempre que lo necesite. A continuación la estación pasa a escuchar el medio durante un tiempo igual al máximo retardo de propagación posible de ida y vuelta a través de la red (igual a dos veces el tiempo de propagación de una trama entre las dos estaciones más separadas) más un pequeño incremento fijo de tiempo. Se considerará que todo ha ido bien si durante este intervalo de escucha la estación oye una confirmación; en caso contrario, retransmitirá la trama. La estación desistirá si no recibe una confirmación después de varias retransmisiones. Una estación receptora determina si una trama recibida es correcta examinando el campo de la secuencia de comprobación de la trama, al igual que se hace en HDLC. Si la trama es válida y la dirección de destino en la cabecera de la trama coincide con la de la receptora, la estación devuelve inmediatamente una confirmación. La trama puede ser incorrecta debido a la presencia de ruido en el canal o debido a que otra estación transmitiera una trama casi al mismo tiempo. En este último caso, las dos tramas pueden interferir entre sí en el receptor, de modo que no se acepte ninguna; esto se conoce como colisión. Si se decide que la trama recibida no es válida, la estación receptora simplemente ignorará la trama.

Tx ->



x
2 * Tprop+
T proc.

Si ACK =>ok
si no Retransmito!

ALOHA es una técnica extremadamente sencilla, debido a lo cual presenta algunos puntos débiles. Dado que el número de colisiones crece rápidamente cuando aumenta la carga, la utilización máxima del canal es sólo del orden del 18 por ciento. Ethernet 80%!!

Con objeto de mejorar la eficiencia se desarrolló una modificación sobre ALOHA, conocida como ALOHA ranurado. En este esquema el tiempo del canal se hace discreto, considerando ranu-

En Aloja, es escenario era de enlaces punto a punto en la Isla de Hawaii, para ese escenario (distancias y velocidad de propagación) los tiempos de propagación no eran despreciables como lo son en un cable UTP de 100 metros.

ras uniformes de duración igual al tiempo de transmisión de una trama. Para este fin es necesario el uso de un reloj central u otra técnica que permita sincronizar todas las estaciones. La transmisión sólo se permite en los instantes de tiempo que coincidan con el comienzo de una ranura. Así, las tramas que se solapan lo harán completamente, lo que incrementa la utilización máxima del sistema hasta el 37 por ciento aproximadamente. > 18% casi el doble con solo limitar el tiempo de contienda

Tanto ALOHA como ALOHA ranurado presentan una utilización baja del canal. Ninguna de las dos técnicas aprovecha una de las propiedades más importantes en las redes de paquetes de radio y redes LAN, consistente en que el retardo de propagación entre las estaciones es generalmente muy pequeño en comparación con el tiempo de transmisión de las tramas. Consideremos las siguientes observaciones. Si el tiempo de propagación entre estaciones fuese grande en comparación con el tiempo de transmisión, entonces, tras la transmisión de una trama deberá transcurrir mucho tiempo antes de que otras estaciones constaten este hecho. Una de las otras estaciones puede transmitir una trama durante ese intervalo de tiempo, de modo que las dos tramas pueden interferir entre sí y no se aceptará ninguna de ellas. De hecho, si las distancias son suficientemente grandes, pueden comenzar a transmitir varias estaciones una tras otra, y ninguna de sus tramas resultará ilesa. Supongamos, sin embargo, que el tiempo de propagación es pequeño comparado con el de transmisión. En este caso, cuando una estación transmita una trama, el resto de estaciones lo sabrá casi inmediatamente. De esta manera, si pueden constatar esta circunstancia de algún modo, no intentarán transmitir hasta que lo haya hecho la primera. Las colisiones no serán habituales, ya que sólo ocurrirán cuando dos estaciones comiencen a transmitir casi simultáneamente. Otra forma de verlo es que un tiempo de retardo pequeño proporciona a las estaciones una mejor realimentación sobre el estado de la red; esta información se puede usar para mejorar la eficiencia.

Estas observaciones condujeron al desarrollo de la técnica de acceso múltiple con detección de portadora (CSMA, *Carrier Sense Multiple Access*). Con CSMA, una estación que desee transmitir escuchará primero el medio para determinar si existe alguna otra transmisión en curso (detección de portadora). Si el medio está siendo usado, la estación deberá esperar. En cambio, si éste se encuentra libre, la estación podrá transmitir. Puede suceder que dos o más estaciones intenten transmitir aproximadamente al mismo tiempo, en cuyo caso se producirá colisión: los datos de ambas transmisiones interferirán y no se recibirán con éxito. Para solucionar esto, las estaciones aguardan una cantidad de tiempo razonable después de transmitir en espera de una confirmación, teniendo en consideración el retardo de propagación máximo del trayecto de ida y vuelta y el hecho de que la estación que confirma debe competir también por conseguir el medio para responder. Si no llega la confirmación, la estación supone que se ha producido una colisión y retransmite.

memoria
ack

Podemos ver cómo esta estrategia resulta efectiva para redes en las que el tiempo de transmisión de trama es mucho mayor que el de propagación. Las colisiones sólo se producirán en el caso de que más de un usuario comience a transmitir dentro del mismo intervalo de tiempo (igual al periodo de propagación). Si una estación comienza a transmitir una trama y no existen colisiones durante el tiempo de propagación que transcurre desde el inicio de la transmisión del paquete hasta que alcanza a la estación más lejana, no se producirá colisión para esta trama dado que ahora todas las estaciones están enteradas de la transmisión.

La utilización máxima que se puede conseguir haciendo uso de CSMA puede superar con mucho la de ALOHA ranurado. La utilización máxima depende de la longitud de la trama y del tiempo de propagación; cuanto mayor sea la longitud de las tramas o cuanto menor sea el tiempo de propagación, mayor será la utilización.

En CSMA se precisa de un algoritmo que determine qué debe hacer una estación si encuentra el medio ocupado. Tres enfoques para resolver este problema se describen en la Figura 16.1. En el

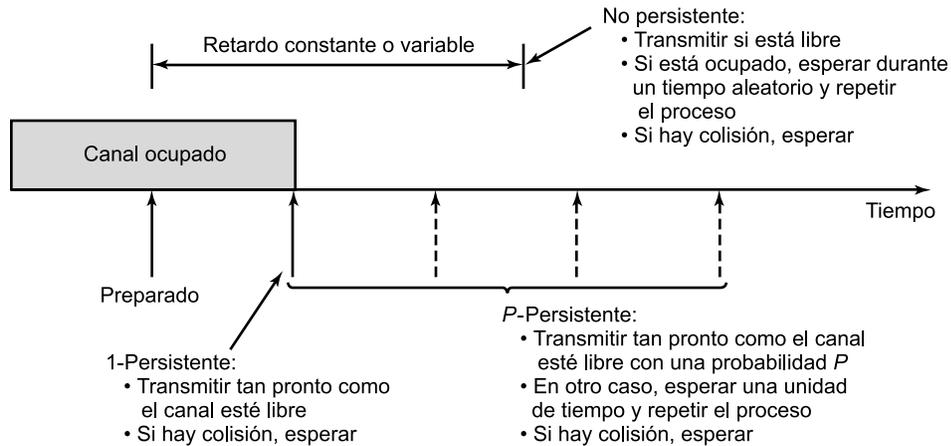


Figura 16.1. Persistencia y espera en CSMA.

primero de ellos, denominado **CSMA no persistente**, una estación que desee transmitir escuchará el medio y procederá según las siguientes reglas:

1. Si el medio se encuentra libre, transmite; en otro caso se aplica el paso 2.
2. Si el medio se encuentra ocupado, **espera una cierta cantidad de tiempo** obtenida de una distribución de probabilidad (retardo de retransmisión) y repite el paso 1.

El uso de retardos aleatorios reduce la probabilidad de las colisiones. Para ver esto mejor, considérese que dos estaciones se encuentran listas para transmitir aproximadamente al mismo tiempo, mientras que otra transmisión se encuentra en curso. Si ambas estaciones esperan la misma cantidad de tiempo antes de intentarlo de nuevo, las dos intentarán transmitir aproximadamente al mismo tiempo. Un problema de CSMA no persistente es que se desaprovecha la capacidad debido a que el medio permanecerá libre justo tras el fin de una transmisión incluso si una o más estaciones se encuentran listas para transmitir.

Para evitar los intervalos en los que el medio se encuentra libre se puede utilizar el protocolo **CSMA 1-persistente**. Una estación que desee transmitir escuchará el medio y actuará de acuerdo con las siguientes reglas:

1. Si el medio se encuentra libre, transmite; en otro caso se aplica el paso 2.
2. Si el medio está ocupado, continúa escuchando hasta que el **canal se detecte libre, momento en el cual se transmite inmediatamente**.

Mientras que con CSMA no persistente una estación actúa de un modo más deferente, en el caso de CSMA 1-persistente el comportamiento es más egoísta. Si dos o más estaciones desean transmitir, se garantiza que se producirá una colisión. La técnica sólo toma medidas tras la colisión.

La técnica **CSMA p -persistente** representa un compromiso entre reducir el número de colisiones, como en el caso de no persistente, y reducir el tiempo de desocupación del canal, como en 1-persistente. Las reglas que se aplican son las siguientes:

1. Si el medio se encuentra libre, entonces se transmite con una probabilidad p y se espera una unidad de tiempo con una probabilidad $(1 - p)$. La unidad de tiempo es generalmente igual al retardo máximo de propagación.

2. Si el medio está ocupado, se continúa escuchando hasta que se detecte libre y se repite el paso 1.
3. Si la transmisión se ha retardado una unidad de tiempo, se repite el paso 1.

La cuestión que se plantea es la de cuál es un valor efectivo para p . El principal problema que se debe evitar es el de la inestabilidad en condiciones de carga elevada. Considérese el caso en el que n estaciones disponen de tramas para enviar mientras que se está produciendo una transmisión. Cuando ésta termine, el número esperado de estaciones que intentarán transmitir es igual a n veces la probabilidad de transmitir, siendo n el número de estaciones que se encuentran listas para transmitir; esto es, np . Si np es mayor que 1, existirán, en término medio, varias estaciones que intentarán transmitir y se producirá una colisión. Lo que es más, tan pronto como estas estaciones se percaten de que su transmisión ha sufrido una colisión, volverán a intentarlo, casi garantizando así más colisiones. Otro hecho que agrava esta situación es que todos estos reintentos deberán competir con nuevas transmisiones realizadas por otras estaciones, lo que incrementa aún más la probabilidad de colisión. Eventualmente, todas las estaciones estarán intentando enviar, causando colisiones de forma continua y haciendo así que el rendimiento decaiga hasta cero. Para evitar esta catástrofe, np debe ser menor que 1 para los picos esperados de n . Por tanto, si es de esperar que las condiciones de alta carga se den con cierta regularidad, p debe ser pequeño. Sin embargo, a medida que p se hace pequeño, las estaciones esperarán más tiempo hasta intentar transmitir de nuevo. En condiciones de baja carga esto conducirá a retardos muy elevados. Por ejemplo, si sólo una estación deseara transmitir, el número esperado de iteraciones del paso 1 es de $1/p$ (véase el Ejercicio 16.2). Así, para $p = 0,1$ y en condiciones de baja carga, una estación esperará una media de 9 unidades de tiempo antes de transmitir sobre un medio libre.

Descripción de CSMA/CD

CSMA, aunque más eficiente que ALOHA y que ALOHA ranurado, presenta también una ineficiencia manifiesta. Cuando dos tramas colisionan, el medio permanece inutilizable mientras dure la transmisión de ambas tramas dañadas. En el caso de que la longitud de las tramas sea elevada en comparación con el tiempo de propagación, la cantidad de tiempo desaprovechado puede ser considerable. Este desaprovechamiento de la capacidad puede reducirse si una estación continúa escuchando el medio mientras dure la transmisión. La inclusión de esta característica conduce a las siguientes reglas para CSMA/CD:

1. Si el medio se encuentra libre, transmite; en otro caso se aplica el paso 2.
2. Si el medio se encuentra ocupado, continúa escuchando hasta que el canal se libere, en cuyo caso transmite inmediatamente.
3. Si se detecta una colisión durante la transmisión, se transmite una pequeña señal de interferencia para asegurarse de que todas las estaciones constaten la colisión. A continuación, se deja de transmitir.
4. Tras la emisión de la señal de interferencia, la estación espera una cantidad aleatoria de tiempo conocida como *espera (backoff)*, intentando transmitir de nuevo a continuación (volviendo al paso 1).

Exponencial Binario.

La Figura 16.2 ilustra esta técnica para un bus en banda base. En t_0 , la estación A comienza a transmitir un paquete destinado a D. En t_1 , tanto B como C están listos para transmitir. B detecta una transmisión en curso y pospone la suya. C, sin embargo, aún no se ha percatado de la transmisión de A (porque el primer bit de la transmisión de A todavía no ha alcanzado el punto en el que se encuentra C) y comienza a transmitir. Cuando la transmisión de A alcanza C en t_2 , C detecta la

colisión y cesa de transmitir. El efecto de la colisión se propaga hasta A, punto en el que es detectado en un instante posterior, t_3 , siendo en ese momento cuando A deja de transmitir.

Con CSMA/CD, la cantidad de tiempo desaprovechado se reduce al tiempo que se necesita para detectar una colisión. La pregunta es, por supuesto, cuánto tiempo lleva esto. Consideremos el caso de un bus en banda base y dos estaciones tan separadas como sea posible. Por ejemplo, en la Figura 16.2, supongamos que la estación A comienza a transmitir y que, justo antes de que la transmisión alcance a D, éste se encuentra listo para transmitir. Puesto que D no es todavía consciente de la transmisión de A, aquél comenzará a transmitir. La colisión se producirá casi inmediatamente y así será reconocida por D. Sin embargo, la colisión deberá propagarse por todo el medio hasta alcanzar a A antes de que éste se percate. Siguiendo este razonamiento podemos concluir que la cantidad de tiempo involucrada en detectar una colisión no es mayor que dos veces el retardo de propagación extremo a extremo.

Una regla importante aplicada en la mayor parte de los sistemas CSMA/CD, incluyendo las normalizaciones IEEE, consiste en que la trama debe ser lo suficientemente larga como para permitir la detección de la colisión antes de que finalice la transmisión. Si se usan tramas más cortas,

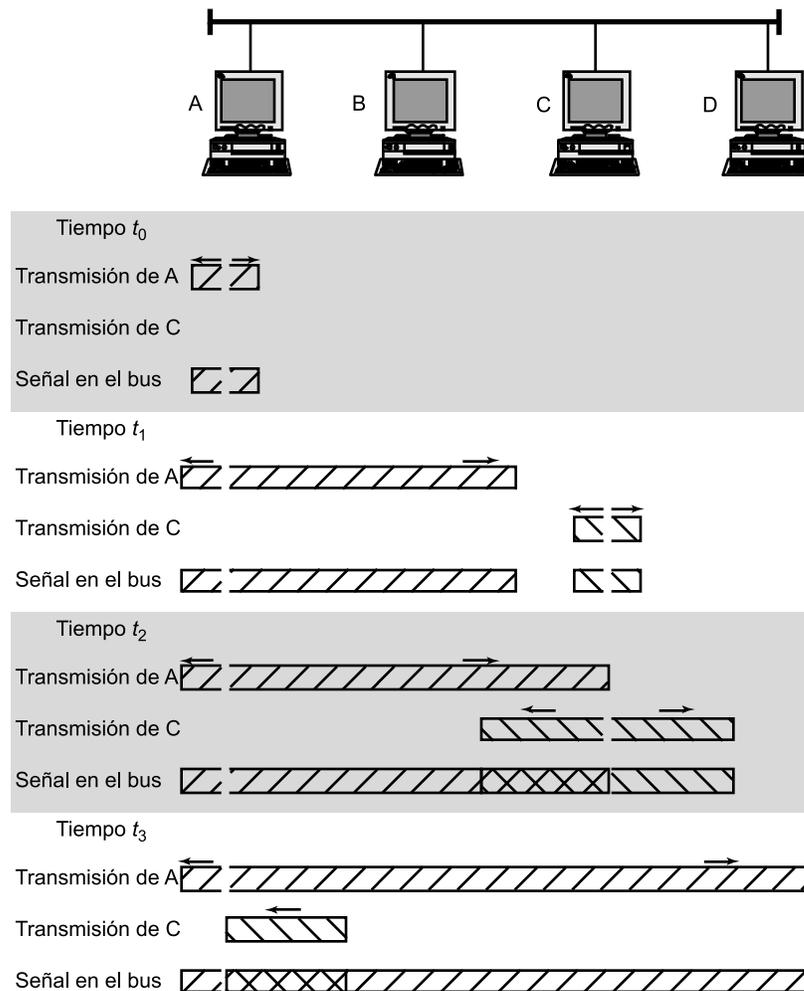


Figura 16.2. Funcionamiento de CSMA/CD.

no se produce la detección de la colisión, presentando la técnica CSMA/CD las mismas prestaciones que el protocolo CSMA menos eficiente.

