4.3.7 Fast Ethernet

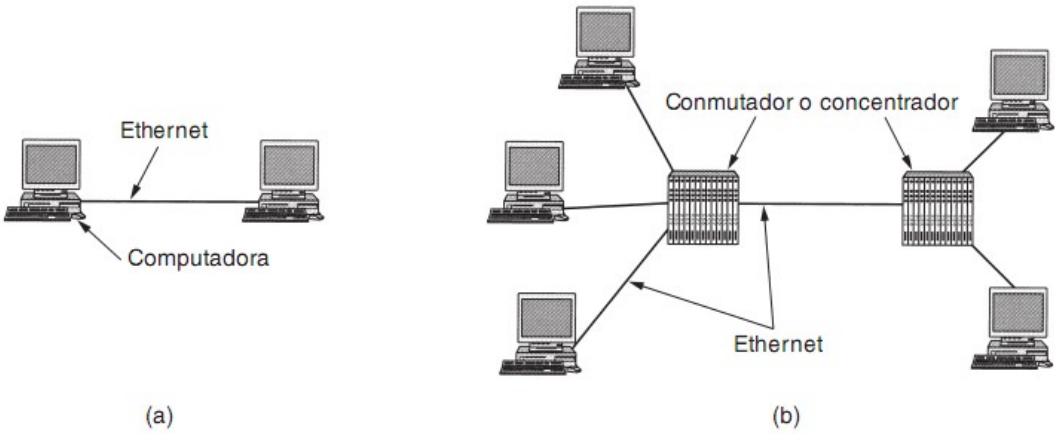
Al no popularizarse las LANs ópticas quedó un hueco para redes Ethernet de una gran variedad a velocidades superiores a 10 Mbps. Fue en este entorno que el IEEE convocó al comité 802.3 en 1992 con instrucciones de crear una LAN más rápida.
El comité 802.3 decidió crear una Ethernet mejorada por tres razones principales:
1. La necesidad de compatibilidad hacia atrás con las LANs Ethernet existentes.
2. El miedo de que un nuevo protocolo tuviera problemas no previstos.
3. El deseo de terminar el trabajo antes de que la tecnología cambiara.
El trabajo se terminó rápidamente (mediante las normas de los comités de estándares), y el resultado, 802.3u, fue aprobado oficialmente por el IEEE en junio de 1995. Técnicamente, 802.3u no es un nuevo estándar, sino un agregado al estándar existente 802.3 (para enfatizar su compatibilidad hacia atrás). Puesto que prácticamente todos lo llaman Fast Ethernet, en lugar de 802.3u, nosotros también lo haremos.
La idea básica detrás de Fast Ethernet era sencilla: mantener todos los formatos anteriores, interfaces y reglas de procedimientos, y sólo reducir el tiempo de bits de 100 nseg a 10 nseg. Técnicamente, habría sido posible copiar 10Base-5 o 10Base-2 y aún detectar colisiones a tiempo con sólo reducir la longitud máxima de cable por un factor de diez. Sin embargo, las ventajas del cableado 10Base-T eran tan abrumadoras que Fast Ethernet se basa por completo en este diseño. Por lo tanto, todos los sistemas Fast Ethernet utilizan concentradores y conmutadores; no se permiten cables con múltiples derivaciones vampiro ni conectores BNC.

Nombre	Cable	Segmento máximo	Ventajas
100Base-T4	Par trenzado	100 m	Utiliza UTP categoría 3
100Base-TX	Par trenzado	100 m	Dúplex total a 100 Mbps (UTP cat 5)
100Base-FX	Fibra óptica	2000 m	Dúplex total a 100 Mbps; distancias largas

El esquema UTP categoría 3, llamado 100Base-T4, utiliza una velocidad de señalización de 25 MHz, tan sólo 25 por ciento más rápida que los 20 MHz de la Ethernet estándar. Sin embargo, para alcanzar el ancho de banda necesario, 100Base-T4 requiere cuatro cables de par trenzado.
Para el cableado categoría 5, el diseño 100Base-TX es más simple porque los cables pueden manejar velocidades de reloj de 125 MHz. Sólo se utilizan dos cables de par trenzado por estación, uno para enviar y otro para recibir.
La última opción, 100Base-FX, utiliza dos filamentos de fibra multimodo, una para cada dirección, por lo que también es dúplex total con 100 Mbps en cada dirección. Además, la distancia entre una estación y el concentrador puede ser de hasta 2 km.
Como nota final, casi todos los conmutadores pueden manejar una mezcla de estaciones de 10 y 100 Mbps, para facilitar la actualización. Conforme un sitio adquiera más y más estaciones de trabajo de 100 Mbps, todo lo que tiene que hacer es comprar la cantidad necesaria de tarjetas de línea e insertarlas en el conmutador. De hecho, el estándar mismo proporciona una forma para que dos estaciones negocien de manera automática la velocidad óptima (10 o 100 Mbps) y el tipo de transmisión dúplex (semi o total). La mayoría de los productos de Fast Ethernet utilizan esta característica para autoconfigurarse.

4.3.8 Gigabit Ethernet

Los objetivos del comité 802.3z eran esencialmente los mismos que los del comité 802.3u: hacer que Ethernet fuera 10 veces más rápida y que permaneciera compatible hacia atrás con todos los estándares Ethernet existentes. En particular, Gigabit Ethernet tiene que ofrecer servicio de datagramas sin confirmación de recepción con difusión y multidifusión, utilizar el mismo esquema de direccionamiento de 48 bits que el actual y mantener el mismo formato de trama, incluyendo los tamaños mínimo y máximo de trama. El estándar final cumple con todos estos objetivos.
Todas las configuraciones de Gigabit Ethernet son de punto a punto en lugar de múltiples derivaciones como en el estándar original de 10 Mbps, ahora conocido como Ethernet clásica.
En la configuración más simple de Gigabit Ethernet, que se muestra en la figura 4-22(a), dos computadoras están conectadas de manera directa entre sí. Sin embargo, el caso más común es tener un conmutador o un concentrador conectado a múltiples computadoras y posiblemente a conmutadores o concentradores adicionales, como se muestra en la figura 4-22(b). En ambas configuraciones cada cable Ethernet individual tiene exactamente dos dispositivos en él, ni más ni menos.



Gigabit Ethernet soporta dos modos diferentes de funcionamiento: modo de dúplex total y modo de semidúplex. El modo “normal” es el de dúplex total, el cual permite tráfico en ambas direcciones al mismo tiempo.
El comité 802.3z consideró un radio de 25 metros como inaceptable y agregó dos características al estándar para incrementar el radio. La primera, llamada extensión de portadora, esencialmente indica al hardware que agregue su propio relleno después de la trama normal para extenderla a 512 bytes. Puesto que este relleno es agregado por el hardware emisor y eliminado por el hardware receptor, el software no toma parte en esto, lo que significa que no es necesario realizar cambios al software existente. Por supuesto, utilizar 512 bytes de ancho de banda para transmitir 46 bytes de datos de usuario (la carga útil de una trama de 64 bytes) tiene una eficiencia de línea de 9%.
La segunda característica, llamada ráfagas de trama, permite que un emisor transmita una secuencia concatenada de múltiples tramas en una sola transmisión. Si la ráfaga total es menor que 512 bytes, el hardware la rellena nuevamente. Si suficientes tramas están esperando la transmisión, este esquema es muy eficiente y se prefiere antes que la extensión de portadora. Estas nuevas características amplían el radio de red de 200 metros, que probablemente es suficiente para la mayoría de las oficinas.
Gigabit Ethernet soporta tanto el cableado de fibra óptica como el de cobre.

Nombre	Cable	Segmento máximo	Ventajas
1000Base-SX	Fibra óptica	550 m	Fibra multimodo (50, 62.5 micras)
1000Base-LX	Fibra óptica	5000 m	Sencilla (10 μ) o multimodo (50, 62.5 μ)
1000Base-CX	2 pares de STP	25 m	Cable de par trenzado blindado
1000Base-T	4 Pares de UTP	100 m	UTP categoría 5 estándar

1 Gbps es una velocidad muy alta. Por ejemplo, si un receptor está ocupado con otra tarea por incluso un 1 mseg y no vacía el búfer de entrada en alguna línea, podrían haberse acumulado ahí hasta 1953 tramas en ese espacio de 1 ms. Además, cuando una computadora en una Gigabit Ethernet está enviando datos en la línea a una computadora en una Ethernet clásica, es muy probable que sucedan rebases de búfer. Como consecuencia de estas dos observaciones, Gigabit Ethernet soporta control de flujo (como lo hace la Fast Ethernet, aunque los dos son diferentes).
El control de flujo consiste en que un extremo envíe una trama de control especial al otro extremo indicándole que se detenga por algún tiempo. Las tramas de control son tramas comunes de Ethernet que contienen un tipo de 0x8808. Los primeros dos bytes del campo de datos dan el comando; los bytes exitosos proporcionan los parámetros, si es que hay. Para control de flujo, se utilizan las tramas PAUSE, en las que el parámetro indica cuánto tiempo detenerse, en unidades de tiempo de la trama más pequeña. Para la Gigabit Ethernet, la unidad de tiempo es 512 nseg, lo que permite pausas de 33.6 mseg.

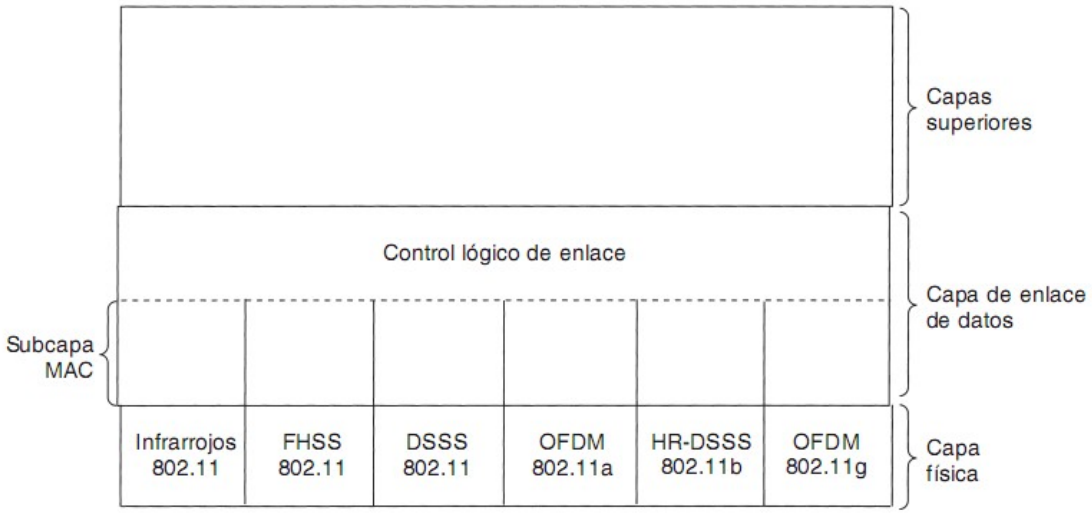
4.4 LANS INALÁMBRICAS

Aunque Ethernet se utiliza ampliamente, está a punto de tener un competidor fuerte. Las LANs inalámbricas se están volviendo muy populares, y más y más edificios de oficinas, aeropuertos y otros lugares públicos se están equipando con ellas. Las LANs inalámbricas pueden funcionar en una de dos configuraciones, como vimos en la figura 1-35: con una estación base y sin ninguna estación

base. En consecuencia, el estándar de LAN 802.11 toma en cuenta esto y se previene para ambos arreglos, como veremos más adelante.

4.4.1 La pila de protocolos del 802.11

Los protocolos utilizados por todas las variantes 802, entre ellas Ethernet, tienen ciertas similitudes de estructura. En la figura 4-25 se muestra una vista parcial de la pila de protocolos del estándar 802.11. La capa física corresponde muy bien con la capa física OSI, pero la capa de enlace de datos de todos los protocolos 802 se divide en dos o más subcapas. En el estándar 802.11, la subcapa MAC determina la forma en que se asigna el canal, es decir, a quién le toca transmitir a continuación. Arriba de dicha subcapa se encuentra la subcapa LLC, cuyo trabajo es ocultar las diferencias entre las variantes 802 con el propósito de que sean imperceptibles para la capa de red.
Anteriormente en este capítulo analizamos el LLC, cuando examinamos Ethernet, por lo que no repetiremos ese material aquí.
El estándar 802.11 de 1997 especifica tres técnicas de transmisión permitidas en la capa física. El método de infrarrojos utiliza en su mayor parte la misma tecnología que los controles remotos de televisión. Los otros dos métodos utilizan el radio de corto alcance, mediante técnicas conocidas como FHSS y DSSS. Éstas utilizan parte del espectro que no necesita licencia (la banda ISM de 2.4 GHz). Los abridores de puertas de cocheras controlados por radio también utilizan esta parte del espectro, por lo que su computadora portátil podría encontrarse compitiendo con la puerta de la cochera. Los teléfonos inalámbricos y los hornos de microondas también utilizan esta banda. Todas estas técnicas funcionan a 1 o 2 Mbps y con poca energía por lo que no interfieren mucho entre sí.



4.4.2 La capa física del 802.11

Cada una de las cinco técnicas permitidas de transmisión posibilitan el envío de una trama MAC de una estación a otra. Sin embargo, difieren en la tecnología utilizada y en las velocidades alcanzables. La opción de infrarrojos utiliza transmisión difusa (es decir, no requiere línea visual) a 0.85 o 0.95 micras. Se permiten dos velocidades: 1 y 2 Mbps. A 1 Mbps se utiliza un esquema de codificación en el cual un grupo de 4 bits se codifica como una palabra codificada de 16 bits, que contiene quince 0s y un 1, mediante ***código de Gray***. Este código tiene la propiedad de que un pequeño error en la sincronización en el tiempo lleva a un solo error de bits en la salida. A 2 Mbps, la codificación toma 2 bits y produce una palabra codificada de 4 bits, también con un solo 1, que es uno de 0001, 0010, 0100 o 1000. Las señales de infrarrojos no pueden penetrar las paredes, por lo que las celdas en los diferentes cuartos están bien aisladas entre sí. Sin embargo, debido al bajo ancho de banda (y al hecho de que la luz solar afecta las señales de infrarrojos), ésta no es una opción muy popular.
FHSS (Espectro Disperso con Salto de Frecuencia) utiliza 79 canales, cada uno de los cuales tiene un ancho de banda de 1 MHz, iniciando en el extremo más bajo de la banda ISM de 2.4 GHz. Para producir la secuencia de frecuencias a saltar, se utiliza un generador de números pseudoaleatorios. Siempre y cuando todas las estaciones utilicen la misma semilla para el generador de números pseudoaleatorios y permanezcan sincronizadas, saltarán de manera simultánea a la misma frecuencia. El tiempo invertido en cada frecuencia, el ***tiempo de permanencia***, es un parámetro ajustable, pero debe ser menor que 400 mseg. La aleatorización de FHSS proporciona una

forma justa de asignar espectro en la banda ISM no regulada. También proporciona algo de seguridad pues un intruso que no sepa la secuencia de saltos o el tiempo de permanencia no puede espiar las transmisiones. En distancias más grandes, el desvanecimiento de múltiples rutas puede ser un problema, y FHSS ofrece buena resistencia a ello. También es relativamente insensible a la interferencia de radio, lo que lo hace popular para enlaces de edificio en edificio. Su principal desventaja es su bajo ancho de banda.

El tercer método de modulación, ***DSSS (Espectro Disperso de Secuencia Directa)***, también está restringido a 1 o 2 Mbps. El esquema utilizado tiene algunas similitudes con el sistema CDMA que examinamos en la sección 2.6.2, pero difiere en otros aspectos. Cada bit se transmite como 11 chips, utilizando lo que se conoce como ***secuencia Barker***. Utiliza modulación por desplazamiento de fase a 1 Mbaudio, y transmite 1 bit por baudio cuando opera a 1 Mbps, y 2 bits por baudio cuando opera a 2 Mbps. Durante mucho tiempo, la FCC exigió que todo el equipo de comunicación inalámbrica que operaba en la banda ISM en Estado Unidos utilice el espectro disperso, pero en mayo de 2002 esa regla se eliminó conforme apareció nueva tecnología.

La primera de las LANs inalámbricas de alta velocidad, ***802.11a***, utiliza ***OFDM (Multiplexión por División de Frecuencias Ortogonales)*** para enviar hasta 54 Mbps en la banda ISM más ancha de 5 GHz. Como lo sugiere el término FDM, se utilizan frecuencias diferentes —52 en total, 48 para datos y 4 para sincronización— al igual que ADSL. Debido a que las transmisiones están presentes en múltiples frecuencias al mismo tiempo, esta técnica se considera como una forma de espectro disperso, pero es diferente a CDMA y a FHSS. Dividir la señal en bandas más estrechas tiene más ventajas que el uso de una sola banda ancha, entre ellas mejor inmunidad a la interferencia de bandas estrechas y la posibilidad de utilizar bandas no contiguas. Se utiliza un sistema de codificación complejo, con base en la modulación por desplazamiento de fase para velocidades de hasta 18 Mbps, y en QAM para velocidades mayores. A 54 Mbps, se codifican 216 bits de datos en símbolos de 288 bits. Parte del motivo para utilizar OFDM es la compatibilidad con el sistema europeo HiperLAN/2 (Doufexi y cols., 2002). La técnica tiene buena eficiencia de espectro en términos de bits/Hz y buena inmunidad al desvanecimiento de múltiples rutas.