En una red LAN CSMA/CD se plantea la cuestión de qué algoritmo de persistencia utilizar. Podría parecer sorprendente el hecho de que el algoritmo usado en el estándar IEEE 802.3 es el 1-persistente. Recuérdese que tanto el no persistente como el p -persistente presentan problemas de rendimiento. En el caso del no persistente, la capacidad se desaprovecha porque el medio permanece generalmente desocupado tras el fin de una transmisión, incluso si hay estaciones esperando para transmitir. En el caso del algoritmo p -persistente, el parámetro p debe ser lo suficientemente bajo como para evitar la inestabilidad, resultando ocasionalmente en retardos enormes en condiciones de carga elevada. El algoritmo 1-persistente, que implica, después de todo, hacer $p = 1$, parece ser incluso más inestable que el p -persistente debido a la avaricia de las estaciones. El punto a su favor es que el tiempo desaprovechado debido a las colisiones es muy pequeño (si las tramas son largas en comparación al retardo de propagación) y, considerando un tiempo de espera aleatorio, no es probable que las dos estaciones involucradas en una colisión vuelvan a estarlo en sus siguientes reintentos. Con objeto de asegurar que la espera mantenga la estabilidad, las redes IEEE 802.3 y Ethernet usan una técnica conocida como **espera exponencial binaria** (*binary exponential backoff*). En esta técnica, la estación intentará transmitir cada vez que colisione. Durante los primeros 10 intentos de retransmisión, el valor medio del tiempo de espera se dobla cada vez. A partir de ahí, este valor permanece igual durante 6 intentos adicionales. Después de 16 intentos sin éxito, la estación abandona e informa de un error. De esta forma, a medida que la congestión crece, las estaciones esperan para transmitir periodos de tiempo cada vez más largos, reduciendo así la probabilidad de una colisión.

Eficacia en amplio rango de carga

La elegancia del algoritmo 1-persistente con espera exponencial binaria viene dada por su eficiencia frente a un amplio rango de condiciones de carga. En condiciones de baja carga, garantiza que una estación puede usar el canal tan pronto como éste se libere, en contraposición a los esquemas de no persistencia y p -persistencia. En condiciones de alta carga es, al menos, tan estable como las otras técnicas. No obstante, un desafortunado efecto del algoritmo de espera es que provoca un efecto de último-en-llegar, primero-en-salir: las estaciones sin colisiones o con muy pocas tendrán una oportunidad de transmitir antes de aquellas que llevan esperando más tiempo.

En buses en banda base, una colisión implicará la aparición de niveles de tensión superiores a los que cabría esperar en el caso de una transmisión sin colisiones. Consecuentemente, el estándar IEEE dicta que el transmisor detectará una colisión si la señal presente en el cable en el punto de conexión es mayor que el máximo nivel que se podría producir si se tratara de una única transmisión. Debido a que la señal se atenúa con la distancia, aparece un problema potencial: si dos estaciones muy distantes están transmitiendo, la señal que reciban la una de la otra estará muy atenuada. La energía de la señal recibida podría ser tan pequeña que, una vez sumada a la señal transmitida en el punto de conexión, pudiera ocurrir que la señal combinada no superara el umbral de continua (DC) preestablecido. Esta razón, entre otras, es la que ha justificado que el estándar de IEEE restrinja la longitud máxima del cable coaxial a 500 m en el 10BASE5 y a 200 m en el 10BASE2.

En la topología en estrella con pares trenzados (véase Figura 15.12) es posible utilizar un esquema de detección de colisiones mucho más sencillo. En este caso, la detección de colisiones se basa en magnitudes lógicas en lugar de utilizar niveles de tensión. Se determina que hay colisión si en cualquiera de los concentradores (*hubs*) hay actividad (señal) en más de una entrada, generándose en este caso una señal especial denominada señal de presencia de colisión. Esta señal se genera y se envía mientras se detecte actividad en cualquiera de las líneas de entrada y es interpretada por todos los nodos como la ocurrencia de una colisión.

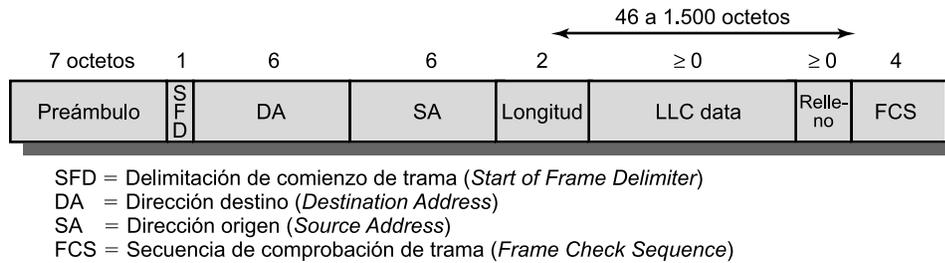


Figura 16.3. Formato de la trama IEEE 802.3.

Trama MAC

La Figura 16.3 muestra el formato de la trama del protocolo 802.3. Ésta consta de los siguientes campos:

- **Preámbulo:** el receptor usa 7 octetos de bits ceros y unos alternados para establecer la sincronización entre el emisor y el receptor.
- **Delimitador del comienzo de la trama (SFD, *Start Frame Delimiter*):** consiste en la secuencia de bits 10101011, que indica el comienzo real de la trama y posibilita que el receptor pueda localizar el primer bit del resto de la trama.
- **Dirección de destino (DA, *Destination Address*):** especifica la estación o estaciones a las que va dirigida la trama. Puede tratarse de una única dirección física, una dirección de grupo o una dirección global.
- **Dirección de origen (SA, *Source Address*):** especifica la estación que envió la trama.
- **Longitud/Tipo:** contiene la longitud del campo de datos LLC expresado en octetos, o el campo Tipo de Ethernet, dependiendo de que la trama siga la norma IEEE 802.3 o la especificación primitiva de Ethernet. En cualquier caso, el tamaño máximo de la trama, excluyendo el preámbulo y el SFD, es de 1518 octetos.
- **Datos LLC:** unidad de datos proporcionada por el LLC.
- **Relleno:** octetos añadidos para asegurar que la trama sea lo suficientemente larga como para que la técnica de detección de colisiones (CD) funcione correctamente.
- **Secuencia de Comprobación de Trama (FCS, *Frame Check Sequence*):** comprobación de redundancia cíclica de 32 bits, calculada teniendo en cuenta todos los campos excepto el preámbulo, el SFD y el FCS.

ESPECIFICACIONES IEEE 802.3 10 Mbps (ETHERNET)

El comité IEEE 802.3 ha sido el más activo en la definición de distintas configuraciones físicas alternativas. Esta proliferación tiene sus ventajas e inconvenientes. Lo positivo es que la normalización responde a la evolución de la tecnología, mientras que el aspecto negativo es que el consumidor, por no mencionar al potencial proveedor, se encuentra con una gran variedad de opciones. Sin embargo, el comité ha trabajado mucho para asegurar que las distintas opciones puedan ser integradas fácilmente en una configuración que satisfaga un gran número de necesidades. Así, el usuario que tiene un conjunto complejo de requisitos puede encontrar una ventaja en la flexibilidad y en la variedad del estándar 802.3.

El comité ha desarrollado una notación concisa con el fin de distinguir las diferentes implementaciones disponibles:

⟨velocidad de transmisión en Mbps⟩⟨método de señalización⟩
longitud máxima del segmento en centenas de metros⟩

Las alternativas definidas son¹:

- **10BASE5:** especifica el uso de cable coaxial de 50 ohmios y señalización digital Manchester². La longitud máxima del segmento de cable se fija a 500 metros. Esta longitud se puede extender mediante la utilización de repetidores. Un repetidor es transparente al nivel MAC y, dado que no gestiona memoria temporal, no aísla un segmento de otro. Así, por ejemplo, si dos estaciones en diferentes segmentos intentan transmitir al mismo tiempo, sus transmisiones colisionarán. Para evitar la aparición de bucles sólo se permite un único camino formado por segmentos y repetidores entre cualesquiera dos estaciones. La normalización permite un máximo de cuatro repetidores en el camino entre cualesquiera dos estaciones, ampliándose así la longitud efectiva del medio hasta 2,5 km.
- **10BASE2:** es similar a 10BASE5, excepto por el uso de un cable más fino que admite tomas de conexión para distancias más cortas que el cable de 10BASE5. Se trata de una alternativa menos costosa a aquél.
- **10BASE-T:** utiliza par trenzado no apantallado en una topología en estrella. Dada la alta velocidad y la baja calidad de las transmisiones sobre este tipo de cable, la longitud de cada enlace se restringe a 100 m. Como alternativa se puede utilizar un enlace de fibra óptica, en cuyo caso la longitud máxima es de 500 m.
- **10BASE-F:** contiene tres especificaciones: una topología en estrella pasiva para la interconexión de estaciones y repetidores con segmentos de hasta 1 km de longitud; un enlace punto a punto que puede ser usado para conectar estaciones o repetidores separados hasta 2 km; y un enlace punto a punto que puede usarse para conectar repetidores a una distancia máxima de 2 km.

Obsérvese que 10BASE-T y 10BASE-F no siguen la notación: «T» se usa para par trenzado y «F» para fibra óptica. La Tabla 16.2 resume estas opciones. Todas las alternativas enumeradas en la tabla especifican una velocidad de datos de 10 Mbps. Además de estas alternativas, existen varias versiones que funcionan a 100 Mbps, 1 Gbps y 10 Gbps, que serán estudiadas más adelante en esta sección.

ESPECIFICACIONES IEEE 802.3 100 Mbps (FAST ETHERNET)

Fast Ethernet es un conjunto de especificaciones desarrolladas por el comité IEEE 802.3 con el fin de proporcionar una red LAN de bajo coste compatible con Ethernet que funcione a 100 Mbps. La designación genérica para estos estándares es 100BASE-T. El comité definió varias alternativas para diferentes medios de transmisión.

¹ Existe también la opción 1BASE-T, que define un sistema de par trenzado a 1 Mbps usando una topología en estrella. Esta opción está obsoleta. Está también la opción 10BROAD36, que corresponde a un bus en banda ancha y que se usa muy poco.

² Véase Sección 5.1.

Tabla 16.2. Alternativas para el medio de transmisión en la capa física IEEE 802.3 a 10 Mbps.

	10BASE5	10BASE2	10BASE-T	10BASE-FP
Medio de transmisión	Cable coaxial (50 ohm)	Cable coaxial (50 ohm)	Par trenzado no apantallado	Par de fibra óptica a 850 nm
Técnica de señalización	Banda base (Manchester)	Banda base (Manchester)	Banda base (Manchester)	Manchester/on-off
Topología	Bus	Bus	Estrella	Estrella
Longitud máxima del segmento (m)	500	185	100	500
Nodos por segmento	100	30	—	33
Diámetro del cable (mm)	10	5	0,4 a 0,6	62,5/125 μm

La Figura 16.4 muestra la terminología utilizada en las distintas especificaciones e indica, asimismo, el medio usado. Todas las opciones 100BASE-T usan el protocolo MAC y el formato de la trama IEEE 802.3. 100BASE-X identifica al conjunto de opciones que usan las especificaciones del medio físico definidas originalmente para FDDI (*Fiber Distributed Data Interface*). Todos los esquemas 100BASE-X emplean dos enlaces físicos entre los nodos, uno para transmisión y otro para recepción. 100BASE-X hace uso de pares trenzado apantallados (STP) o pares trenzados no apantallados (UTP) de alta calidad (categoría 5), mientras que 100BASE-FX hace uso de fibra óptica.

En muchos edificios, cualquiera de las opciones 100BASE-X requiere la instalación de nuevo cableado. En estos casos, 100BASE-T4 define una alternativa menos costosa que puede utilizar UTP de voz de categoría 3 además de UTP de categoría 5 de alta calidad³. Para alcanzar los 100 Mbps en cables de baja calidad, 100BASE-T4 especifica el uso de 4 líneas de par trenzado entre los nodos, de los cuales tres se usan simultáneamente para la transmisión de datos en una dirección.

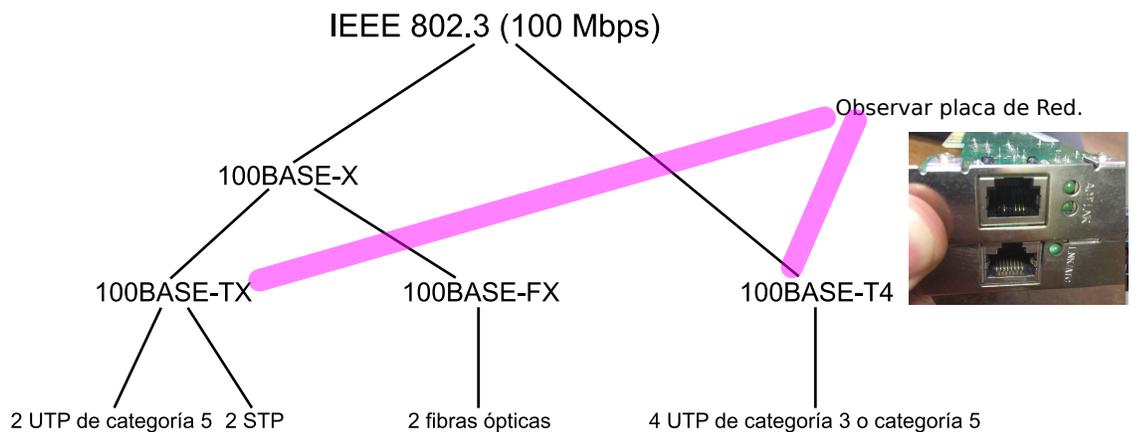


Figura 16.4. Opciones 100BASE-T en IEEE 802.3.

³ Véase el Capítulo 4 para un estudio del cable de tipo 3 y tipo 5.

La topología de todas las opciones 100BASE-T es similar a la de 10BASE-T, que corresponde a una estrella.

La Tabla 16.3 resume las características más importantes de las opciones 100BASE-T.

Tabla 16.3. Alternativas para el medio de transmisión en la capa física IEEE 802.3 100BASE-T.

	100BASE-TX		100BASE-FX	100BASE-T4
Medio de transmisión	2 pares, STP	2 pares, UTP categoría 5	2 fibras ópticas	4 pares, UTP categoría 3, 4 o 5
Técnica de señalización	MLT-3	MLT-3	4B5B, NRZI	8B6T, NRZ
Velocidad de transmisión	100 Mbps	100 Mbps	100 Mbps	100 Mbps
Longitud máxima del segmento	100 m	100 m	100 m	100 m
Cobertura de la red	200 m	200 m	400 m	200 m

100BASE-X un solo medio.

En todos los medios de transmisión especificados en 100BASE-X, los 100 Mbps se consiguen en un solo sentido utilizando un único enlace (par trenzado individual, fibra óptica individual). Para tal fin, en todos los medios se necesita un esquema de codificación de señal que sea efectivo y eficiente. El esquema elegido se definió originalmente para FDDI y se denomina 4B/5B-NRZI. Este esquema se modifica y particulariza en cada opción. Véase el Apéndice 16A para un estudio del mismo.

El esquema 100BASE-X incluye dos especificaciones para el medio físico, una para par trenzado, conocida como 100BASE-TX, y otra para fibra óptica, denominada 100BASE-FX.