A continuación analizaremos ***HR-DSSS (Espectro Disperso de Secuencia Directa de Alta Velocidad)***, otra técnica de espectro disperso, que utiliza 11 millones de chips/seg para alcanzar 11 Mbps en la banda de 2.4 GHz. Se llama 802.11b pero no es la continuación de 802.11a. De hecho, su estándar se aprobó primero y apareció primero en el mercado. Las tasas de datos soportadas por ***802.11b*** son 1, 2, 5.5 y 11 Mbps. Las dos tasas bajas se ejecutan a 1 Mbaudio, con 1 y 2 bits por baudio, respectivamente, utilizando modulación por desplazamiento de fase (por compatibilidad con DSSS). Las dos tasas más rápidas se ejecutan a 1.375 Mbaudios, con 4 y 8 bits por baudio, respectivamente, utilizando códigos ***Walsh/Hadamard***. La tasa de datos puede ser adaptada de manera dinámica durante la operación para alcanzar la velocidad más óptima posible bajo las condiciones actuales de la carga y el ruido. En la práctica, la velocidad de operación de 802.11b siempre es de aproximadamente 11 Mbps. Aunque 802.11b es más lento que 802.11a, su rango es aproximadamente 7 veces mayor, lo que es más importante en muchas situaciones.

En noviembre de 2001, el IEEE aprobó una versión mejorada de 802.11b, ***802.11g***, después de mucho politiqueo por cuál tecnología patentada podría utilizar. Utiliza el método de modulación OFDM de 802.11a pero opera en la banda ISM más estrecha 2.4 GHz ISM junto con 802.11b.

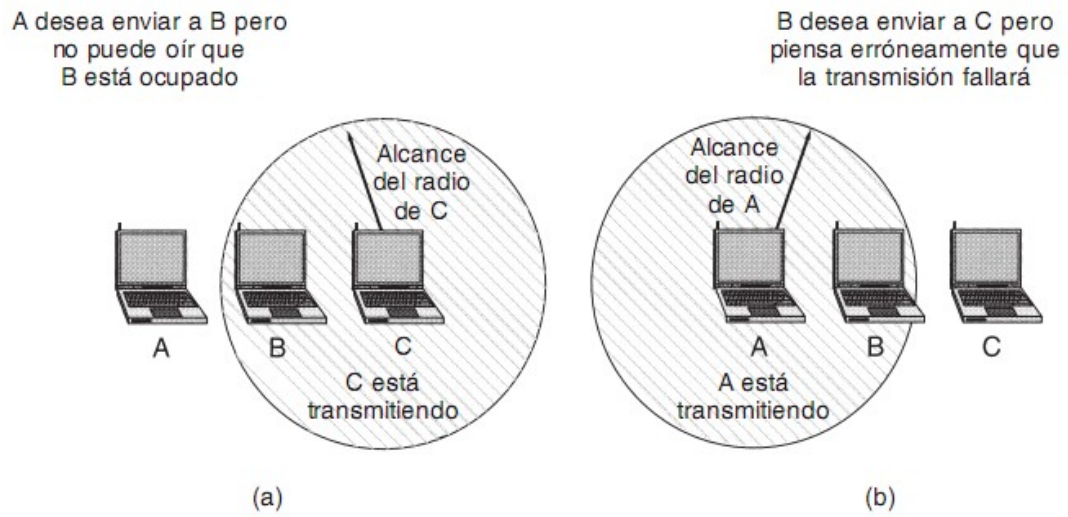
En teoría, puede operar hasta a 54 Mbps. Aún no se ha decidido si esta velocidad se va a alcanzar en la práctica. Lo que esto significa es que el comité 802.11 ha producido tres LANs inalámbricas diferentes de alta velocidad: 802.11a, 802.11b y 802.11g (sin mencionar las tres LANs inalámbricas de baja velocidad).

4.4.3 El protocolo de la subcapa MAC del 802.11

El protocolo de la subcapa MAC para el estándar 802.11 es muy diferente del de Ethernet debido a la complejidad inherente del entorno inalámbrico en comparación con el de un sistema cableado. Con Ethernet, una estación simplemente espera hasta que el medio queda en silencio y comienza a transmitir. Si no recibe una ráfaga de ruido dentro de los primeros 64 bytes, con seguridad la trama ha sido entregada correctamente. Esta situación no es válida para los sistemas inalámbricos.

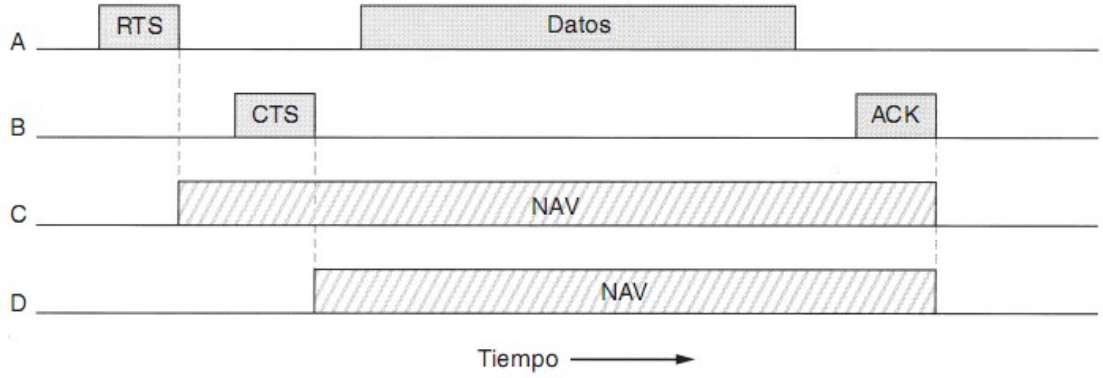
Para empezar, existe el problema de la estación oculta mencionado con anterioridad, el cual se ilustra nuevamente en la figura 4-26(a). Puesto que no todas las estaciones están dentro del alcance de radio de cada una, las transmisiones que van en un lado de una celda podrían no recibirse en otro lado de la misma celda. En este ejemplo, la estación C transmite a la estación B. Si A detecta el canal, no escuchará nada y concluirá erróneamente que ahora puede comenzar a transmitirá B. Además, existe el problema inverso, el de la estación expuesta, que se ilustra en la figura 4-26(b). Aquí B desea enviar a C por lo que escucha el canal. Cuando escucha una transmisión, concluye erróneamente que no debería transmitir a C, aunque A esté transmitiendo a D (lo cual no se muestra). Además, la mayoría de los radios son semidúplex, lo que significa que no pueden

transmitir y escuchar ráfagas de ruido al mismo tiempo en una sola frecuencia. Como resultado de estos problemas, 802.11 no utiliza CSMA/CD, como lo hace Ethernet.



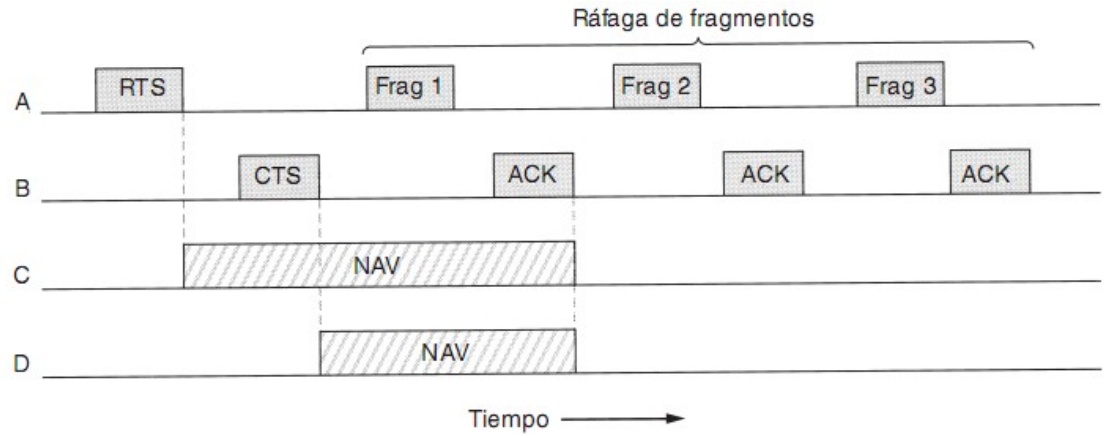
(a) El problema de la estación oculta. (b) El problema de la estación expuesta.

Para solucionar este problema, 802.11 suporta dos modos de funcionamiento. El primero, llamado ***DCF (Función de Coordinación Distribuida)***, no utiliza ningún tipo de control central (en ese aspecto, es similar a Ethernet). El otro, llamado ***PCF (Función de Coordinación Puntual)***, utiliza la estación base para controlar toda la actividad en su celda. Todas las implementaciones soportan DCF pero PCF es opcional. A continuación analizaremos estos dos modos a la vez.
Cuando se emplea DCF, 802.11 utiliza un protocolo llamado ***CSMA/CA (CSMA con Evitación de Colisiones)***. En este protocolo, se utiliza tanto la detección del canal físico como la del canal virtual. Los dos métodos de funcionamiento son soportados por CSMA/CA. En el primer método, cuando una estación desea transmitir, detecta el canal. Si está inactivo, comienza a transmitir. No detecta el canal mientras transmite pero emite su trama completa, la cual podría ser destruida en el receptor debido a interferencia. Si el canal está ocupado, el emisor espera hasta que esté inactivo para comenzar a transmitir. Si ocurre una colisión, las estaciones involucradas en ella esperan un tiempo aleatorio, mediante el algoritmo de retroceso exponencial binario de Ethernet, y vuelve a intentarlo más tarde.
El otro modo de la operación CSMA/CA se basa en MACAW y utiliza la detección de canal virtual, como se ilustra en la figura 4-27. En este ejemplo, A desea enviar a B. C es una estación que está dentro del alcance de A (y posiblemente dentro del alcance de B, pero eso no importa).
D es una estación dentro del alcance de B pero no dentro del de A.
El protocolo inicia cuando A decide enviar datos a B. A inicia enviándole una trama RTS a B en la que le solicita permiso para enviarle una trama. Cuando B recibe esta solicitud, podría decidir otorgarle el permiso, en cuyo caso le regresa una trama CTS. Al recibir la CTS, A ahora envía su trama y comienza su temporizador de ACK. Al recibir correctamente la trama de datos, B responde con una trama de ACK, con lo que termina el intercambio. Si el temporizador de ACK de A termina antes de que el ACK regrese, todo el protocolo se ejecuta de nuevo.
Ahora consideremos este intercambio desde el punto de vista de C y D. C está dentro del alcance de A, por lo que podría recibir la trama RTS. Si pasa esto, se da cuenta de que alguien va a enviar datos pronto, así que por el bien de todos desiste de transmitir cualquier cosa hasta que el intercambio esté completo. A partir de la información proporcionada en la solicitud RTS, C puede estimar cuánto tardará la secuencia, incluyendo el ACK final, por lo que impone para sí misma un tipo de canal virtual ocupado, indicado por ***NAV (Vector de Asignación de Red)*** en la figura4-27. D no escucha el RTS, pero sí el CTS, por lo que también impone la señal NAV para sí misma. Observe que las señales NAV no se transmiten; simplemente son recordatorios internos para mantenerse en silencio durante cierto periodo.



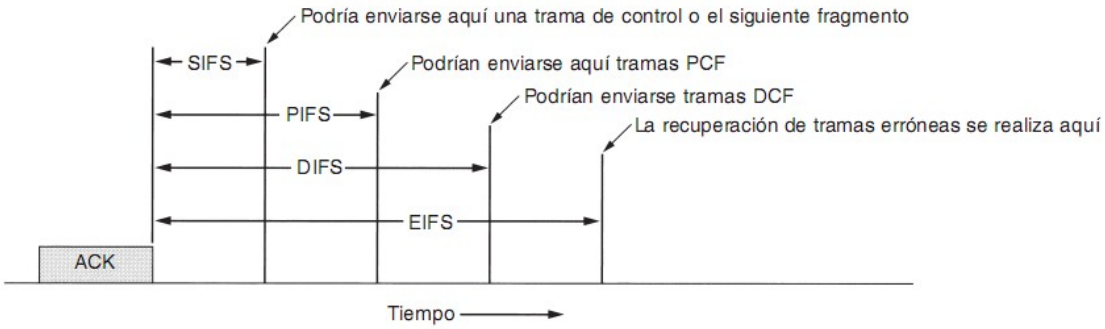
En contraste con las redes cableadas, las inalámbricas son ruidosas e inestables, en gran parte debido a los hornos de microondas, que también utilizan las bandas sin licencia ISM. Como consecuencia, la probabilidad de que una trama llegue a su destino se decrementa con la longitud de la trama.

Para solucionar el problema de los canales ruidosos, 802.11 permite dividir las tramas en fragmentos, cada uno con su propia suma de verificación. Cada fragmento se numera de manera individual y su recepción se confirma utilizando un protocolo de parada y espera (es decir, el emisor podría no transmitir fragmentos de k + 1 hasta que haya recibido la confirmación de recepción del fragmento k). Una vez que se ha adquirido el canal mediante RTS y CTS, pueden enviarse múltiples fragmentos en una fila, como se muestra en la figura 4-28. La secuencia de fragmentos se conoce como ***ráfaga de fragmentos***.
La fragmentación incrementa la velocidad real de transporte restringiendo las retransmisiones a los fragmentos erróneos en lugar de la trama completa. El tamaño del fragmento no lo fija el estándar pero es un parámetro de cada celda y la estación base puede ajustarlo. El mecanismo NAV mantiene otras estaciones en silencio sólo hasta la siguiente confirmación de recepción, pero se utiliza otro mecanismo (descrito a continuación) para permitir que otra ráfaga de fragmentos completa se envíe sin interferencia.



Todo el análisis anterior se aplica al modo DCF 802.11. En él, no hay control central y la estación compite por tiempo aire, como en Ethernet. El otro modo permitido es PCF, en el que la estación base sondea las demás estaciones, preguntándoles si tienen tramas que enviar. Puesto que el orden de transmisión se controla por completo por la estación base en el modo PCF, no ocurren colisiones. El estándar prescribe el mecanismo para sondeo, pero no la frecuencia del sondeo, el orden del sondeo, ni el hecho de que las demás estaciones necesiten obtener un servicio igual.
El mecanismo básico consiste en que la estación base difunda una trama ***de beacon*** (trama guía o faro) de manera periódica (de 10 a 100 veces por segundo). Esta trama contiene parámetros de sistema, como secuencias de salto y tiempos de permanencia (para FHSS), sincronización de reloj, etcétera. También invita a las nuevas estaciones a suscribirse al servicio de sondeo. Una vez que una estación se inscribe para el servicio de sondeo a cierta tasa, se le garantiza de manera efectiva cierta fracción de ancho de banda, y se hace posible proporcionar garantías de calidad de servicio.
La duración de la batería siempre es un problema en los dispositivos inalámbricos móviles, por lo que 802.11 pone atención al asunto de la administración de energía. En particular, una estación

base puede conducir una estación móvil al estado de hibernación hasta que dicha estación base o el usuario la saquen de él de manera explícita. Sin embargo, el hecho de indicar a una estación que entre en estado de hibernación significa que la estación base tiene la responsabilidad de almacenar en el búfer las tramas que vayan dirigidas a ella mientras la estación móvil esté hibernando. Posteriormente, esas tramas pueden colectarse.
PCF y DCF pueden coexistir dentro de una celda. Al principio podría parecer imposible tener control central y distribuido funcionando al mismo tiempo, pero 802.11 proporciona una forma de alcanzar este objetivo. Funciona definiendo cuidadosamente el intervalo de tiempo entre tramas.
Después de que se ha enviado una trama, se necesita cierta cantidad de tiempo muerto antes de que cualquier estación pueda enviar una trama. Se definen cuatro intervalos diferentes, cada uno con un propósito específico. Estos intervalos se describen en la figura 4-29.