100BASE-TX utiliza dos pares de cable de par trenzado, uno para transmisión y otro para recepción. Se permiten tanto STP como UTP de categoría 5, y se usa el esquema de señalización MLT-3 (descrito en el Apéndice 16A).

100BASE-FX utiliza dos fibras ópticas, una para transmitir y otra para recibir. En 100BASE-FX es necesario el uso de algún método para convertir la secuencia de grupos de código 4B/5B-NRZI en señales ópticas. Esta conversión se denomina modulación en intensidad. Un uno binario se representa por un haz o pulso de luz, mientras que un cero binario se representa por la ausencia de pulso de luz o por uno de muy baja intensidad.

Transeiver

1 = Luz
0 = No luz, o luz de baja intensidad.

100BASE-T4

100BASE-T4 está pensado para ofrecer una velocidad de transmisión de datos de 100 Mbps a través de cable de tipo 3 de baja calidad, siguiendo la idea de poder reutilizar las instalaciones existentes de este tipo de cable en edificios de oficinas. La especificación también permite el uso opcional de cable de tipo 5. 100BASE-T4 no transmite una señal continua entre paquetes, lo que lo hace útil para sistemas alimentados por baterías.

Pero NO POE!!



En 100BASE-T4, al utilizar cable de tipo 3 para voz, no es de esperar que los 100 Mbps se obtengan utilizando un único par trenzado. Por el contrario, 100BASE-T4 especifica que la secuencia de datos a transmitir se divida en tres secuencias distintas, cada una de las cuales se transmitirá a una velocidad de transmisión efectiva de 33,3 Mbps. Se usan cuatro pares trenzados, de modo que los datos se transmiten haciendo uso de tres pares y se reciben a través de otros tres. Por tanto, dos de los pares deben configurarse para una transmisión bidireccional.

Como en el caso de 100BASE-X, en 100BASE-T4 no se emplea un esquema de codificación NRZ. Esto requeriría una velocidad de transmisión de datos de 33 Mbps a través de cada par trenzado y no proporcionaría sincronización. En su lugar, se usa un esquema de señalización ternario conocido como 8B6T (descrito en el Apéndice 16A).

Funcionamiento *full-duplex*

Una red Ethernet tradicional es *semi-duplex*: una estación puede transmitir una trama o recibirla, pero no ambas cosas simultáneamente. En el modo de funcionamiento *full-duplex*, una estación puede transmitir y recibir al mismo tiempo, de manera que una Ethernet a 100 Mbps en *full-duplex* alcanzaría, teóricamente, una velocidad de 200 Mbps.

Es preciso introducir algunos cambios para funcionar en modo *full-duplex*. Las estaciones conectadas deben tener tarjetas adaptadoras *full-duplex* en lugar de las *semi-duplex* tradicionales. El punto central en la topología en estrella no puede ser simplemente un repetidor multipuerto, sino un concentrador conmutado. En este caso, cada estación constituye un dominio de colisión separado. De hecho, las colisiones no se producen y el algoritmo CSMA/CD no es necesario. Se sigue utilizando, sin embargo, el mismo formato de trama MAC 802.3 y las estaciones pueden continuar ejecutando el algoritmo CSMA/CD a pesar de que jamás se detectará una colisión.

DOMINIO DE COLISION.

Configuraciones mixtas

Uno de los aspectos positivos de Fast Ethernet es que soporta cómodamente una configuración que incluya diferentes redes LAN a 10 Mbps así como las nuevas a 100 Mbps. Por ejemplo, la tecnología a 100 Mbps puede ser usada como una red LAN troncal que interconecte un cierto número de concentradores de 10 Mbps. Muchas estaciones pueden conectarse a estos concentradores de 10 Mbps usando el estándar 10BASE-T. Los concentradores se conectan a otros concentradores conmutados del tipo 100BASE-T y que soporten enlaces de 10 y 100 Mbps. El resto de estaciones de alta capacidad y servidores pueden conectarse directamente a estos conmutadores 10/100, los cuales se conectan a concentradores de 100 Mbps usando enlaces de 100 Mbps. Los concentradores de 100 Mbps proporcionan una red troncal que puede ser conectada a una red WAN exterior a través de un enrutador.

GIGABIT ETHERNET

A finales del año 1995, el comité IEEE 802.3 formó el grupo de trabajo de alta velocidad con el fin de investigar estrategias para transmitir paquetes con formato Ethernet a velocidades del orden de Gigabits por segundo. Desde entonces se han especificado un conjunto de estándares a 1.000 Mbps.

100 mbps

La estrategia seguida en Gigabit Ethernet es la misma que la adoptada en Fast Ethernet. A pesar de que se define un nuevo medio y una especificación para la transmisión, se sigue adoptando

SWITCH

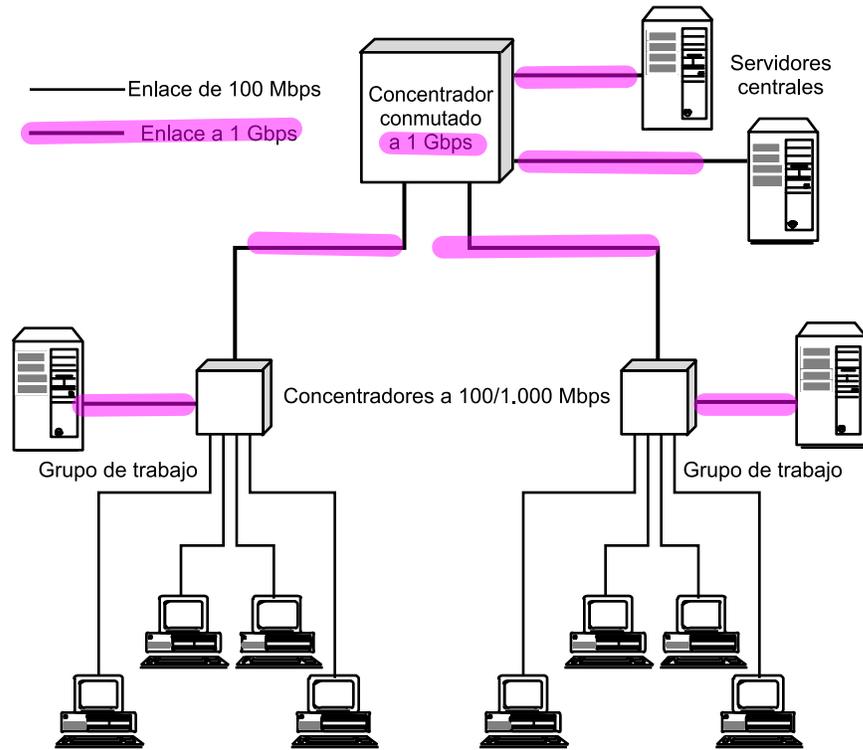


Figura 16.5. Ejemplo de configuración para Gigabit Ethernet.

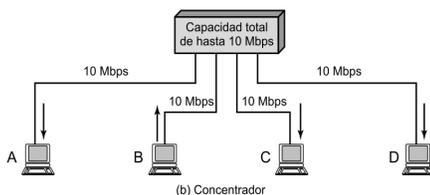
tanto el protocolo CSMA/CD como el formato de trama de sus predecesores Ethernet a 10 Mbps y 100 Mbps. Es compatible con 100BASE-T y 10BASE-T, facilitando la migración. La demanda de tecnología Gigabit Ethernet ha crecido debido a que las organizaciones están adoptando cada vez más 100BASE-T, lo que implica cantidades enormes de tráfico en las líneas troncales.

En la Figura 16.5 se muestra una aplicación típica de Gigabit Ethernet. Un conmutador a 1 Gbps proporciona la conectividad entre los servidores centrales y entre los concentradores de alta velocidad. Cada concentrador se conecta a la línea troncal mediante un enlace a 1 Gbps y conecta, además, a los servidores de cada concentrador, a la vez que ofrece enlaces a 100 Mbps para conectar a estaciones de trabajo, servidores y otros concentradores a 100 Mbps.

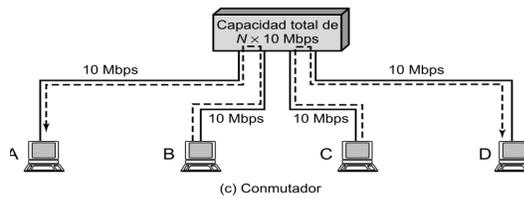
Capa de acceso al medio

La especificación a 1.000 Mbps utiliza el mismo formato para las tramas y protocolos que el CSMA/CD usado en las versiones de IEEE 802.3 a 10 Mbps y 100 Mbps. Se han introducido dos mejoras respecto al esquema CSMA/CD básico en lo que se refiere al funcionamiento de los concentradores (véase Figura 15.13b):

- Extensión de la portadora:** esta mejora consiste en añadir una serie de símbolos al final de una trama MAC corta, de tal manera que el bloque resultante tenga una duración equivalente a 4.096 bits, mucho mayor que los 512 exigidos en el estándar a 10 y 100 Mbps. El objetivo es que la longitud de la trama, es decir, el tiempo de transmisión, sea mayor que el tiempo de propagación a 1 Gbps.



4096 bits >> 512



+Eficiente

- **Ráfagas de tramas:** esta funcionalidad permite que se transmitan de forma consecutiva varias tramas cortas (sin superar un límite) sin necesidad de dejar el control del CSMA/CD. Las ráfagas de tramas evitan la redundancia y gasto que conlleva la técnica de la extensión de la portadora, en el caso de que una estación tenga preparadas para transmitir varias tramas pequeñas.

En el conmutador (véase Figura 15.13c), que facilita un acceso al medio dedicado, no son necesarias las técnicas de extensión de la portadora ni la de ráfagas de tramas. Esto se debe a que una estación puede transmitir y recibir simultáneamente sin interferencias y sin necesidad de competir para acceder al medio compartido.

Capa física

La especificación actual de IEEE 802.3 a 1 Gbps define las siguientes alternativas (véase Figura 16.6):

- **1000BASE-SX:** esta opción, en la que se usan longitudes de onda pequeñas, proporciona enlaces dúplex de 275 m usando fibras multimodo de 62,5 μm o hasta 550 m con fibras multimodo de 50 μm. Las longitudes de onda están en el intervalo comprendido entre 770 y 860 nm.
- **1000BASE-LX:** esta alternativa, en la que se utilizan longitudes de onda mayores, proporciona enlaces dúplex de 550 m con fibras multimodo de 62,5 μm o 50 μm, o de 5 km con fibras monomodo de 10 μm. Las longitudes de onda están entre los 1.270 y los 1.355 nm.
- **1000BASE-CX:** esta opción proporciona enlaces de 1 Gbps entre dispositivos localizados dentro de una habitación (o armario de conexiones) utilizando latiguillos de cobre (cables de pares trenzados de menos de 25 m con un apantallamiento especial). Cada enlace consiste en dos pares trenzados apantallados, cada uno de los cuales se usa en un sentido.
- **1000BASE-T:** esta opción utiliza cuatro pares no apantallados tipo 5 para conectar dispositivos separados hasta ~~1.000 m.~~ 100m.

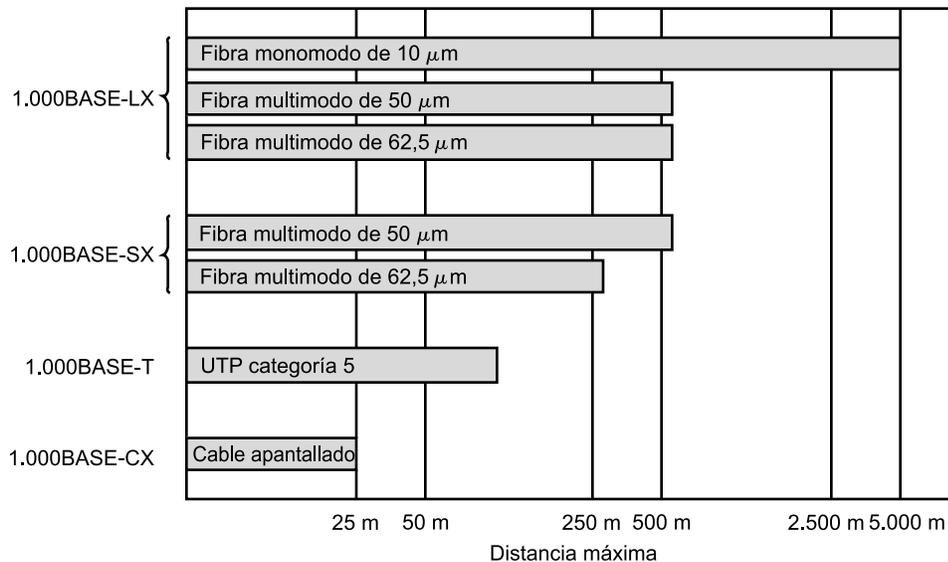


Figura 16.6. Opciones del medio en Gigabit Ethernet (escala logarítmica).

El esquema de codificación de señal que se usa para las tres primeras opciones de Gigabit Ethernet es 8B/10B, descrito en el Apéndice 16A. En el caso de 1000BASE-T se usa 4D-PAM5, una técnica relativamente complicada cuya descripción queda fuera de este contexto.

ETHERNET DE 10 Gbps

Con los productos gigabit todavía bastante nuevos, la atención se ha desplazado en los últimos años hacia Ethernet con capacidad de 10 Gbps. El principal requisito que ha motivado este interés ha sido el incremento en el tráfico de Internet e intranets. Este incremento espectacular se ha debido a una serie de factores:

- Incremento en el número de conexiones de red.
- Incremento en la velocidad de conexión de cada estación final (por ejemplo, usuarios de 10 Mbps migrando hacia 100 Mbps, usuarios de líneas analógicas de 56 kbps migrando hacia soluciones DSL y módem de cable).
- Incremento en el despliegue de aplicaciones demandantes de ancho de banda, como el vídeo de alta calidad.
- Incremento en el hospedaje de web y el tráfico de las aplicaciones de hospedaje. Remote Desktop

En principio, los administradores de red podrán usar Ethernet de 10 Gbps para construir redes troncales locales de alta velocidad que proporcionarán interconexión a conmutadores de alta capacidad. A medida que la demanda de ancho de banda crezca, Ethernet de 10 Gbps podrá ser desplegada a lo largo de toda la red, interconectando agrupaciones centralizadas de servidores, redes troncales y proporcionando cobertura para toda un área. Esta tecnología permite que los proveedores de servicios de Internet (ISP, *Internet Service Providers*) y los proveedores de servicios de red (NSP, *Network Service Providers*) puedan ofrecer enlaces de alta velocidad a un costo reducido entre encaminadores y conmutadores adyacentes.

Esta tecnología permite también la construcción de redes de área metropolitana (MAN, *Metropolitan Area Network*) y de área amplia (WAN, *Wide Area Network*) que conecten redes LAN geográficamente dispersas entre distintos puntos de presencia. Ethernet comienza así a competir con ATM y otras tecnologías de transmisión de área amplia. En la mayoría de los casos en los que los requisitos del cliente son el transporte de datos y de TCP/IP, Ethernet a 10 Gbps proporciona un valor añadido sustancial sobre el transporte ofrecido por ATM, tanto para los usuarios finales de la red como para los proveedores del servicio:

- No se requiere una conversión costosa y demandante de ancho de banda entre paquetes Ethernet y celdas ATM. La red es Ethernet extremo a extremo.
- La combinación de IP y Ethernet ofrece calidad de servicio y capacidades para establecer políticas de tráfico que se aproximan a las que brinda ATM, de manera que tanto usuarios como proveedores tienen a su disposición una tecnología de ingeniería de tráfico avanzada.
- Ethernet de 10 Gigabits recoge un amplio abanico de interfaces ópticas estándares (longitudes de onda y distancias), optimizando tanto su funcionamiento como su coste para aplicaciones LAN, MAN o WAN.

Las distancias máximas de los enlaces cubren un intervalo de aplicaciones, desde 300 m hasta 40 km. Los enlaces funcionan exclusivamente en modo *full-duplex*, usando diversos medios físicos de fibra óptica.