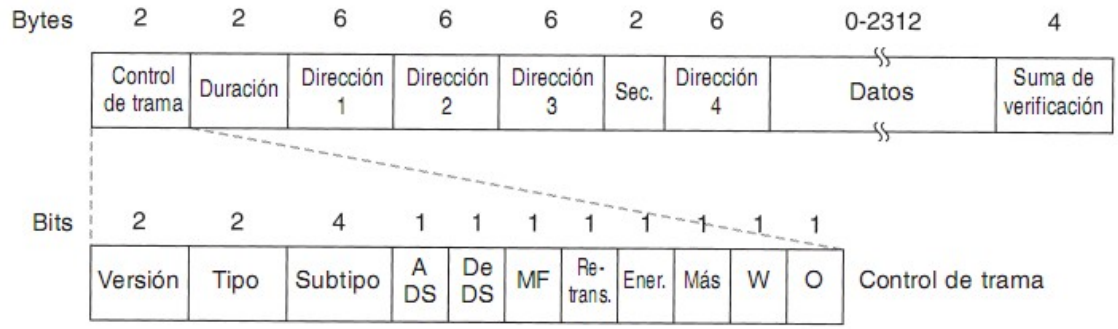


El intervalo más corto es ***SIFS (Espaciado Corto Entre Tramas)***. Se utiliza para permitir que las distintas partes de un diálogo transmitan primero. Esto incluye dejar que el receptor envíe un CTS para responder a una RTS, dejar que el receptor envíe un ACK para un fragmento o una trama con todos los datos y dejar que el emisor de una ráfaga de fragmentos transmita el siguiente fragmento sin tener que enviar una RTS nuevamente.
Siempre hay una sola estación que debe responder después de un intervalo SIFS. Si falla al utilizar su oportunidad y transcurre un tiempo ***PIFS (Espaciado Entre Tramas PCF)***, la estación base podría enviar una trama de beacon o una trama de sondeo. Este mecanismo permite que una estación base envíe una trama de datos o una secuencia de fragmentos para finalizar su trama sin que nadie interfiera, pero le da a la estación base la oportunidad de tomar el canal cuando el emisor anterior haya terminado, sin tener que competir con usuarios ansiosos.
Si la estación base no tiene nada que decir y transcurre un tiempo ***DIFS (Espaciado Entre Tramas DCF)***, cualquier estación podría intentar adquirir el canal para enviar una nueva trama.
Se aplican las reglas de contención normales, y si ocurre una colisión, podría necesitarse el retroceso exponencial binario.
Sólo una estación que acaba de recibir una trama errónea o desconocida utiliza el último intervalo de tiempo, ***EIFS (Espaciado Entre Tramas Extendido)***, para reportar la trama errónea.
La idea de dar a este evento la menor prioridad es que debido a que el receptor tal vez no tenga idea de lo que está pasando, debe esperar un tiempo considerable para evitar interferir con un diálogo en curso entre las dos estaciones.

4.4.4 La estructura de trama 802.11

El estándar 802.11 define tres clases diferentes de tramas en el cable: de datos, de control y de administración. Cada una de ellas tiene un encabezado con una variedad de campos utilizados dentro de la subcapa MAC. Además, hay algunos encabezados utilizados por la capa física, pero éstos tienen que ver en su mayor parte con las técnicas de modulación utilizadas, por lo que no las trataremos aquí.
En la figura 4-30 se muestra el formato de la trama de datos. Primero está el campo de *Control de trama*. Éste tiene 11 subcampos. El primero es la *Versión de protocolo*, que permite que dos versiones del protocolo funcionen al mismo tiempo en la misma celda. Después están los campos de *Tipo* (de datos, de control o de administración) y de *Subtipo* (por ejemplo, RTS o CTS). Los bits *A DS* y *De DS* indican que la trama va hacia o viene del sistema de distribución entre celdas (por ejemplo, Ethernet). El bit *MF* indica que siguen más fragmentos. El bit *Retrans* marca una retransmisión de una trama que se envió anteriormente. El bit de *Administración de energía* es utilizado por la estación base para poner al receptor en estado de hibernación o sacarlo de tal estado. El bit *Más* indica que el emisor tiene tramas adicionales para el receptor. El bit *W* especifica que el cuerpo de la trama se ha codificado utilizando el algoritmo ***WEP (Privacidad Inalámbrica Equivalente)***.

Por último, el bit *O* indica al receptor que una secuencia de tramas que tenga este bit encendido debe procesarse en orden estricto.



El segundo campo de la trama de datos, el de *Duración*, indica cuánto tiempo ocuparán el canal la trama y su confirmación de recepción. Este campo también está presente en las tramas de control y es la forma mediante la cual otras estaciones manejan el mecanismo NAV. El encabezado de trama contiene cuatro direcciones, todas en formato estándar IEEE 802. Obviamente se necesitan el origen y el destino, pero, ¿para qué son las otras dos? Recuerde que las tramas podrían entrar o dejar una celda a través de una estación base. Las otras dos direcciones se utilizan para las estaciones base de origen y destino para el tráfico entre celdas.
El campo de *Secuencia* permite que se numeren los fragmentos. De los 16 bits disponibles, 12 identifican la trama y 4 el fragmento. El campo de *Datos* contiene la carga útil, hasta 2312 bytes, y le sigue el campo común de *Suma de verificación*.
Las tramas de administración tienen un formato similar al de las tramas de datos, excepto que no tienen una de las direcciones de la estación base, debido a que las tramas de administración se restringen a una sola celda. Las tramas de control son más cortas; tienen una o dos direcciones, y no tienen ni campo de *Datos* ni de *Secuencia*. La información clave aquí se encuentra en el campo de *Subtipo*, que por lo general es RTS, CTS o ACK.

4.4.5 Servicios

El estándar 802.11 afirma que cada LAN inalámbrica que se apegue a él debe proporcionar nueve servicios. Éstos se dividen en dos categorías: cinco servicios de distribución y cuatro de estación. Los servicios de distribución se relacionan con la administración de membresías dentro de la celda y con la interacción con estaciones que están fuera de la celda. En contraste, los servicios de estación se relacionan con la actividad dentro de una sola celda.
Los cinco servicios de distribución son proporcionados por las estaciones base y tienen que ver con la movilidad de la estación conforme entran y salen de las celdas, conectándose ellos mismos a las estaciones base y separándose ellos mismos de dichas estaciones. Estos servicios son los siguientes:
1. **Asociación**. Este servicio es utilizado por las estaciones móviles para conectarse ellas mismas a las estaciones base. Por lo general, se utiliza después de que una estación se mueve dentro del alcance de radio de la estación base. Una vez que llega, anuncia su identidad y sus capacidades. Éstas incluyen las tasas de datos soportadas, necesarias para los servicios PCF (es decir, el sondeo), y los requerimientos de administración de energía. La estación base podría aceptar o rechazar la estación móvil. Si se acepta, dicha estación debe autenticarse.
2. **Disociación**. Es posible que la estación o la estación base se disocie, con lo que se rompería la relación. Una estación podría utilizar este servicio antes de apagarse o de salir, pero la estación base también podría utilizarlo antes de su mantenimiento.
3. **Reasociación**. Una estación podría cambiar su estación base preferida mediante este servicio. Esta capacidad es útil para estaciones móviles que se mueven de una celda a otra. Si se utiliza correctamente, no se perderán datos como consecuencia del cambio de estación base (*handover*). (Pero 802.11, al igual que Ethernet, es sólo un servicio de mejor esfuerzo.)
4. **Distribución**. Este servicio determina cómo enrutar tramas enviadas a la estación base. Si el destino es local para la estación base, las tramas pueden enviarse directamente a través del aire. De lo contrario, tendrán que reenviarse a través de la red cableada.
5. **Integración**. Si una trama necesita enviarse a través de una red no 802.11 con un esquema de direccionamiento o formato de trama diferentes, este servicio maneja la traducción del formato 802.11 al requerido por la red de destino. Los cuatro servicios restantes son dentro de las celdas (es decir, se relacionan con acciones dentro de una sola celda). Se utilizan después de que ha ocurrido la asociación y son las siguientes:

1. **Autenticación**. Debido a que las estaciones no autorizadas pueden recibir o enviar con facilidad la comunicación inalámbrica, una estación debe autenticarse antes de que se le permita enviar datos. Una vez que la estación base asocia una estación móvil (es decir, la ha aceptado en su celda), le envía una trama especial de desafío para ver si dicha estación móvil sabe la clave secreta (contraseña) que se le ha asignado. La estación móvil prueba que sabe la clave secreta codificando la trama de desafío y regresándola a la estación base. Si el resultado es correcto, la estación móvil se vuelve miembro de la celda. En el estándar inicial, la estación base no tiene que probar su identidad a la estación móvil, pero se está realizando trabajo para reparar este defecto en el estándar.
2. **Desautenticación**. Cuando una estación previamente autenticada desea abandonar la red, se desautentica. Después de esto, tal vez ya no utilice la red.
3. **Privacidad**. Para que la información que se envía a través de una LAN inalámbrica se mantenga confidencial, debe codificarse. Este servicio maneja la codificación y la decodificación. El algoritmo de codificación especificado es RC4, inventado por Ronald Rivest del M.I.T.
4. **Entrega de datos**. Por último, la transmisión de datos es la parte esencial, por lo que el 802.11 naturalmente proporciona una forma de transmitir y recibir datos. Puesto que el 802.11 está basado en Ethernet y no se garantiza que la transmisión a través de Ethernet sea 100% confiable, tampoco se garantiza que la transmisión a través del 802.11 sea confiable. Las capas superiores deben tratar con la detección y la corrección de errores.