Han sido definidas cuatro opciones para la capa física en Ethernet de 10 Gbps (véase la Figura 16.7):



OPCIONES

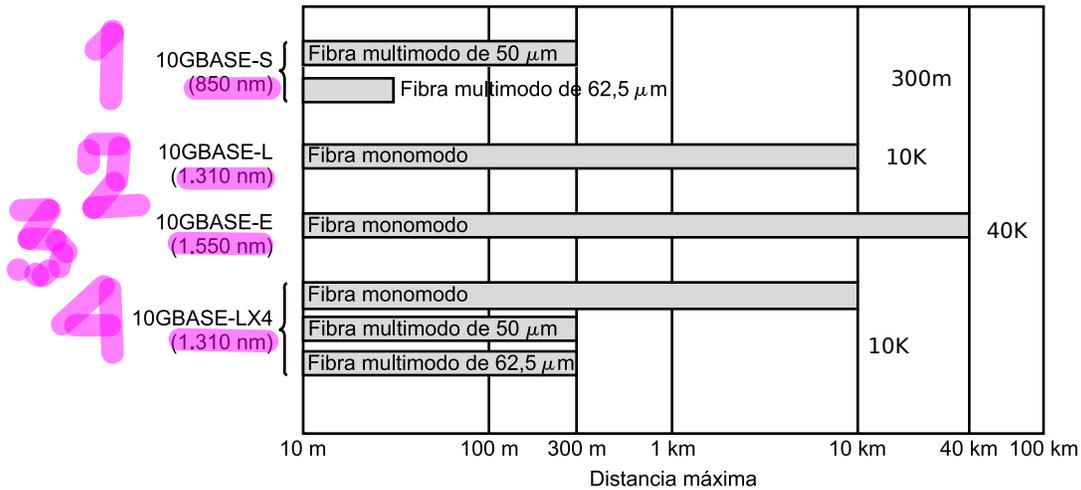


Figura 16.7. Velocidad y opciones de distancia en Ethernet a 10 Gbps (escala logarítmica).

- 1 • **10GBASE-S (corta):** diseñada para transmisiones de 850 nm sobre fibras multimodo. Este medio puede alcanzar distancias de hasta 300 m.
- 2 • **10GBASE-L (larga):** diseñada para transmisiones de 1.310 nm sobre fibras monomodo. Puede alcanzar distancias de hasta 10 km.
- 3 • **10GBASE-E (extendida):** diseñada para transmisiones de 1.550 nm sobre fibras monomodo. Puede alcanzar distancias de hasta 40 km.
- 4 • **10GBASE-LX4:** diseñada para transmisiones de 1.310 nm sobre fibras monomodo o multimodo, alcanzándose distancias de hasta 10 km. Este medio utiliza multiplexación por división de longitud de onda (WDM, *Wavelength Division Multiplexing*) para multiplexar el flujo de bits sobre cuatro ondas de luz.

16.3. ANILLO CON PASO DE TESTIGO

El estándar IEEE 802.5 de anillo con paso de testigo (*token ring*) es una consecuencia de las redes LAN comerciales de paso de testigo de IBM. Dada la presencia de IBM en el mercado corporativo, hace mucho! las redes LAN de paso de testigo han ganado una amplia aceptación. No obstante, no han alcanzado nunca la popularidad de los sistemas tipo Ethernet. Pese a que actualmente existe una extensa base de productos de paso de testigo instalados, todo apunta a que este mercado declinará rápidamente en los próximos años. solo en la bibliografía..

Comenzaremos con una breve introducción al funcionamiento de una red LAN en anillo. Posteriormente abordaremos el estándar IEEE 802.5.

FUNCIONAMIENTO DEL ANILLO

Un anillo consta de varios repetidores, cada uno de ellos conectado a otros dos por líneas de transmisión unidireccionales y formando así un único camino cerrado. Los datos se transmiten secuencialmente, bit a bit, alrededor del anillo desde un repetidor hasta el siguiente. Cada repetidor regenera cada bit y lo retransmite.

Para que un anillo funcione como una red de comunicaciones son necesarias tres funciones que son llevadas a cabo por los repetidores: inserción de datos, recepción de datos y eliminación de datos. Cada repetidor, además de servir como elemento activo en el anillo, sirve como punto de conexión de cada dispositivo. Los datos son transmitidos en paquetes, conteniendo cada uno de ellos un campo de dirección de destino. El campo de dirección de un paquete, al circular por el anillo y atravesar un repetidor, es copiado por éste; si la dirección coincide con la de la estación, se copia el resto del paquete.

Los repetidores realizan las funciones de inserción y recepción de datos de forma análoga a como lo hacen las tomas que sirven como puntos de conexión de dispositivos en un bus o en un árbol. La eliminación de datos es, sin embargo, más complicada en el caso de un anillo. Las señales en un bus o en un árbol se insertan en la línea, se propagan hacia los extremos y son absorbidas por los terminadores; así, el bus o el árbol están libres de los datos poco después de haber cesado la comunicación. Sin embargo, dado que el anillo es un bucle cerrado, el paquete circulará indefinidamente a menos que sea eliminado. Un paquete puede ser eliminado por el repetidor destino. Otra alternativa consiste en que cada paquete sea eliminado por el repetidor que lo emitió después de que haya dado una vuelta completa en el anillo. Esta última aproximación es mejor debido a que (1) permite confirmaciones automáticas y (2) permite direccionamiento múltiple: un paquete puede ser enviado simultáneamente a varias estaciones.

Multicast, Broadcast, Unicast

Se puede hacer uso de una gran diversidad de estrategias para determinar cómo y cuándo insertar los paquetes en el anillo. Estas estrategias son, de hecho, protocolos de control de acceso al medio, siendo el más usual de ellos el anillo con paso de testigo.

Al repetidor, por tanto, se le pueden adjudicar dos funciones principales: (1) contribuir al funcionamiento adecuado del anillo dejando pasar todos los datos que lo atraviesan, y (2) ofrecer un punto de acceso a las estaciones conectadas para transmitir y recibir datos. Existen dos estados correspondientes a estos dos cometidos (véase Figura 16.8): estado de escucha y estado de transmisión.

En el estado de escucha cada bit recibido se retransmite con un pequeño retardo, necesario para permitir al repetidor realizar las funciones básicas. Idealmente, el retardo debe ser del orden del intervalo de duración de un bit (el tiempo que tarda el repetidor en transmitir un bit completo por la línea de salida). Estas funciones son:

- **Búsqueda de secuencias de patrones de bits.** Entre ellas está la dirección o direcciones de las estaciones conectadas. Otro patrón, usado en la estrategia de control con paso de testigo explicada más adelante, indica permiso para transmitir. Obsérvese que el repetidor debe tener conocimiento del formato de los paquetes para realizar la función de búsqueda.
- **Copia de cada bit entrante y su envío a la estación conectada mientras se continúa con la retransmisión de cada bit.** Esto se realizará para cada bit de cada paquete dirigido a la estación.

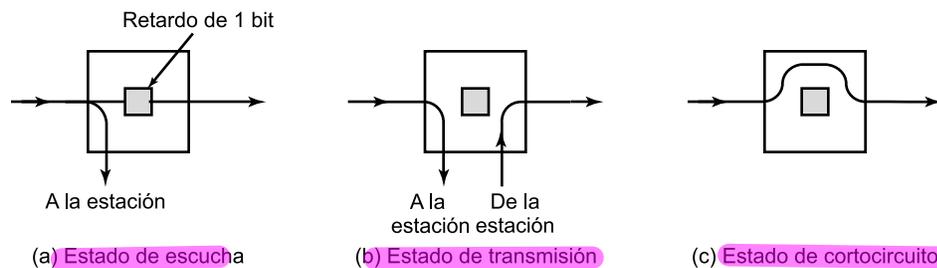


Figura 16.8. Estados del repetidor de un anillo.

- **Modificación de un bit mientras circula.** Los bits se pueden modificar en determinadas estrategias de control para, por ejemplo, **indicar que el paquete ha sido copiado. Esto sirve como confirmación.**

Cuando la estación dispone de datos a transmitir y el repetidor al que se encuentra conectada, de acuerdo con la estrategia de control, tiene permiso para hacerlo, este último entra en estado de transmisión. En este estado el repetidor recibe bits de la estación y los retransmite por la línea de salida. Durante el periodo de transmisión pueden aparecer bits por la línea de entrada del anillo. Existen dos posibles situaciones, tratadas de forma diferente:

- Los bits pueden proceder del mismo paquete que el repetidor está transmitiendo, lo cual sucederá si la «longitud de bit» del anillo es menor que el tamaño de paquete. En este caso, el repetidor pasa los bits hacia la estación, que puede comprobarlos como método de confirmación.
- En algunas estrategias de control se permite la existencia simultánea de más de un paquete en el anillo. Si el repetidor recibe bits de un paquete distinto al que está transmitiendo, debe almacenarlos temporalmente para retransmitirlos con posterioridad.

Estos dos estados, escucha y transmisión, son suficientes para un funcionamiento adecuado del anillo. Un tercer estado, estado de cortocircuito (*bypass*), resulta también útil. En este estado se puede activar un relé de cortocircuito, de manera que las señales propagadas atraviesan el repetidor sin más retardo que el de propagación en el medio. El relé de cortocircuito presenta dos ventajas: (1) proporciona una solución parcial al problema de fiabilidad discutido más adelante, y (2) mejora las prestaciones al eliminar los retardos del repetidor para aquellas estaciones del medio que no se encuentren activas.

CONTROL DE ACCESO AL MEDIO

La técnica de anillo con paso de testigo se basa en el uso de una trama pequeña, denominada testigo (*token*), que circula cuando todas las estaciones están libres. Cuando una estación desea transmitir debe esperar a que le llegue el testigo. En este caso, toma el testigo cambiando uno de sus bits, lo que lo convierte en la secuencia de comienzo de las tramas de datos. Posteriormente, la estación añade y transmite el resto de campos requeridos en la construcción de la trama.

Cuando una estación toma el testigo y comienza a transmitir, el testigo deja de estar presente en el anillo, de manera que el resto de estaciones que deseen transmitir deben esperar. La trama en el anillo realiza una vuelta completa y se absorbe en la estación transmisora, que insertará un nuevo testigo en el anillo cuando se cumplan las dos condiciones siguientes:

- La estación ha terminado la transmisión de su trama.
- Los bits iniciales de la trama transmitida hayan vuelto a la estación (después de una vuelta completa al anillo).

Si la longitud del anillo es menor que la longitud de la trama, la primera condición implica la segunda. En caso contrario, una estación podría liberar el testigo después de que haya terminado de transmitir, pero antes de que comience a recibir su propia transmisión. La segunda condición no es estrictamente necesaria, relajándose en la configuración conocida como liberación rápida del testigo (*early token release*). La ventaja que implica la imposición de la segunda condición es que asegura que, en un instante de tiempo dado, sólo puede haber una trama de datos en el medio y sólo puede estar transmitiendo una estación, simplificándose los procedimientos de recuperación de errores.

Una vez que se ha insertado un nuevo testigo en el anillo, la siguiente estación en la secuencia que disponga de datos a transmitir podrá tomar el testigo y llevar a cabo la transmisión. La Figura 16.9 ilustra la técnica. En el ejemplo, A envía una trama a C, que la recibe y, una vez que ha recibido también el testigo, envía sus propias tramas a A y D.

Obsérvese que en condiciones de baja carga, el anillo con paso de testigo presenta cierta ineficacia debido a que una estación debe esperar a recibir el testigo antes de transmitir. Sin embargo, en condiciones de carga elevada, que es la situación más preocupante, el anillo funciona como un sistema de turno rotatorio (*round-robin*), que es eficiente además de equitativo. Para ver esto, consideremos la configuración de la Figura 16.9. Después de que la estación A transmita, libera un testigo. La primera estación con opción de transmitir es D. Si lo hace, libera después un testigo y C es la siguiente que puede transmitir, y así sucesivamente.

La principal ventaja del anillo con paso de testigo es el control de acceso flexible que ofrece. En el esquema sencillo que se acaba de describir el acceso es equitativo. Es posible, además, utili-

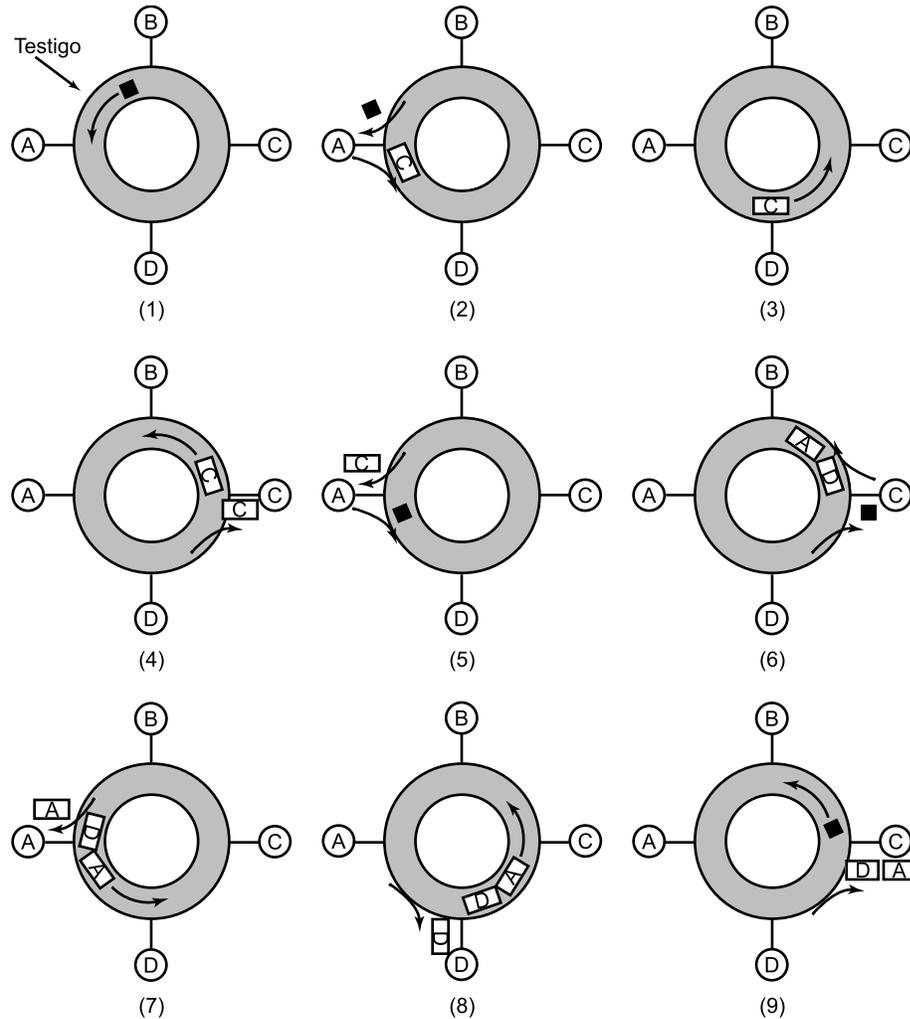


Figura 16.9. Funcionamiento del anillo con paso de testigo.

zar el anillo con paso de testigo para proporcionar prioridad y servicios con ancho de banda garantizado.

La principal desventaja del anillo con paso de testigo está en la necesidad de procedimientos para realizar el mantenimiento del anillo. La pérdida del testigo impide posteriores utilidades del anillo, mientras que una duplicidad del mismo puede interrumpir también el funcionamiento del anillo. Se puede seleccionar una estación como monitora para asegurar que haya únicamente un testigo en el anillo y para reinsertar un testigo libre en caso necesario.

La actualización de IEEE 802.5 de 1997 introdujo una nueva técnica de control de acceso al medio denominada **anillo con paso de testigo dedicado** (DTR, *Dedicated Token Ring*, haciendo uso de una topología en estrella. El algoritmo de paso de testigo se puede seguir utilizando en esta configuración, de manera que la capacidad del anillo siga siendo compartida puesto que el acceso al medio está determinado por el testigo. Sin embargo, es igualmente posible que el concentrador central funcione como un conmutador de la capa 2, de forma que la conexión entre cada estación y el conmutador funcione como un enlace punto a punto *full-duplex*. La especificación DTR define cómo utilizar las estaciones y concentradores en este modo conmutado. El concentrador DTR funciona como un retransmisor de tramas en lugar de ser un repetidor de bits. De esta manera, cada enlace desde el concentrador a las estaciones es un enlace dedicado con acceso inmediato, no usándose paso de testigo.

OPCIONES DE MEDIOS DE TRANSMISIÓN EN IEEE 802.5

El estándar 802.5 ofrece un amplio abanico de velocidades y medios de transmisión, como se muestra en la Tabla 16.4. El estándar fija un máximo para el tamaño de las tramas igual a 4.550 octetos a 4 Mbps y 18.200 octetos para 16 Mbps, 100 Mbps y 1 Gbps. Estos valores contrastan con los 1.518 octetos de las redes LAN IEEE 802.3. A 4 Mbps y a 16 Mbps se puede usar tanto el paso de testigo como la técnica DTR conmutada para el control de acceso al medio. A 100 Mbps, la utilización de la técnica DTR es obligatoria.

Tabla 16.4. Alternativas para el medio de transmisión en la capa física IEEE 802.5.

Velocidad de transmisión (Mbps)	4	16	100	100	1.000
Medio de transmisión	UTP, STP o fibra	UTP, STP o fibra	UTP o STP	Fibra	Fibra
Técnica de señalización	Manchester diferencial	Manchester diferencial	MLT-3	4B5B, NRZI	8B/10B
Tamaño máximo de la trama (octetos)	4.550	18.200	18.200	18.200	18.200
Control de acceso	TP o DTR	TP o DTR	DTR	DTR	DTR

UTP = par trenzado no apantallado (*unshielded twisted pair*).

STP = par trenzado apantallado (*shielded twisted pair*).

TP = control de acceso con paso de testigo (*token passing access control*).

DTR = anillo con paso de testigo dedicado (*dedicated token ring*).

El comité 802.5 completó el trabajo sobre la versión del anillo con paso de testigo a 1 Gbps en el año 2001, que, al igual que sucedió con la versión a 100 Mbps, adoptará la especificación de la capa física de 802.3.

16.4. CANAL DE FIBRA

A medida que han aumentado la velocidad y la capacidad de memoria de los computadores personales, estaciones de trabajo y servidores, y conforme las aplicaciones se han vuelto más complejas, con una mayor dependencia en gráficos y vídeo, la necesidad de mayor velocidad en el envío de datos a los procesadores ha aumentado. Este requisito afecta a dos métodos de comunicaciones de datos con el procesador: el canal de entrada/salida y las comunicaciones de red.

Un canal de entrada/salida es un enlace de comunicaciones directo punto a punto o multipunto, generalmente implementado en hardware y diseñado para conseguir altas velocidades de transmisión en distancias muy cortas. El canal de entrada/salida transfiere datos entre una memoria temporal en el dispositivo de origen y otra en el dispositivo de destino, limitándose únicamente a desplazar los contenidos del usuario desde un dispositivo al otro sin tener en cuenta el formato o significado de los datos. La lógica asociada al canal proporciona, generalmente, el control mínimo necesario para gestionar la transferencia, además de la detección de errores hardware. Los canales de entrada/salida manipulan por lo general transferencias entre procesadores y dispositivos periféricos, como discos, equipos gráficos, CD-ROM y dispositivos de entrada/salida de vídeo.

Una red es un conjunto de puntos de acceso interconectados con una estructura software de protocolos que posibilita la comunicación. La red admite generalmente diferentes tipos de transferencia de datos, haciendo uso del software para implementar los protocolos de red y para proporcionar control de flujo y detección y recuperación de errores. Como se ha discutido en este texto, las redes gestionan generalmente las transferencias entre sistemas finales en distancias locales, metropolitanas o de área amplia.

El canal de fibra está diseñado para combinar las características más sobresalientes de estas tecnologías —la sencillez y velocidad de las comunicaciones de canal con la flexibilidad e interconectividad que caracterizan a las comunicaciones de red basadas en protocolos—. Esta fusión de enfoques permite a los diseñadores de sistemas combinar la conexión tradicional de periféricos, la interconexión de redes estación-estación, la agrupación de procesadores débilmente acoplados y el uso de aplicaciones multimedia en una misma interfaz multiprotocolo. Entre los tipos de recursos orientados a canal que se incorporan en la arquitectura de protocolos del canal de fibra se encuentran:

- Modificadores de tipos de datos para encaminar la carga útil contenida en las tramas sobre memorias temporales de interfaz específicas.
- Elementos del nivel de enlace asociados con operaciones individuales de entrada/salida.
- Especificaciones de la interfaz de un protocolo para dar soporte a arquitecturas de canal de entrada/salida existentes, como la interfaz SCSI (*Small Computer System Interface*).

Entre los tipos de recursos orientados a red incorporados en la arquitectura de protocolos del canal de fibra se encuentran los siguientes:

- Multiplexación completa de tráfico entre múltiples destinos.
- Conectividad igual a igual (paritaria) entre cualquier par de puertos en una red de canal de fibra.
- Posibilidad de interconexión con otras tecnologías.

En función de las necesidades de la aplicación, tanto el enfoque de canal como el de red de comunicaciones pueden ser utilizados para cualquier transferencia de datos. La Asociación de Industrias del Canal de Fibra, que es el consorcio industrial que promueve el uso del canal de fibra, enumera los siguientes requisitos que éste ambiciona conseguir:

- Enlaces *full-duplex* con dos fibras por enlace.
- Rendimientos desde 100 Mbps hasta 800 Mbps sobre una sola línea (de 200 Mbps a 1.600 Mbps por línea *full-duplex*).
- Cobertura de distancias de hasta 10 km.
- Conectores pequeños.
- Alta capacidad de utilización independiente de la distancia.
- Mayor conectividad que los actuales canales de conexiones múltiples.
- Amplia disponibilidad (es decir, componentes estándar).
- Soporte para múltiples niveles de coste/rendimiento, desde pequeños sistemas hasta grandes computadores.
- Capacidad de transportar varios grupos de órdenes de interfaz para canales y protocolos de red ya existentes.

La solución pasaba por desarrollar un mecanismo de transporte simple y genérico basado en enlaces punto a punto y una red de conmutación. Esta infraestructura subyacente soporta un esquema de codificación y creación de tramas que podría permitir todo un abanico de protocolos de canal y de redes.

ELEMENTOS DEL CANAL DE FIBRA

Los principales elementos de una red de canal de fibra son los sistemas finales, denominados **nodos**, y la red propiamente dicha, que consta de uno o más elementos de conmutación. El conjunto de elementos de conmutación se denomina **estructura**. Estos elementos se encuentran interconectados mediante enlaces punto a punto entre puertos a través de nodos individuales y conmutadores. La comunicación consiste en la transmisión de las tramas a través de los enlaces punto a punto.

Cada nodo incluye uno o más puertos para la interconexión, llamados N_puertos. Análogamente, cada elemento de conmutación de la estructura incluye varios puertos, llamados F_puertos. La interconexión se realiza mediante enlaces bidireccionales entre puertos. Cualquier nodo puede comunicarse con otro nodo conectado a la misma estructura haciendo uso de los servicios de ésta. Todo el encaminamiento de tramas entre N_puertos lo lleva a cabo la estructura. Las tramas se pueden almacenar temporalmente en la estructura, haciendo posible que se conecten a ésta nodos con distintas velocidades de transmisión.

Como se muestra en la Figura 16.10, una estructura puede implementarse como un único elemento de estructura con nodos conectados (una simple disposición en estrella) o como una red más general de elementos de estructura. En cualquier caso, la estructura es responsable del almacenamiento temporal y encaminamiento de tramas entre los nodos origen y destino.

La red de canal de fibra es bastante diferente de las LAN IEEE 802. En contraste con las LAN típicas de medio compartido, el canal de fibra es más parecido a una red tradicional de conmutación de circuitos o de paquetes. Así, no necesita abordar cuestiones de control de acceso al medio. Dado que se basa en una red de conmutación, el canal de fibra se escala fácilmente en términos de N_puertos, velocidad de transmisión de datos y distancia cubierta. Este enfoque proporciona una gran flexibilidad. El canal de fibra se puede acomodar fácilmente a nuevos medios y velocidades de transmisión mediante la incorporación de nuevos conmutadores y F_puertos a una estructura ya existente. Así, una inversión realizada no se pierde ante una actualización a nuevas tecnologías y equipamiento. Además, la arquitectura de protocolos en niveles admite las interfaces de entrada/salida y los protocolos de red existentes, preservando la inversión realizada.

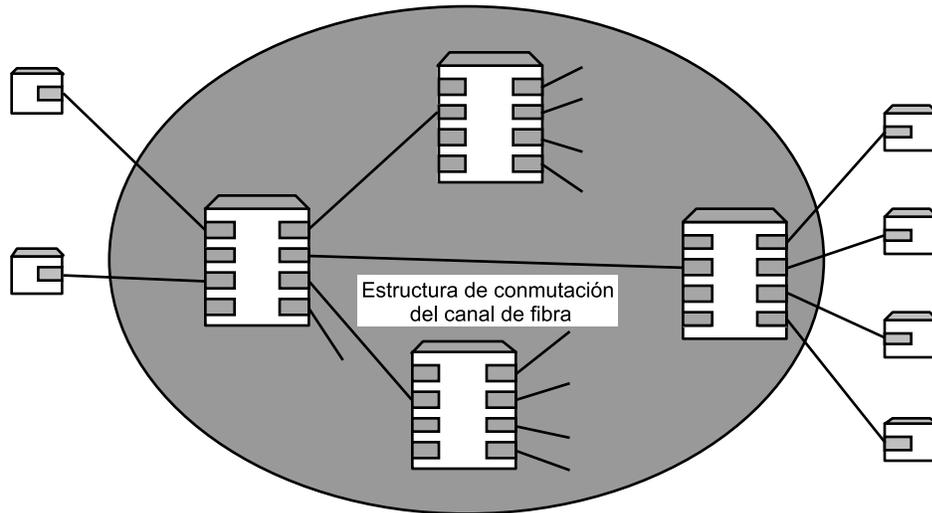


Figura 16.10. Red de canal de fibra.

ARQUITECTURA DE PROTOCOLOS DEL CANAL DE FIBRA

El estándar de canal de fibra se organiza en cinco niveles, definiendo cada uno de ellos una función concreta o un conjunto de funciones relacionadas. El estándar no establece una correspondencia entre niveles y las implementaciones reales, con una interfaz específica entre niveles adyacentes. Es más, el estándar se refiere al nivel como un «artificio documental» usado para agrupar funciones relacionadas entre sí. Las capas son las siguientes:

- **Medio físico FC-0:** incluye fibra óptica para aplicaciones de larga distancia, cable coaxial para altas velocidades a cortas distancias y par trenzado apantallado para bajas velocidades sobre cortas distancias.
- **Protocolo de transmisión FC-1:** define el esquema de codificación de la señal.
- **Protocolo de delimitación FC-2:** incluye las topologías definidas, el formato de trama, el control de flujo y de errores y la agrupación de tramas en entidades lógicas llamadas secuencias y permutas.
- **Servicios comunes FC-3:** incluye la multidifusión.
- **Transformación FC-4:** define la conversión de distintos protocolos de canal y de red a canal de fibra, incluyendo IEEE 802, ATM, IP y la interfaz SCSI.

MEDIOS FÍSICOS Y TOPOLOGÍAS DEL CANAL DE FIBRA

Una de las mayores ventajas del estándar de canal de fibra es que proporciona todo un rango de opciones para el medio físico, su velocidad y la topología de la red (véase la Tabla 16.5).

Medios de transmisión

Las opciones sobre el medio de transmisión que están disponibles en el canal de fibra incluyen par trenzado apantallado, cable coaxial de vídeo y fibra óptica. Las velocidades estandarizadas van

Tabla 16.5. Distancia máxima para los distintos tipos de medios de canal de fibra.

	800 Mbps	400 Mbps	200 Mbps	100 Mbps
Fibra de modo simple	10 km	10 km	10 km	—
Fibra multimodo de 50 μm	0,5 km	1 km	2 km	—
Fibra multimodo de 62,5 μm	175 m	1 km	1 km	—
Cable coaxial de vídeo	50 m	71 m	100 m	100 m
Cable coaxial en miniatura	14 m	19 m	28 m	42 m
Par trenzado apantallado	28 m	46 m	57 m	80 m

desde 100 Mbps hasta 3,2 Gbps. Las distancias de los enlaces punto a punto abarcan desde 33 m hasta 10 km.

Topologías

La topología más general soportada por el canal de fibra es la que se conoce como topología conmutada o topología de estructura. Se trata de una topología arbitraria que contiene al menos un conmutador para interconectar una serie de sistemas finales. Esta topología puede también consistir en un número de conmutadores formando una red de conmutación, con algunos de ellos (o todos) dando soporte a los nodos finales.

El encaminamiento en la topología de estructura es transparente a los nodos. Cada puerto en la configuración posee una dirección única. Cuando los datos procedentes de un nodo son transmitidos hacia la estructura, el conmutador al que el nodo de origen está conectado determina la localización del puerto de destino usando la dirección del mismo que se encuentra en la trama de datos. A continuación, el conmutador entrega la trama a otro nodo conectado al mismo conmutador, o bien a un conmutador adyacente para su encaminamiento hacia el destino remoto.

La topología de estructura proporciona escalabilidad de la capacidad: a medida que se añaden puertos adicionales, la capacidad total de la red se incrementa, minimizando así la congestión y la contención e incrementando el rendimiento. La estructura es independiente del protocolo y altamente insensible a problemas de distancia. La tecnología de los conmutadores y de los enlaces de transmisión que los conectan con los nodos pueden ser cambiados sin que este hecho afecte a la configuración global. Otra ventaja de esta topología es que se minimiza la carga en los nodos. Un nodo individual del canal de fibra (un sistema final) es únicamente responsable del manejo de una conexión punto a punto entre él y la estructura; ésta se encarga del encaminamiento entre puertos y de la detección de errores.

Además de la topología de estructura, el estándar del canal de fibra define dos topologías adicionales. Con la topología punto a punto existen solamente dos puertos que se encuentran directamente conectados, sin la intervención de conmutadores en la estructura. En este caso no existe encaminamiento alguno. La topología en bucle arbitrado es una configuración simple y de bajo coste para conectar hasta 126 nodos en un bucle. El bucle arbitrado funciona de una forma ligeramente similar a los protocolos de paso de testigo que han sido estudiados con anterioridad.

Las topologías, los medios de transmisión y las velocidades pueden ser combinados con objeto de proporcionar una configuración optimizada para un determinado sitio. La Figura 16.11 es un ejemplo que ilustra las principales aplicaciones del canal de fibra.

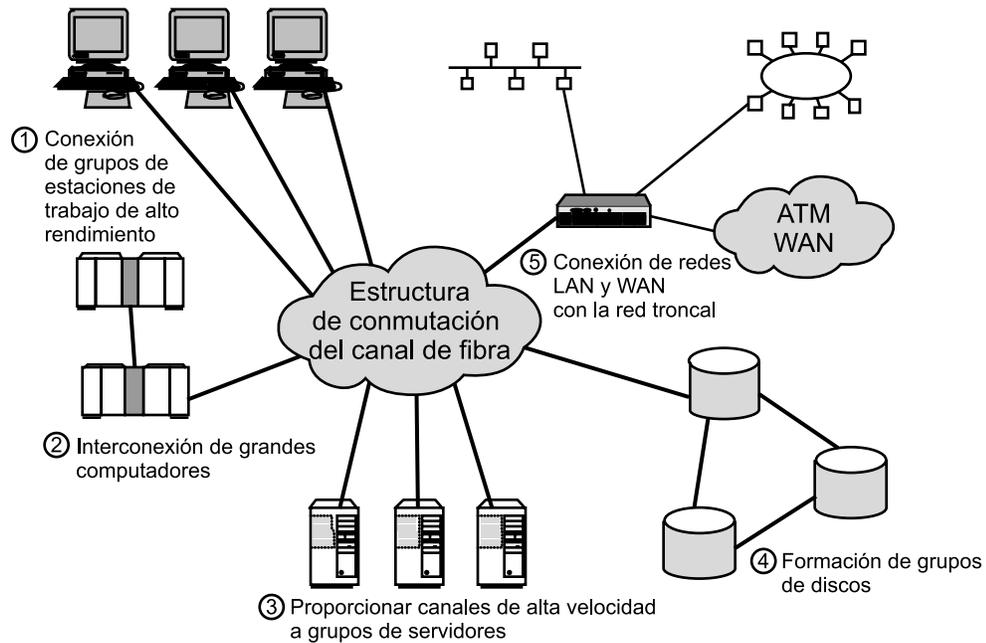


Figura 16.11. Cinco aplicaciones del canal de fibra.