Una celda 802.11 tiene algunos parámetros que pueden inspeccionarse y, en algunos casos, ajustarse. Se relacionan con la codificación, intervalos de expiración de temporizador, tasas de datos, frecuencia de la trama de *beacon*, etcétera.

4.5 BANDA ANCHA INALÁMBRICA

Con la desregulación del sistema telefónico en muchos países, en la actualidad a los competidores de la compañía telefónica arraigada con frecuencia se les permite ofrecer voz local y servicio de alta velocidad de Internet. Ciertamente hay mucha demanda. El problema es que el tendido de fibra óptica, cable coaxial o incluso cable de par trenzado categoría 5 a millones de casas y oficinas es extremadamente costoso. ¿Qué debe hacer un competidor?
La respuesta es la banda ancha inalámbrica. Construir una antena enorme en una colina en las afueras del pueblo e instalar antenas que se dirijan a dicha antena en los techos de los clientes es más fácil y barato que cavar zanjas y ensartar cables. Por lo tanto, las compañías de telecomunicación en competencia tienen mucho interés en proporcionar un servicio de comunicación inalámbrica de multimegabits para voz, Internet, películas bajo demanda, etcétera. Como vimos en la figura 2-30, los LMDS se inventaron para este propósito. Sin embargo, hasta hace poco, cada portadora diseñaba su propio sistema. Esta falta de estándares significaba que el hardware y software no se podía producir en masa, por lo que los precios eran altos y la aceptación, baja. Muchas personas en la industria se dieron cuenta de que tener un estándar de banda ancha inalámbrica era el elemento clave que faltaba, por lo que se le pidió a IEEE que formara un comité compuesto de personas de compañías clave y de academias para redactar el estándar. El siguiente número disponible en el espacio de numeración 802 era 802.16, por lo que el estándar obtuvo este número. El trabajo se inició en julio de 1999, y el estándar final se aprobó en abril de 2002. Oficialmente el estándar se llama “Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems” (Interfaz de Aire para Sistemas Fijos de Acceso Inalámbrico de Banda Ancha). Sin embargo, algunas personas prefieren llamarlo MAN (red de área metropolitana) inalámbrica o circuito local inalámbrico. Nos referiremos a estos términos de manera indistinta.
Al igual que los otros estándares 802, el 802.16 estuvo influido fuertemente por el modelo OSI, incluyendo las (sub)capas, terminología, primitivas de servicios y más. Desgraciadamente, al igual que OSI, es muy complicado.

4.5.1 Comparación entre los estándares 802.11 y 802.16

En este punto tal vez piense: ¿Por qué diseñar un nuevo estándar? ¿Por qué no simplemente utilizar 802.11? Hay algunas buenas razones para no utilizar 802.11, principalmente porque 802.11 y 802.16 resuelven diferentes problemas. Antes de introducirnos en la tecnología de 802.16, probablemente valga la pena dar algunos detalles de por qué es necesario un estándar completamente nuevo.
Los entornos en los que funcionan 802.11 y 802.16 son similares en algunas formas, principalmente en que fueron diseñados para proporcionar comunicaciones inalámbricas de alto ancho de banda. Pero también difieren en aspectos muy importantes. Para empezar, el protocolo 802.16 proporciona servicio a edificios, y éstos no son móviles. No migran de celda a celda con frecuencia. La mayor

parte de 802.11 tiene que ver con la movilidad, y nada de eso es relevante aquí. Además, los edificios pueden tener más de una computadora en ellos, lo cual no ocurre cuando la estación final es una sola computadora portátil.
Debido a que los dueños de edificios por lo general están dispuestos a gastar mucho más dinero en artículos de comunicación que los dueños de computadoras portátiles, hay mejores radios disponibles. Esta diferencia significa que 802.16 puede utilizar comunicación de dúplex total, algo que 802.11 evita para mantener bajo el costo de los radios.
Puesto que el estándar 802.16 se usa en parte de la ciudad, las distancias involucradas pueden ser de varios kilómetros, lo que significa que la energía detectada en la estación base puede variar considerablemente de estación en estación. Esta variación afecta la relación señal a ruido, que, a su vez, fija múltiples esquemas de modulación. Además, la comunicación abierta a través de la ciudad significa que la seguridad y privacidad son esenciales y obligatorias.
Además, es probable que cada celda tenga muchos más usuarios que una celda 802.11 típica, y se espera que estos usuarios utilicen más ancho de banda que un usuario 802.11 típico. Después de todo es raro que una compañía reúna a 50 empleados con sus computadoras portátiles en un cuarto para ver si pueden saturar la red inalámbrica 802.11 al observar a la vez 50 películas por separado. Por esta razón es necesario más espectro del que las bandas ISM pueden proporcionar, con lo que se obliga al estándar 802.16 a funcionar en el rango de frecuencia más alto de 10 a 66 GHz, el único lugar en el que el espectro no utilizado aún está disponible.
Pero estas ondas milimétricas tienen propiedades físicas diferentes que las ondas más largas en las bandas ISM, que a su vez requieren una capa física completamente diferente. Una propiedad de las ondas milimétricas es que el agua (especialmente la lluvia y, en cierta medida, la nieve, el granizo y, con un poco de mala suerte, la niebla espesa) las absorbe por completo. En consecuencia, el control de errores es más importante que en un entorno interno. Las ondas milimétricas pueden enfocarse en rayos direccionales (802.11 es omnidireccional), por lo que las opciones realizadas en 802.11 relacionadas con la propagación de múltiples rutas son debatibles.
Otro aspecto es la calidad del servicio. Si bien el estándar 802.11 proporciona soporte para el tráfico en tiempo real (utilizando el modo PCF), realmente no se diseñó para uso extenso de telefonía y multimedia. En contraste, se espera que el estándar 802.16 soporte estas aplicaciones por completo porque está diseñado para uso residencial y de negocios.
En resumen, 802.11 se diseñó para ser una Ethernet móvil, mientras que el estándar 802.16 se diseñó para ser televisión por cable inalámbrica, pero estacionaria. Estas diferencias son tan grandes que los estándares resultantes son muy diferentes debido a que tratan de optimizar cosas distintas.
Vale la pena hacer una pequeña comparación con el sistema de teléfonos celulares. Al referirnos a los teléfonos celulares, hablamos de estaciones móviles de banda estrecha, baja potencia y con orientación a voz que se comunican mediante microondas de longitud media. Nadie ve (todavía) películas de 2 horas a alta resolución en teléfonos móviles GSM. Incluso UMTS tiene poca esperanza de cambiar esta situación. En resumen, el mundo de las MANs inalámbricas es más demandante que el de los teléfonos móviles, por lo que se necesita un sistema completamente diferente. El hecho de que en el futuro el estándar 802.16 pueda utilizarse para dispositivos móviles es una pregunta interesante. No fue optimizado para ellos, pero la posibilidad está abierta. Por el momento se enfoca en los sistemas inalámbricos fijos.

4.7 CONMUTACIÓN EN LA CAPA DE ENLACE DE DATOS

Muchas organizaciones tienen varias LANs y desean interconectarlas. Este tipo de redes se puede conectar mediante dispositivos llamados puentes, que funcionan en la capa de enlace de datos. Los puentes examinan las direcciones de la capa de enlace de datos para enrutar los datos.
Como no tienen que examinar el campo de carga útil de las tramas que enrutan, pueden transportar paquetes IPv4 (que se utilizan actualmente en Internet), IPv6 (que se utilizarán en el futuro en Internet), AppleTalk, ATM, OSI o de otros tipos. En contraste, los enrutadores examinan las direcciones de los paquetes y realizan su trabajo de enrutamiento con base en ellas. Aunque ésta parece una clara división entre los puentes y los enrutadores, algunos desarrollos modernos, como el surgimiento de la Ethernet conmutada, han enturbiado las aguas, como veremos más tarde. En las siguientes secciones analizaremos los puentes y los conmutadores, en especial para conectar diferentes LANs 802.

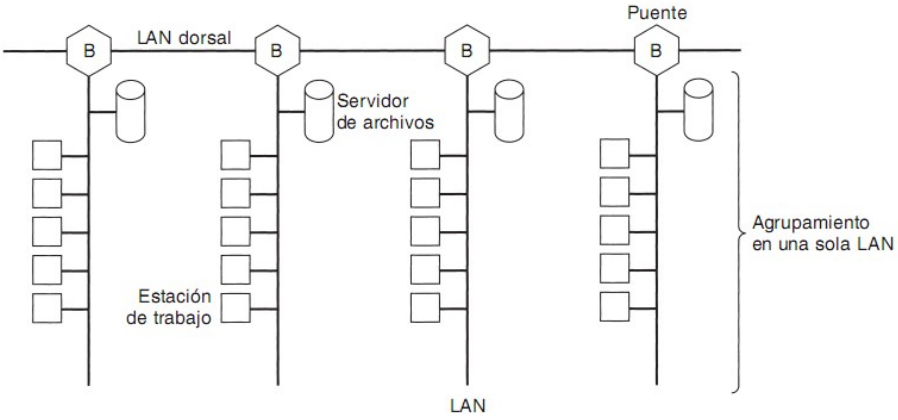


Figura 4-39. Varias LANs conectadas mediante una red dorsal para manejar una carga total mayor que la capacidad de una sola LAN.

En el plano ideal, los puentes deberían ser totalmente transparentes, es decir, debería ser posible cambiar una máquina de un segmento a otro sin necesidad de modificar el hardware, software o tablas de configuración. Asimismo, debería ser posible que las máquinas de un segmento se comunicaran con las de cualquier otro segmento sin que importara el tipo de LAN que se utilizara en ambos segmentos o en los segmentos que hubiera entre ellos. Este objetivo se consigue en ocasiones, pero no siempre.

4.7.1 Puentes de 802.x a 802.y

Después de comprender por qué son necesarios los puentes, pasemos a la cuestión de su funcionamiento. En la figura 4-40 se ilustra la operación de un puente sencillo de dos puertos. El *host* A en una LAN (802.11) inalámbrica tiene un paquete por enviar a un *host* fijo, B, en una Ethernet (802.3) a la cual se encuentra conectada la LAN inalámbrica. El paquete desciende a la subcapa LLC y adquiere un encabezado LLC (aparece en negro en la figura). A continuación el paquete pasa a la subcapa MAC y se le antepone un encabezado 802.11 (también un terminador, que no se muestra en la figura). Esta unidad viaja a través del aire y es captada por la estación base, que se percata de que tiene que pasar por la Ethernet fija. Cuando el paquete llega al puente que conecta la red 802.11 con la 802.3, empieza en la capa física y realiza el recorrido hacia arriba. El encabezado 802.11 se elimina en la subcapa MAC del puente. El paquete recortado (con el encabezado LLC) se pasa a la subcapa LLC del puente. En este ejemplo, el paquete está destinado a una LAN 802.3, por lo que recorre la ruta hacia abajo en el lado 802.3 del puente y al terminar pasa a la red Ethernet. Observe que un puente que conecta *k* LANs diferentes tendrá *k* subcapas MAC diferentes y *k* capas físicas diferentes, una para cada tipo.

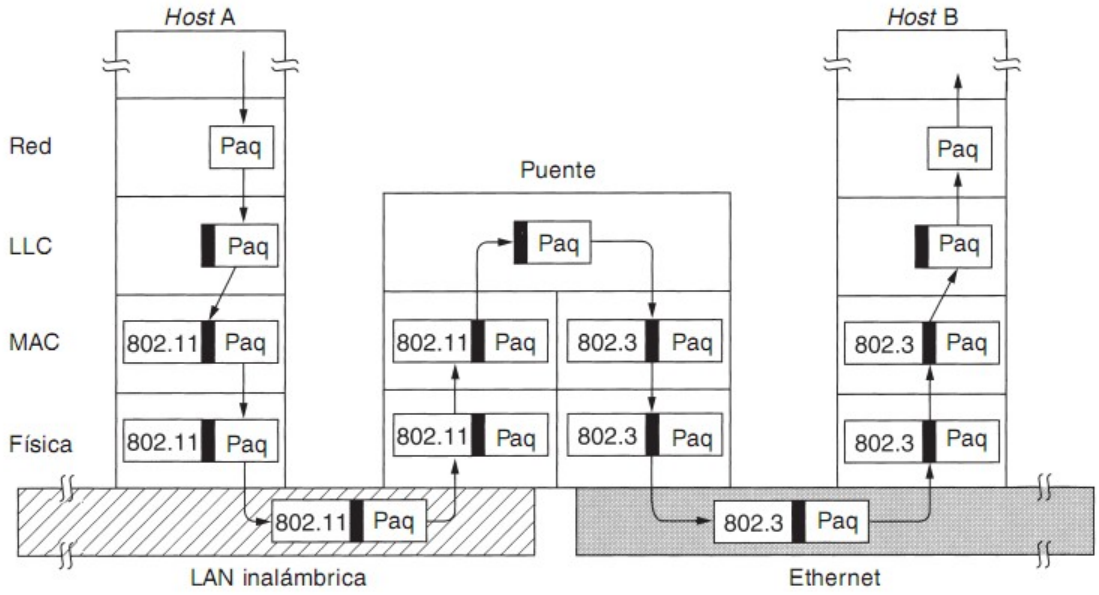


Figura 4-40. Operación de un puente entre una red 802.11 y una 802.3.

Hasta aquí pareciera que es muy sencillo desplazar una trama de una LAN a otra. No es así. En esta sección señalaremos algunos de los problemas que se enfrentan al intentar construir un puente entre las diversas LANs (y MANs) 802. Nos concentraremos en 802.3, 802.11 y 802.16, pero existen otras, cada una con sus propios problemas.

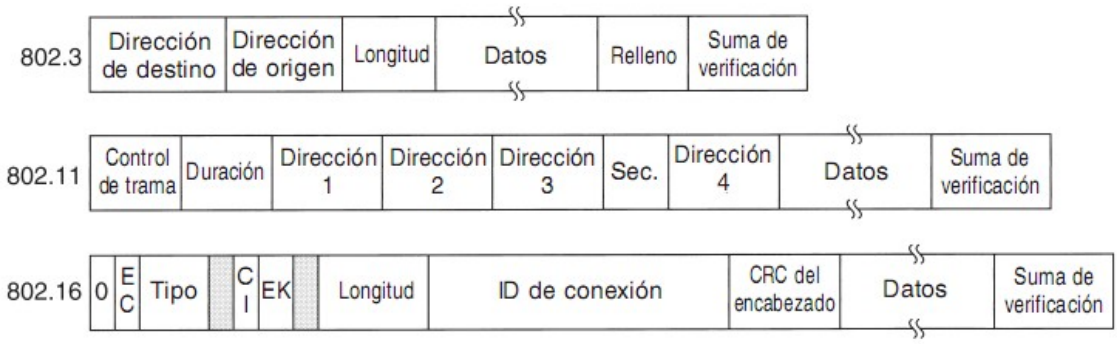


Figura 4-41. Formatos de trama de la redes 802. El dibujo no es a escala.

Para empezar, cada LAN utiliza un formato de trama distinto (vea la figura 4-41). En contraste con las diferencias entre Ethernet, token bus y token ring, que se originaron por la historia y el ego de las grandes corporaciones, aquí las diferencias son válidas hasta cierto punto. Por ejemplo, el campo *Duración* en 802.11 se justifica por el protocolo MACAW y no tiene sentido en Ethernet. En consecuencia, cualquier copia que se realice entre LANs distintas requiere de volver a dar formato, lo que lleva tiempo de CPU, una nueva suma de verificación y se presenta la posibilidad de errores sin detectar debido a bits erróneos en la memoria del puente.

Un segundo problema es que las LANs interconectadas no necesariamente operan a la misma tasa de datos. Al retransmitir una gran cantidad de tramas una tras otra, provenientes de una LAN rápida a otra más lenta, el puente será incapaz de despachar las tramas con la misma rapidez que arriban. Por ejemplo, si una Gigabit Ethernet envía bits a su velocidad máxima a una LAN 802.11b de 11 Mbps, el puente tendrá que almacenarlos en búfer, con la esperanza de no agotar su memoria. Los puentes que conectan tres o más LANs tienen un problema similar cuando varias LANs intentan enviar datos a una misma LAN al mismo tiempo aun cuando todas operen a la misma velocidad.