PERSPECTIVAS DEL CANAL DE FIBRA

El canal de fibra está respaldado por un grupo industrial conocido como la Asociación del Canal de Fibra, encontrándose disponible una gama de tarjetas de red para diferentes aplicaciones. El canal de fibra ha sido principalmente más aceptado como una tecnología mejorada para la interconexión de dispositivos periféricos, proporcionando servicios que podrían reemplazar esquemas como SCSI. Se trata de una solución técnicamente atractiva para los requisitos generales de redes LAN de alta velocidad, pero debe competir con Ethernet y las LAN ATM. El coste y las cuestiones de rendimiento deberían ser los factores cruciales para un gestor a la hora de decidir entre estas tecnologías.

16.5. LECTURAS Y SITIOS WEB RECOMENDADOS

[STAL00] cubre en mayor profundidad todos los sistemas LAN que se han discutido en este capítulo.

[SPUR00] proporciona una visión general concisa pero completa de todos los sistemas 802.3 desde 10 Mbps hasta 1 Gbps, incluyendo algunas indicaciones para la configuración de un solo segmento de cada medio diferente, así como un esbozo de la construcción de Ethernet multisegmento usando diferentes medios de transmisión. Dos tratamientos excelentes de Ethernet a 100 Mbps y Gigabit Ethernet son [SEIF98] y [KADA98]. Un buen artículo de evaluación de Gigabit Ethernet es [FRAZ99]. [10GE02] es un documento técnico que proporciona una introducción muy útil a Ethernet a 10 Gbps.

[SACH96] es una evaluación del canal de fibra. Otro tratamiento corto, aunque útil, es [FCIA01].

10GE02 10 Gigabit Ethernet Alliance. *10 Gigabit Ethernet—Technology Overview*. White paper, abril 2002.

FCIA01 Fibre Channel Industry Association. *Fibre Channel Storage Area Networks*. San Francisco: Fibre Channel Industry Association, 2001.

FRAZ99 Frazier, H., y Johnson, H. «Gigabit Ethernet: From 100 to 1,000 Mbps.» *IEEE Internet Computing*, enero/febrero 1999.

KADA98 Kadambi, J.; Crayford, I.; y Kalkunte, M. *Gigabit Ethernet*. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 1998.

SACH96 Sachs, M., y Varma, A. «Fibre Channel and Related Standards.» *IEEE Communications Magazine*, agosto 1996.

SEIF98 Seifert, R. *Gigabit Ethernet*. Reading, MA: Addison-Wesley, 1998.

SPUR00 Spurgeon, C. *Ethernet: The Definitive Guide*. Cambridge, MA: O'Reilly and Associates, 2000.

STAL00 Stallings, W. *Local and Metropolitan Area Networks, Sixth Edition*. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2000.



SITIOS WEB RECOMENDADOS

- **Laboratorio de Interoperabilidad:** sitio de la Universidad de New Hampshire para la evaluación de equipos de LAN de alta velocidad.
- **Sitio web sobre Ethernet de Charles Spurgeon:** contiene información extensa sobre Ethernet, incluyendo enlaces y documentos.
- **Alianza Ethernet 10 Gigabits:** este grupo promueve el estándar Ethernet a 10 Gbps.
- **Asociación de Industrias del Canal de Fibra:** contiene tutoriales, documentos técnicos, enlaces a vendedores y descripciones de aplicaciones del canal de fibra.
- **Asociación de Industrias de Redes de Almacenamiento:** consorcio de industrias de desarrolladores, integradores y profesionales de las TI que promueven tecnologías y soluciones de redes de almacenamiento.

16.6. TÉRMINOS CLAVE, CUESTIONES DE REPASO Y EJERCICIOS

TÉRMINOS CLAVE

ALOHA
ALOHA ranurado
acceso múltiple con detección de portadora (CSMA)

acceso múltiple con detección de portadora y detección de colisiones (CSMA/CD)
canal de fibra
colisión

CSMA 1-persistente	funcionamiento <i>full-duplex</i>
CSMA no persistente	red de paso de testigo (en anillo)
CSMA <i>p</i> -persistente	red de paso de testigo (en anillo)
espera exponencial binaria	dedicada (DTR)
Ethernet	repetidor

CUESTIONES DE REPASO

- 16.1. ¿Qué es una agrupación centralizada de servidores?
- 16.2. Explique los tres protocolos persistentes que pueden ser usados con CSMA.
- 16.3. ¿Qué es CSMA/CD?
- 16.4. Explique el proceso de espera exponencial binaria.
- 16.5. ¿Cuáles son las opciones de medios de transmisión en Fast Ethernet?
- 16.6. ¿En qué se diferencia Fast Ethernet de 10BASE-T, además de en la velocidad?
- 16.7. En el contexto de las redes Ethernet, ¿qué es el funcionamiento *full-duplex*?
- 16.8. ¿Qué funciones lleva a cabo un repetidor en una red de paso de testigo en anillo?
- 16.9. ¿Qué diferencias hay entre una red tradicional de paso de testigo y una red de paso de testigo dedicada?
- 16.10. Enumere los niveles del canal de fibra y las funciones de cada uno de ellos.
- 16.11. ¿Cuáles son las opciones de topología en el canal de fibra?
- 16.12. En condiciones de carga elevada, ¿en qué se diferencia el comportamiento de CSMA/CD y una red de paso de testigo?

EJERCICIOS

- 16.1. Una desventaja de los enfoques de contención en redes LAN, como CSMA/CD, es el desaprovechamiento de la capacidad que se origina debido al intento simultáneo de varias estaciones de acceder al canal. Supóngase que el tiempo se divide en ranuras discretas y que cada una de las *N* estaciones tiene una probabilidad *p* de intentar transmitir durante cada ranura. ¿Qué fracción de las ranuras se desaprovecha debido a intentos simultáneos de transmisión?
- 16.2. Considérese la siguiente situación en el caso de CSMA *p*-persistente. Una estación se encuentra lista para transmitir y está escuchando la transmisión actual. Supongamos que no hay ninguna otra estación lista para transmitir y que no habrá otras transmisiones durante un periodo indefinido de tiempo. Si consideramos que la unidad de tiempo utilizada en el protocolo es *T*, muéstrase que el número medio de iteraciones del paso 1 del protocolo es $1/p$ y que, por tanto, el tiempo medio que la estación tendrá que esperar después de la transmisión actual es $T\left(\frac{1}{p} - 1\right)$. *Sugerencia:* haga uso de la igualdad

$$\sum_{i=1}^{\infty} iX^{i-1} = \frac{1}{(1 - X)^2}$$

- 16.3.** El algoritmo de espera exponencial binaria se define en IEEE 802 como sigue:

El retardo es un múltiplo entero de la duración de una ranura de tiempo. El número de ranuras de tiempo a retrasarse antes de la n -ésima retransmisión se elige como un entero r aleatorio uniformemente distribuido en el rango $0 \leq r < 2^K$, siendo $K = \min(n, 10)$.

La duración de una ranura es, en líneas generales, el doble del tiempo de propagación de ida y vuelta. Suponga que dos estaciones siempre tienen una trama lista para ser enviada. Después de una colisión, ¿cuál es el número medio de intentos de retransmisión antes de que una estación consiga transmitir satisfactoriamente? ¿Cuál es dicho número si se consideran tres estaciones que, al igual que antes, siempre tienen tramas listas para ser transmitidas?

- 16.4.** Describa el patrón de señal producido sobre el medio por el preámbulo de la trama MAC IEEE 802.3 codificada con Manchester.
- 16.5.** Suponga una red LAN en anillo con paso de testigo en la que la estación de destino elimina la trama de datos y envía inmediatamente una confirmación corta al emisor, en lugar de dejar que la trama original vuelva al emisor. ¿Cómo afectará este cambio al rendimiento?
- 16.6.** Otra técnica de control de acceso al medio para redes en anillo es el anillo ranurado (*slotted ring*). En ella existen una serie de ranuras de longitud fija circulando continuamente por el anillo. Cada ranura contiene un bit inicial que indica si la ranura se encuentra llena o no. Una estación que desee transmitir espera hasta que le llegue una ranura vacía, la marca como «llena» e inserta una trama de datos a medida que la ranura circula. A continuación, la ranura realiza una vuelta completa y es marcada de nuevo como «vacía» por la estación que la usó. ¿En qué sentido es este protocolo (paso de testigo ranurado) el complemento del paso de testigo tradicional?
- 16.7.** Considere un anillo ranurado de 10 km de longitud con una velocidad de datos de 10 Mbps y 500 repetidores, cada uno de los cuales introduce un retardo de 1 bit. Cada ranura contiene espacio para albergar una dirección de origen de 1 byte, una dirección de destino de 1 byte, 2 bytes de datos y 5 bits de control, alcanzando así un total de 37 bits. Determine el número de ranuras que hay en el anillo.
- 16.8.** La tasa efectiva de datos con el esquema de codificación 8B6T en un canal simple es de 33 Mbps con una tasa de señalización de 25 Mbaudios. ¿Cuál es la tasa efectiva de datos con una tasa de señalización de 25 Mbaudios si se utiliza un esquema ternario puro?
- 16.9.** Usando una codificación 8B6T, el algoritmo DC niega en ocasiones todos los símbolos ternarios en un grupo de código. ¿Cómo reconoce el receptor que se ha producido este hecho? ¿Cómo discrimina el receptor entre un grupo de código negado y uno que no lo ha sido? Por ejemplo, el grupo de código para el byte de datos 00 es $+ - 00 + -$ y el grupo de código para el byte de datos 38 es su negación, esto es, $- + 00 - +$.
- 16.10.** Dibuje el diagrama de estados del decodificador MLT que se corresponde con el diagrama de estados del codificador de la Figura 16.12.
- 16.11.** Dibuje la forma de onda del resultado de codificar el flujo de bits 0101110 con NRZ-L, NRZI, Manchester, Manchester Diferencial y MLT-3.

APÉNDICE 16A. CODIFICACIÓN DE SEÑALES DIGITALES PARA REDES LAN

En el Capítulo 5 vimos algunas de las técnicas usuales de codificación de datos digitales para transmisión, incluyendo Manchester y Manchester diferencial, que se usan en algunos estándares LAN. En este apéndice examinaremos algunos esquemas de codificación adicionales citados en este capítulo.

4B/5B-NRZI

Este esquema, que es realmente una combinación de dos algoritmos de codificación, se usa tanto en 100BASE-X como en FDDI. Para comprender el significado de esta elección consideremos primero el sencillo esquema de codificación NRZ (no retorno a cero). Con NRZ, un estado de señal representa un uno binario y otro estado de señal un cero binario. El inconveniente de esta aproximación es la ausencia de sincronismo. Dado que las transiciones en el medio resultan impredecibles, no hay forma de que el receptor sincronice su reloj con el del emisor. Una solución a este problema es codificar los datos binarios de forma que se garantice la presencia de transiciones. Por ejemplo, los datos se podrían codificar primero empleando la codificación Manchester. La desventaja de esta aproximación es que la eficiencia es sólo del 50 por ciento. Es decir, debido a que pueden existir nada menos que dos transiciones por intervalo de bit, se necesita una velocidad de señalización de 200 millones de elementos de señal por segundo (200 Mbaudios) para conseguir una velocidad de transmisión de 100 Mbps. Esto representa un coste y una carga técnica innecesarios.

Se puede conseguir una eficiencia superior haciendo uso del código 4B/5B, en el cual la codificación se realiza en cada momento sobre 4 bits. Cada 4 bits de datos se codifican en un símbolo con cinco *bits de código*, de modo que cada bit de código contiene un único elemento de señal. El bloque de cinco bits de código se llama *grupo de código*. En efecto, cada grupo de 4 bits se codifica como 5 bits. La eficiencia se incrementa así hasta el 80 por ciento: se consiguen 100 Mbps con 125 Mbaudios.

Para asegurar la sincronización se lleva a cabo un segundo paso de codificación: cada bit de código de la secuencia 4B/5B se trata como un valor binario y se codifica usando la técnica de no retorno a cero invertido (NRZI) (véase Figura 5.2). En este código, un 1 binario se representa como una transición al principio del intervalo de bit y un 0 binario sin transición al comienzo del intervalo de bit; es decir, no hay transiciones. La ventaja de NRZI es que emplea codificación diferencial. Recordemos del Capítulo 5 que en codificación diferencial la señal se decodifica comparando la polaridad de elementos de señal adyacentes, en lugar del valor absoluto de un elemento de señal. Una ventaja de este esquema es que, en presencia de ruido y distorsión, resulta generalmente más fácil detectar una transición que comparar un valor con un umbral.

Ahora estamos en condiciones de describir el código 4B/5B y de comprender las decisiones tomadas. En la Tabla 16.6 se muestra la codificación de símbolos. Se muestra cada patrón de grupo de código de 5 bits junto con la realización NRZI. Dado que se codifican cuatro bits con un patrón de 5 bits, sólo se necesitan 16 de los 32 patrones posibles para la codificación de los datos. Los códigos seleccionados para representar los 16 bloques de datos de 4 bits son tales que existen al menos dos transiciones para cada código de grupo de 5 bits. No se permiten más de tres ceros en una fila a lo largo de uno o más grupos de código:

El esquema de codificación se puede resumir como sigue:

1. Se rechaza la realización de una simple codificación NRZ dado que no proporciona sincronismo; no aparecen transiciones en una secuencia de unos y ceros.

Tabla 16.6. Grupos de código 4B/5B

Datos de entrada (4 bits)	Grupo de código (5 bits)	Patrón NRZI	Interpretación
0000	11110		Dato 0
0001	01001		Dato 1
0010	10100		Dato 2
0011	10101		Dato 3
0100	01010		Dato 4
0101	01011		Dato 5
0110	01110		Dato 6
0111	01111		Dato 7
1000	10010		Dato 8
1001	10011		Dato 9
1010	10110		Dato A
1011	10111		Dato B
1100	11010		Dato C
1101	11011		Dato D
1110	11100		Dato E
1111	11101		Dato F
	11111		Libre
	11000		Comienzo de delimitador de secuencia, parte 1
	10001		Comienzo de delimitador de secuencia, parte 2
	01101		Fin de delimitador de secuencia, parte 1
	00111		Fin de delimitador de secuencia, parte 2
	00100		Error de transmisión
	Otro		Códigos no válidos

2. Los datos a transmitir deben ser primero codificados para asegurar la existencia de transiciones. Se elige el código 4B/5B frente a Manchester porque es más eficiente.
3. El código 4B/5B se codifica posteriormente usando NRZI, de modo que la señal diferencial resultante mejorará la fiabilidad en la recepción.
4. Los patrones de 5 bits específicamente elegidos para la codificación de los 16 patrones de datos de 4 bits se seleccionan con el fin de garantizar la existencia de no más de tres ceros en una fila con objeto de conseguir una sincronización adecuada.

Los grupos de código no empleados para representar datos se declaran como no válidos o se les asigna un significado especial como símbolos de control. Estas asignaciones se enumeran en la Tabla 16.6. Los símbolos de no datos se encuadran en las siguientes categorías:

- **Libre:** el grupo de código libre se transmite entre secuencias de transmisión de datos. Consiste en un flujo constante de unos binarios, lo que se traduce con NRZI en un cambio continuo entre dos niveles de señal. Este patrón de relleno continuo establece y mantiene la sincronización y se usa en el protocolo CSMA/CD para indicar que el medio compartido se encuentra libre.
- **Comienzo de delimitador de secuencia:** se utiliza para delimitar el comienzo de una secuencia de transmisión de datos; consta de dos grupos de código diferentes.
- **Final de delimitador de secuencia:** empleado como fin de las secuencias de transmisión de datos normales; consta de dos grupos de código diferentes.
- **Error de transmisión:** este grupo de código se interpreta como un error de señalización. El uso normal de este indicador se establece en repetidores con el fin de propagar errores recibidos.

MLT-3

Aunque 4B/5B es efectivo para fibra óptica, no resulta tan apropiado como lo es para par trenzado. El motivo de este hecho es que la energía de la señal se concentra de manera que se producen emisiones de radiación no deseadas desde el cable. MLT-3, que se usa tanto en 100BASE-TX como en la versión de par trenzado de FDDI, está diseñado para solucionar este problema.

Se siguen los siguientes pasos:

1. **Conversión NRZI a NRZ.** La señal 4B/5B-NRZI de la 100BASE-X básica se convierte de nuevo a NRZ.
2. **Aleatorización.** Se entremezcla la secuencia de bits para producir una distribución de espectro más uniforme para el siguiente paso.
3. **Codificador.** La secuencia de bits mezclados se codifica usando el esquema conocido como MLT-3.
4. **Controlador.** Se transmite la codificación resultante.

El efecto del esquema MLT-3 es concentrar la mayor parte de la energía en la señal transmitida por debajo de los 30 MHz, lo que reduce las emisiones. Esto disminuye los problemas debidos a interferencias.

La codificación MLT-3 produce una salida que tiene una transición para cada uno binario y que usa tres niveles: una tensión positiva (+V), una negativa (-V) y ausencia de ésta (0). Las

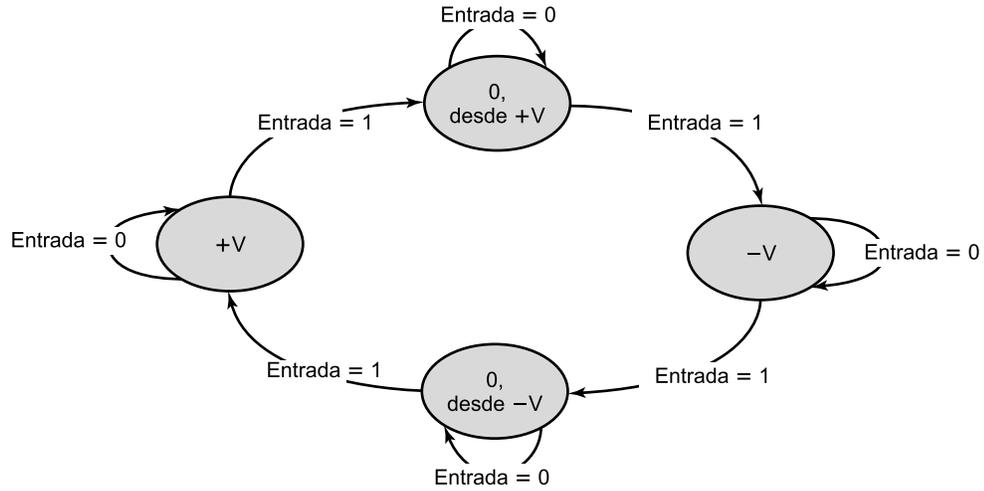


Figura 16.12. Diagrama de estados del codificador MLT-3.

reglas de codificación se explican mejor con ayuda del diagrama de estados del codificador mostrado en la Figura 16.12:

1. Si el siguiente bit de entrada es cero, el siguiente valor de salida es el mismo que el valor precedente.
2. Si el siguiente bit de entrada es un uno, el siguiente valor de salida implica una transición:
 - a) Si el valor de salida anterior fue $+V$ o $-V$, el siguiente valor de salida es 0.
 - b) Si el valor de salida precedente fue 0, el siguiente valor de salida es distinto de cero, y de signo opuesto al de la última salida distinta de cero.

En la Figura 16.13 se muestra un ejemplo. Cada vez que haya un 1 de entrada, existe una transición. Se alterna la aparición de $+V$ y $-V$.

8B6T

El algoritmo de codificación 8B6T utiliza señalización ternaria. Con este tipo de señalización, cada elemento de señal puede tomar uno de tres valores posibles (tensión positiva, tensión negativa y tensión nula). Un código ternario puro es aquel en que se aprovecha la capacidad de transportar información de una señal ternaria. Sin embargo, este tipo de código no resulta atractivo por las mismas razones por las que se desestima un código binario puro (NRZ): ausencia de sincronización. A pesar de ello, existen esquemas denominados *métodos de codificación por bloques* que se

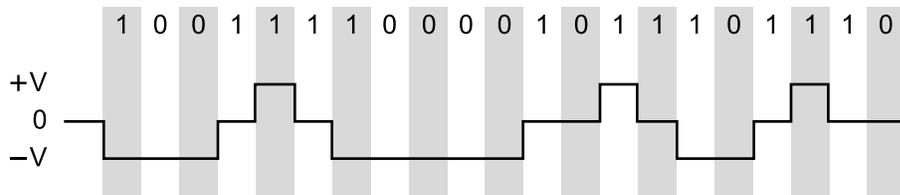


Figura 16.13. Ejemplo de codificación MLT-3.

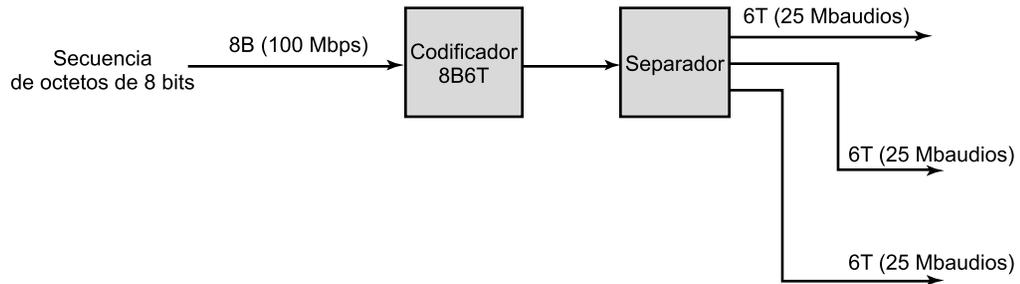


Figura 16.14. Esquema de transmisión 8B6T.

aproximan a la eficiencia de un código ternario y solventan este inconveniente. En 100BASE-T4 se usa un nuevo esquema de codificación por bloques conocido como 8B6T.

En 8B6T, los datos a transmitir se gestionan en bloques de 8 bits. Cada uno de estos bloques se transforma en un grupo de código de 6 símbolos ternarios. La secuencia de grupos de código se transmite después a través de los tres canales de salida siguiendo el esquema de rotación circular (véase Figura 16.14). De esta forma, la velocidad de transmisión de datos en cada canal de salida es:

$$\frac{6}{8} \times 33 \frac{1}{3} = 25 \text{ Mbaudios}$$

En la Tabla 16.7 se muestra una parte de la tabla de código 8B6T; la tabla completa transforma todos los patrones de 8 bits posibles en un único grupo de código de 6 símbolos ternarios. La transformación se elige en base a dos requisitos: sincronización y compensación de tensión continua (DC). Para sincronización, los códigos se seleccionan para maximizar el número medio de transiciones por grupo de código. El segundo requisito consiste en mantener compensada la DC, de modo que la tensión promedio en la línea sea cero. Con este objetivo, todos los grupos de código

Tabla 16.7. Porción de la tabla de código 8B6T.

Octeto de datos	Grupo de código 6T	Octeto de datos	Grupo de código 6T	Octeto de datos	Grupo de código 6T	Octeto de datos	Grupo de código 6T
00	+ - 00 + -	10	+ 0 + - - 0	20	00 - + + -	30	+ - 00 - +
01	0 + - + - 0	11	+ + 0 - 0 -	21	- - + 00 +	31	0 + - - + 0
02	+ - 0 + - 0	12	+ 0 + - 0 -	22	+ + - 0 + -	32	+ - 0 - + 0
03	- 0 + + - 0	13	0 + + - 0 -	23	+ + - 0 - +	33	- 0 + - + 0
04	- 0 + 0 + -	14	0 + + - - 0	24	00 + 0 - +	34	- 0 + 0 - +
05	0 + - - 0 +	15	+ + 00 - -	25	00 + 0 + -	35	0 + - + 0 -
06	+ - 0 - 0 +	16	+ 0 + 0 - -	26	00 - 00 +	36	+ - 0 + 0 -
07	- 0 + - 0 +	17	0 + + 0 - -	27	- - + + + -	37	- 0 + + 0 -
08	- + 00 + -	18	0 + - 0 + -	28	- 0 - + + 0	38	- + 00 - +
09	0 - + + - 0	19	0 + - 0 - +	29	- - 0 + 0 +	39	0 - + - + 0
0A	- + 0 + - 0	1A	0 + - + + -	2A	- 0 - + 0 +	3A	- + 0 - + 0
0B	+ 0 - + - 0	1B	0 + - 00 +	2B	0 - - + 0 +	3B	+ 0 - - + 0
0C	+ 0 - 0 + -	1C	0 - + 00 +	2C	0 - - + + 0	3C	+ 0 - 0 - +
0D	0 - + - 0 +	1D	0 - + + + -	2D	- - 00 + +	3D	0 - + + 0 -
0E	- + 0 - 0 +	1E	0 - + 0 - +	2E	- 0 - 0 + +	3E	- + 0 + 0 -
0F	+ 0 - - 0 +	1F	0 - + 0 + -	2F	0 - - 0 + +	3F	+ 0 - + 0 -

seleccionados tienen un número igual de símbolos positivos y negativos o un superávit de un símbolo positivo. Para mantener el equilibrio se usa un algoritmo de compensación DC. Esencialmente, este algoritmo supervisa el peso acumulado de todos los grupos de código transmitidos a través de un par individual. Cada grupo de código tiene un peso 0 o 1. Para compensar, el algoritmo puede negar un grupo de código transmitido (cambia todos los símbolos + por símbolos - y todos los - por +), de forma que el peso acumulado al final de cada grupo de código es siempre 0 o 1.

8B/10B

El esquema de codificación usado en canal de fibra y en Gigabit Ethernet es 8B/10, en el que cada 8 bits de datos se transforman en 10 bits para su transmisión. Este esquema sigue una filosofía similar al esquema 4B/5B empleado en FDDI discutido anteriormente. El esquema 8B/10B se desarrolló y patentó por IBM para su uso en su sistema interconectado ESCON a 200 Mbaudios [WIDM83]. Este esquema es más potente que el 4B/5B en términos de características de transmisión y capacidad de detección de errores.

Los diseñadores de este código enumeran las siguientes ventajas:

- Se puede implementar utilizando transceptores relativamente sencillos y fiables de bajo coste.
- Presenta una buena compensación, con mínimas desviaciones en la ocurrencia de un número igual de bits 0 y 1 a lo largo de una secuencia.
- Proporciona una buena densidad de transiciones para una fácil recuperación del sincronismo.
- Proporciona una capacidad útil de detección de errores.

El código 8B/10B es un ejemplo del código más general $mBnB$, en el que m bits originales se transforman en n bits binarios para la transmisión. Haciendo $n > m$ se introduce redundancia en el código para proporcionar las características de transmisión deseadas.

El código 8B/10B realmente combina otros dos códigos, un código 5B/6B y otro 3B/4B. El uso de estos dos códigos es simplemente un artificio para simplificar la definición de la transformación y de la implementación: la transformación podía haberse definido directamente como un código 8B/10B. En cualquier caso, se define una transformación que traduce cada uno de los posibles bloques originales de 8 bits en un bloque de código de 10 bits. También existe una función llamada *control de disparidad*. Esencialmente, esta función hace un seguimiento del exceso de ceros frente a unos o de unos frente a ceros. La existencia de exceso en un sentido se conoce como disparidad. Si existe disparidad, y si el bloque de código actual aumenta ésta, el bloque de control de disparidad complementa el bloque de código de 10 bits. Esto tiene el efecto de eliminar la disparidad o, al menos, cambiarla de sentido con respecto a la actual.

APÉNDICE 16B. ANÁLISIS DE PRESTACIONES

La elección de una arquitectura LAN o MAN depende de varios factores, siendo la eficiencia uno de los más importantes. Una cuestión relevante es el comportamiento (rendimiento, tiempo de respuesta) de la red ante la existencia de alta carga. En este apéndice se presenta una introducción a este tema, pudiéndose encontrar en [STAL00] una discusión más detallada del mismo.

EFECTO DEL RETARDO DE PROPAGACIÓN Y LA VELOCIDAD DE TRANSMISIÓN

En el Capítulo 7 se introdujo el parámetro a , definido como

$$a = \frac{\text{Tiempo de propagación}}{\text{Tiempo de transmisión}}$$

En este contexto, nos centraremos en un enlace punto a punto, con un tiempo de propagación específico entre dos extremos y un tiempo de transmisión para una trama de tamaño fijo o promedio. Se mostró que el parámetro a se puede expresar como:

$$a = \frac{\text{Longitud del enlace de datos en bits}}{\text{Longitud de la trama en bits}}$$

Este parámetro es también importante en el contexto de redes LAN y MAN, y determina un límite superior para la utilización. Consideremos un mecanismo de acceso completamente eficiente que permita sólo una transmisión en un instante de tiempo dado. Tan pronto como finaliza una transmisión, comienza a transmitir otra estación. Además, la transmisión es sólo de datos, sin bits suplementarios. ¿Cuál es la máxima utilización de red posible? Ésta se puede expresar como la relación entre el rendimiento total de la red y su velocidad:

$$U = \frac{\text{Rendimiento}}{\text{Velocidad}} \quad (16.1)$$

Definamos ahora, como en el Capítulo 7,

R = Velocidad del canal.

d = Distancia máxima ente cualesquiera dos estaciones.

V = Velocidad de propagación de la señal.

L = Longitud media o fija de trama.

El rendimiento es el número de bits transmitidos por unidad de tiempo. Una trama contiene L bits, y la cantidad de tiempo dedicado a esta trama es el tiempo de transmisión real (L/R) más el retardo de propagación (d/V). De este modo,

$$\text{Rendimiento} = \frac{L}{d/V + L/R} \quad (16.2)$$

Pero, por la definición anterior de a :

$$a = \frac{d/V}{L/R} = \frac{Rd}{LV} \quad (16.3)$$

Sustituyendo (16.2) y (16.3) en (16.1):

$$U = \frac{1}{1 + a} \quad (16.4)$$

Obsérvese que esta expresión es diferente de la Ecuación (7.4) dada en el Apéndice 7A. Este hecho se debe a que la última considera un protocolo *half-dúplex* (no se usan tramas de datos con incorporación de confirmación).

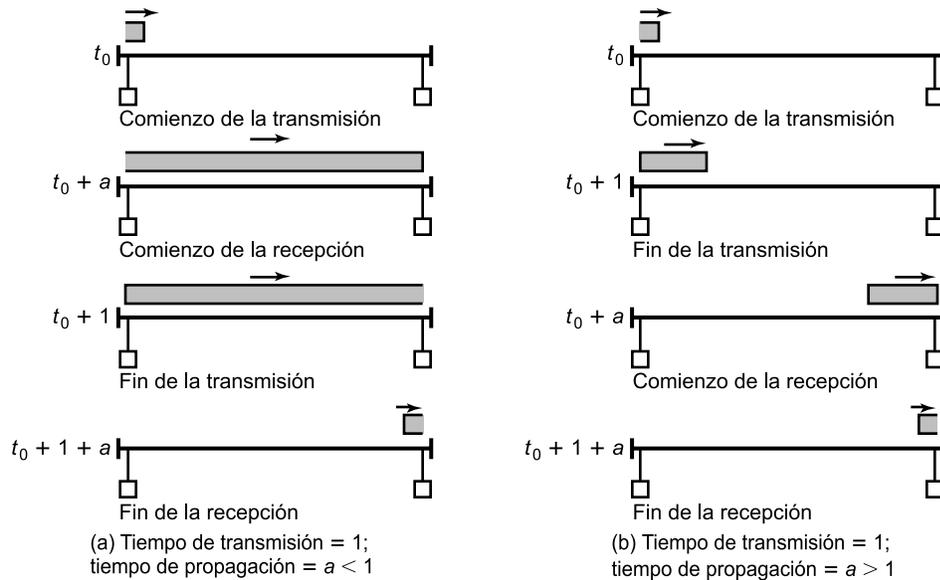


Figura 16.15. Efecto del parámetro a en la utilización en un bus en banda base.

Por tanto, la utilización depende de a , lo que se puede comprender intuitivamente estudiando la Figura 16.15. En ella se muestra un bus de banda base con dos estaciones tan distantes como es posible (peor caso) que se turnan en el envío de tramas. Si normalizamos el tiempo de forma que el de transmisión de trama sea 1, el tiempo de propagación es a . Para $a < 1$, la secuencia de eventos es como sigue:

1. Una estación comienza a transmitir en t_0 .
2. La recepción empieza en $t_0 + a$.
3. La transmisión se completa en $t_0 + 1$.
4. La recepción finaliza en $t_0 + 1 + a$.
5. La otra estación comienza a transmitir.

Los eventos 2 y 3 se intercambian para $a > 1$. En ambos casos, el tiempo total para un «turno» es $1 + a$, pero el tiempo de transmisión es sólo 1, por lo que la utilización será $1/(1 + a)$.

Lo mismo ocurre en el caso de la red en anillo de la Figura 16.16. Aquí suponemos que una estación transmite y después espera a recibir su propia transmisión antes de que otra estación pueda transmitir. Se sigue la misma secuencia de eventos que anteriormente.

Los valores típicos de a se encuentran en el rango comprendido entre 0,01 y 0,1 para redes LAN y entre 0,1 y muy por encima de 1,0 para redes MAN. En la Tabla 16.8 se muestran algunos valores representativos para una topología en bus. Como se puede ver, la utilización decae para redes mayores y/o con velocidades superiores. Por esta razón desaparece la restricción de una sola trama para redes LAN como FDDI.

Por último, el análisis anterior supone un protocolo «perfecto» en el que se puede transmitir una nueva trama tan pronto como se reciba la trama anterior. En la práctica, el protocolo MAC añade bits suplementarios que hacen que empeore la utilización. Esto se demuestra en el siguiente apartado para las técnicas de paso de testigo y CSMA/CD.

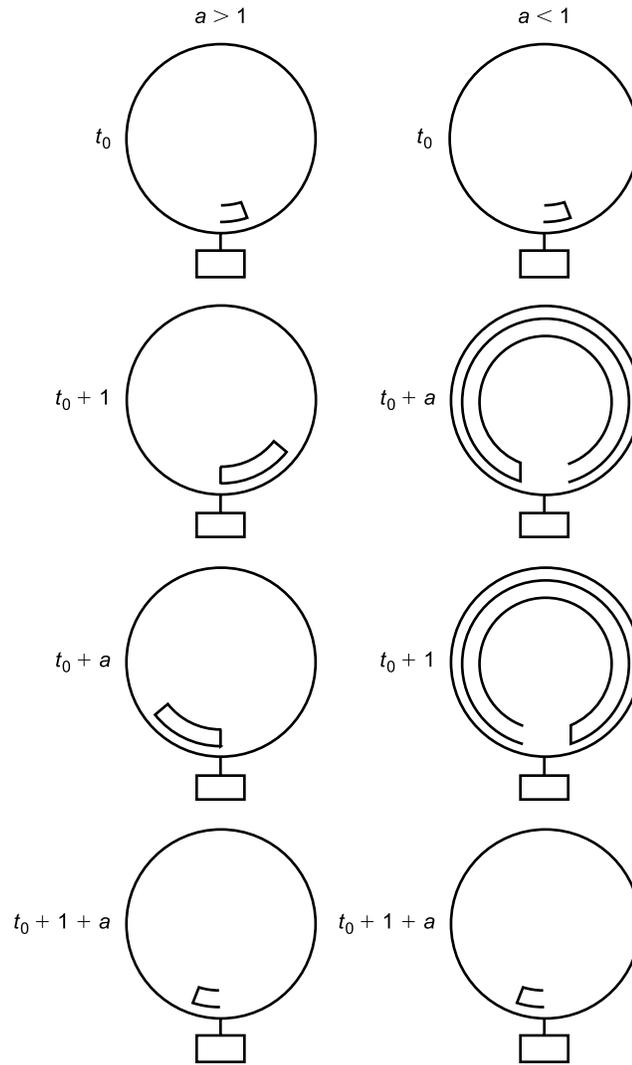


Figura 16.16. Efecto del parámetro a en la utilización en una red en anillo.

Tabla 16.8. Valores representativos de a .

Velocidad (Mbps)	Tamaño de trama (bits)	Longitud de la red (km)	a	$1/(1 + a)$
1	100	1	0,05	0,95
1	1.000	10	0,05	0,95
1	100	10	0,5	0,67
10	100	1	0,5	0,67
10	1.000	1	0,05	0,95
10	1.000	10	0,5	0,67
10	10.000	10	0,05	0,95
100	35.000	200	2,8	0,26
100	1.000	50	25	0,04

MODELOS SENCILLOS DE EFICIENCIA PARA LAS TÉCNICAS DE PASO DE TESTIGO Y CSMA/CD

El objetivo de este apartado es proporcionar al lector una visión de las prestaciones relativas de los protocolos LAN más importantes —CSMA/CD, bus con paso de testigo y anillo con paso de testigo— mediante el desarrollo de dos modelos sencillos de prestaciones. Esperamos que este ejercicio ayude a comprender los resultados de análisis más rigurosos.

En estos modelos se supone una red local con N estaciones activas y un retardo de propagación normalizado máximo igual a a . Para simplificar el análisis se supone que cada estación está siempre lista para transmitir una trama, lo que nos permite desarrollar una expresión para la utilización máxima alcanzable (U). Aunque no se debería analizar la utilización como la única característica destacable de una red local, este parámetro es el más analizado y permite realizar comparaciones útiles acerca de prestaciones.

En primer lugar, consideremos una red en anillo con paso de testigo. El tiempo consumido en el anillo se distribuye entre la transmisión de tramas de datos y el paso del testigo. Denominemos ciclo a la transmisión de una única trama de datos seguida por un testigo y definamos:

C = Tiempo promedio de un ciclo.

T_1 = Tiempo promedio para transmitir una trama de datos.

T_2 = Tiempo promedio en el paso del testigo.

Debería estar claro que la razón de ciclo media es $1/C = 1/(T_1 + T_2)$. Intuitivamente,

$$U = \frac{T_1}{T_1 + T_2} \tag{16.5}$$

Es decir, el rendimiento, normalizado a la capacidad del sistema, es la fracción de tiempo consumido en la transmisión de los datos.

Centrémonos ahora en la Figura 16.16. El tiempo se normaliza de manera que el tiempo de transmisión de trama es igual a 1 y el tiempo de propagación es a . Obsérvese que el tiempo de propagación debe incluir los retardos de los repetidores. Para el caso $a < 1$ una estación transmite una trama en t_0 , recibe la cabecera de su propia trama en $t_0 + a$ y completa la transmisión en $t_0 + 1$. La estación transmite entonces un testigo, lo que implica un tiempo promedio a/N hasta alcanzar la siguiente estación. Así, un ciclo dura $1 + a/N$ y el tiempo de transmisión es 1. Por tanto, $U = 1/(1 + a/N)$.

El razonamiento es ligeramente diferente para el caso $a > 1$. Una estación transmite en t_0 , finaliza la transmisión en $t_0 + 1$ y recibe la cabecera de su trama en $t_0 + a$. En este momento se encuentra en condiciones de emitir un testigo, lo que implica un tiempo promedio a/N hasta alcanzar la siguiente estación. En consecuencia, el tiempo de ciclo es $a + a/N$ y $U = 1/(a(1 + 1/N))$.

En resumen,

<p>Anillo con paso de testigo: $U = \begin{cases} \frac{1}{1 + a/N} & a < 1 \\ \frac{1}{a(1 + 1/N)} & a > 1 \end{cases}$</p>	(16.6)
--	--------

Consideremos para CSMA/CD el tiempo organizado en ranuras temporales de duración igual a dos veces el retardo de propagación extremo a extremo. Esto es una forma adecuada para considerar la actividad en el medio; la ranura temporal es igual al tiempo máximo necesario para detectar una colisión desde el inicio de la transmisión. Suponemos de nuevo que existen N estaciones activas. Está claro que si todas las estaciones tienen siempre una trama que transmitir, y lo hacen, no habrá más que colisiones en el medio. Por tanto, supongamos que cada estación limita con una probabilidad P su transmisión durante una ranura disponible.

El tiempo en el medio consta de dos tipos de intervalos. El primero es un intervalo de transmisión, de duración $1/2a$ ranuras. El segundo es un intervalo de contención, que es una secuencia de ranuras en las que se produce colisión o no existe transmisión. El rendimiento es la proporción de tiempo consumido en intervalos de transmisión (similar al razonamiento de la Ecuación (16.5)).

Para determinar la longitud promedio de un intervalo de contención, comenzamos calculando A , la probabilidad de que exactamente una estación intente llevar a cabo una transmisión en una ranura y , en consecuencia, consiga el medio. Ésta es la probabilidad binomial de que cualquier estación intente transmitir y las otras no:

$$A = \binom{N}{1} P^1 (1 - P)^{N-1} = NP(1 - P)^{N-1}$$

Esta función alcanza un máximo en P cuando $P = 1/N$:

$$A = (1 - 1/N)^{N-1}$$

Estamos interesados en el máximo porque deseamos calcular el rendimiento máximo del medio. Debe quedar claro que éste se conseguirá si maximizamos la probabilidad de conseguir el medio con éxito. Esto implica que se debe forzar el cumplimiento de la siguiente regla: durante periodos de gran uso, una estación debería restringir su carga ofrecida a $1/N$, (esto supone que cada estación conoce el valor de N). Con el fin de obtener una expresión para el máximo rendimiento posible, se considera válida esta suposición.) Por otra parte, durante periodos de tiempo de poco uso no se puede alcanzar la utilización máxima dado que la carga es demasiado pequeña; esta situación no resulta de interés para nuestros objetivos actuales.

Ahora podemos estimar la longitud media de un intervalo de contención, w , en ranuras:

$$E[w] = \sum_{i=1}^{\infty} i \times \Pr \left[\begin{array}{l} \text{secuencia con } i \text{ ranuras con una colisión} \\ \text{o no transmisión, seguida por una ranura} \\ \text{con una transmisión} \end{array} \right] = \sum_{i=1}^{\infty} i(1 - A)^i A$$

La sumatoria converge a

$$E[w] = \frac{1 - A}{A}$$

Ahora se puede determinar la utilización máxima, que no es más que la longitud del intervalo de transmisión con respecto a un ciclo que consta del intervalo de transmisión y de otro de contención:

CSMA/CD: $U = \frac{1/2a}{1/2a + (1 - A)/A} = \frac{1}{1 + 2a(1 - A)/A}$	(16.7)
---	--------

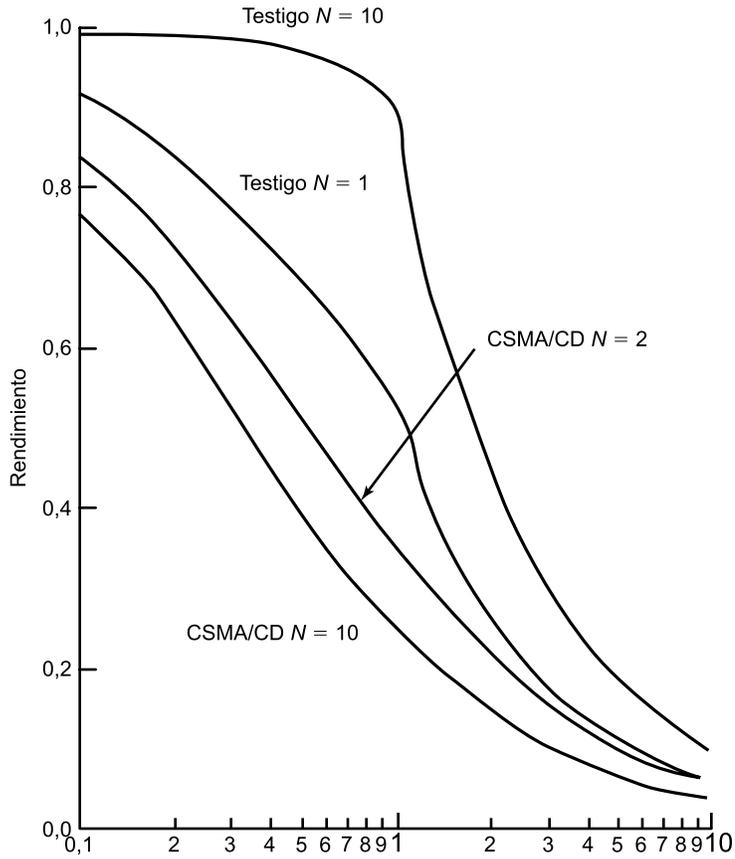


Figura 16.17. Rendimiento en función de a para las técnicas de paso de testigo y CSMA/CD.

En la Figura 16.17 se muestra el rendimiento normalizado como función de a para varios valores de N para las técnicas de paso de testigo y CSMA/CD. En ambos protocolos, el rendimiento decrece a medida que aumenta el parámetro a . Este resultado era de esperar, pero la gran diferencia entre los dos protocolos se muestra en la Figura 16.18, que representa el rendimiento en función de N . Las prestaciones de la técnica de paso de testigo mejoran en función de N , ya que se consume menos tiempo en el paso del testigo. Por el contrario, las prestaciones de la técnica CSMA/CD decrecen debido al incremento en la probabilidad de colisión o no transmisión.

Es interesante observar el comportamiento asintótico de U a medida que aumenta N .

$$\text{Paso de Testigo: } \lim_{N \rightarrow \infty} U = \begin{cases} 1 & a < 1 \\ \frac{1}{a} & a > 1 \end{cases} \quad (16.8)$$

Para CSMA/CD debemos saber que $\lim (1 - 1/N)^{N-1} = 1/e$. Por tanto, tenemos que:

CSMA/CD: $\lim_{N \rightarrow \infty} U = \frac{1}{1 + 3,44a}$	(16.9)
---	--------

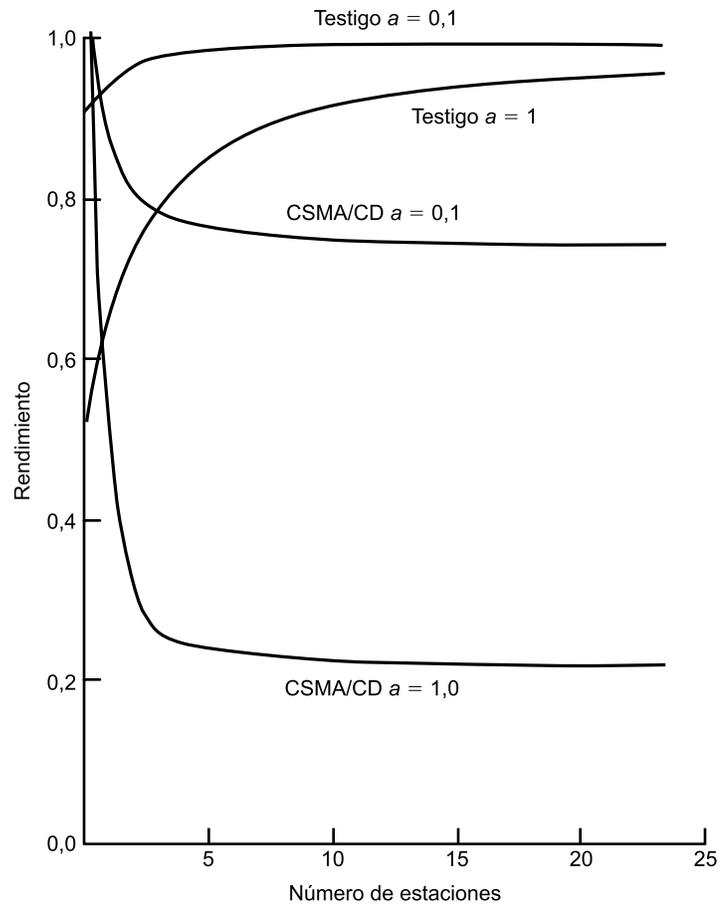


Figura 16.18. Rendimiento en función de N para las técnicas de paso de testigo y CSMA/CD.