Un tercer problema, y potencialmente el más grave de todos, es que distintas LANs 802 tienen diferentes longitudes máximas de trama. Un problema obvio surge cuando una trama grande tiene que reenviarse a una LAN que no puede aceptarla. En esta capa no es posible dividir la trama. Todos los protocolos dan por sentado que las tramas llegan o se pierden. No se considera el reensamblado de las tramas a partir de unidades más pequeñas. Lo anterior no significa que no se pueden diseñar tales protocolos. Es posible y se ha hecho. Es sólo que ningún protocolo de enlace de datos confiere esta característica, así que los puentes deben olvidarse de manipular la carga útil de la trama. En

esencia, no hay solución. Las tramas demasiado grandes para reenviarse deben descartarse. Es suficiente sobre la transparencia.
Otro punto es la seguridad. Tanto el 802.11 como el 802.16 soportan encriptación en la capa de enlace de datos. Ethernet no. Esto significa que los diversos servicios de encriptación disponibles en las redes inalámbricas se pierden cuando el tráfico pasa sobre una Ethernet. Peor aún, si una estación inalámbrica emplea encriptación en la capa de enlace de datos, no habrá forma de desencriptar los datos cuando lleguen a la red Ethernet. Si la estación inalámbrica no utiliza encriptación, su tráfico quedará expuesto en el enlace aéreo. De cualquier manera hay un problema. Una solución al problema de la seguridad es realizar la encriptación en una capa superior, pero en este caso la estación 802.11 tiene que saber si se está comunicando con otra estación sobre una red 802.11 (lo que significa que utilizará encriptación en la capa de enlace de datos) o con una distinta (en cuyo caso no utilizará encriptación). Al obligar a la estación a elegir se destruye la transparencia.
Un punto final es la calidad del servicio. Tanto el 802.11 como el 802.16 la ofrecen en diversas formas, el primero con el modo PCF y el último mediante conexiones a tasas de bits constantes. En Ethernet no existe el concepto de calidad del servicio, así que el tráfico proveniente de alguna de las anteriores perderá su calidad de servicio al pasar por una Ethernet.

4.7.2 Interconectividad local

La sección anterior examinó los problemas que surgen al conectar dos LANs IEEE 802 distintas mediante un solo puente. Sin embargo, en grandes organizaciones con muchas LANs, la sola interconexión entre todas da lugar a muchos problemas, aun cuando todas sean Ethernet. En un plano ideal, debería bastar con adquirir puentes diseñados para el estándar IEEE e insertar los conectores en el puente para que todo funcionara perfectamente al instante. No deberían ser necesarios cambios de hardware ni de software, ni configurar conmutadores de direcciones, descargar tablas de enrutamiento ni parámetros, nada. Tan sólo conectar los cables y empezar a trabajar. Más aún, los puentes no deberían afectar de ninguna manera el funcionamiento de LANs existentes. En otras palabras, los puentes deberían ser completamente transparentes (invisibles para todo el hardware y el software). Sorprendentemente, esto es posible. Echemos un vistazo a la manera en que se hace realidad esta magia.
En su forma más sencilla, un puente transparente funciona en modo promiscuo y acepta todas las tramas transmitidas sobre las LANs a las cuales está conectado. Tomemos como ejemplo la configuración de la figura 4-42. El puente B1 está conectado a las LANs 1 y 2, y el puente B2 está conectado a las LANs 2, 3 y 4. Una trama que llega al puente B1 en la LAN 1 con destino a *A* se puede descartar de inmediato porque se encuentra en la LAN correcta, pero una trama que llega a la LAN 1 con destino a *C* o *F* debe reenviarse.

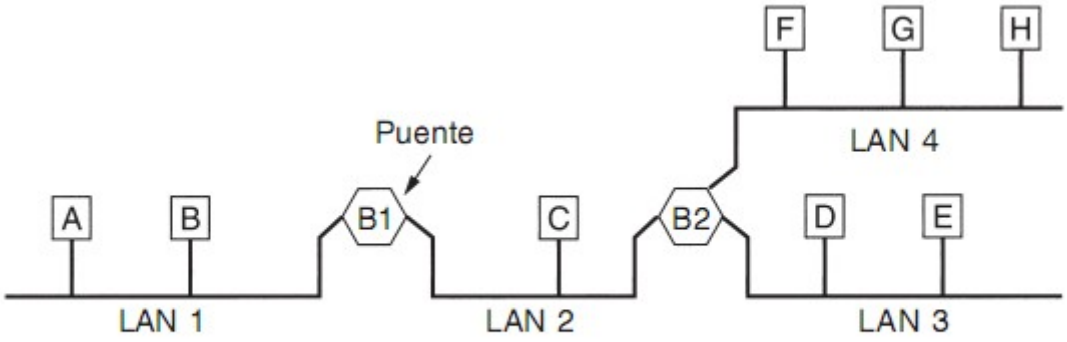


Figura 4-42. Configuración con cuatro LANs y dos puentes.

Cuando llega una trama, un puente debe decidir si la descarta o la reenvía, y si elige lo último, a cuál LAN la mandará. Esta decisión la toma consultando la dirección de destino en una enorme tabla (de *hash*) que se encuentra en su interior. La tabla lista cada posible destino e indica a cuál línea de salida (LAN) pertenece la trama. Por ejemplo, la tabla de B2 podría listar que A pertenece a LAN 2, ya que todo lo que B2 tiene que saber es a cuál LAN enviar las tramas para *A*. No le preocupa en absoluto el hecho de que posteriormente ocurran más reenvíos.
Cuando los puentes se conectan por primera vez, todas las tablas de *hash* están vacías. Ninguno de los puentes sabe dónde se encuentran los destinos, por lo que utilizan un algoritmo de inundación: todas las tramas que llegan con un destino desconocido se envían a todas las LANs a las cuales está conectado el puente, excepto a aquélla de la cual proceden. Con el paso del tiempo, los puentes

aprenden dónde están los destinos, como se describe más adelante. Una vez conocido un destino, las tramas para él se reenvían solamente a la LAN apropiada en lugar de a todas las LANs.

El algoritmo que los puentes transparentes utilizan es **aprendizaje hacia atrás**. Como ya mencionamos, los puentes funcionan en modo promiscuo y de esta manera pueden ver todas las tramas que se envían a cualquiera de sus LANs. Al examinar la dirección del origen, pueden saber cuál máquina está disponible en cuál LAN. Por ejemplo, si el puente B1 de la figura 4-42 ve una trama proveniente de C en la LAN 2, sabe que es posible acceder a *C* por medio de la LAN 2, así que registra una entrada en su tabla de *hash* con la observación de que las tramas para *C* deben utilizar la LAN 2. Cualquier trama subsecuente dirigida a *C* que llegue desde la LAN 1 será reenviada, pero una trama para C que llegue desde la LAN 2 será descartada.
La topología puede cambiar conforme las máquinas y los puentes se enciendan y apaguen, o cuando se trasladen de un sitio a otro. Para manejar topologías dinámicas, siempre que se realiza una entrada en una tabla de *hash* se registra en la entrada la hora de llegada de una trama. Siempre que llega una trama cuyo origen ya está en la tabla, su entrada se actualiza con la hora actual. Por lo tanto, la hora asociada a cada entrada indica la última vez que se registró una trama proveniente de ese origen.
Un proceso del puente analiza periódicamente la tabla de *hash* y purga todas las entradas que tengan más de algunos minutos. De esta manera, si una computadora se desconecta de su LAN, se traslada a otro lugar del edificio y se vuelve a conectar en algún otro lugar, en pocos minutos volverá a funcionar con normalidad, sin necesidad de intervención manual. Este algoritmo también significa que si una máquina está inactiva durante algunos minutos, el tráfico destinado a ella será inundado hasta que la máquina misma envíe una trama.
El procedimiento de enrutamiento para una trama entrante depende de la LAN de que proceda (la LAN de origen) y de la LAN a la cual está destinada (la LAN de destino), como se puede ver a continuación:
1. Si las LANs de destino y de origen son la misma, descartar la trama.
2. Si las LANs de destino y de origen son diferentes, reenviar la trama.
3. Si se desconoce la LAN de destino, recurrir a la inundación.

Este algoritmo debe aplicarse cada vez que llega una trama. Chips VLSI especiales realizan la consulta y actualización de las entradas de la tabla en tan sólo algunos microsegundos.

4.7.3 Puentes con árbol de expansión

Para incrementar la confiabilidad, algunos sitios utilizan dos o más puentes en paralelo entre pares de LANs, como se muestra en la figura 4-43. Sin embargo, este arreglo también genera algunos problemas adicionales porque produce ciclos en la topología.

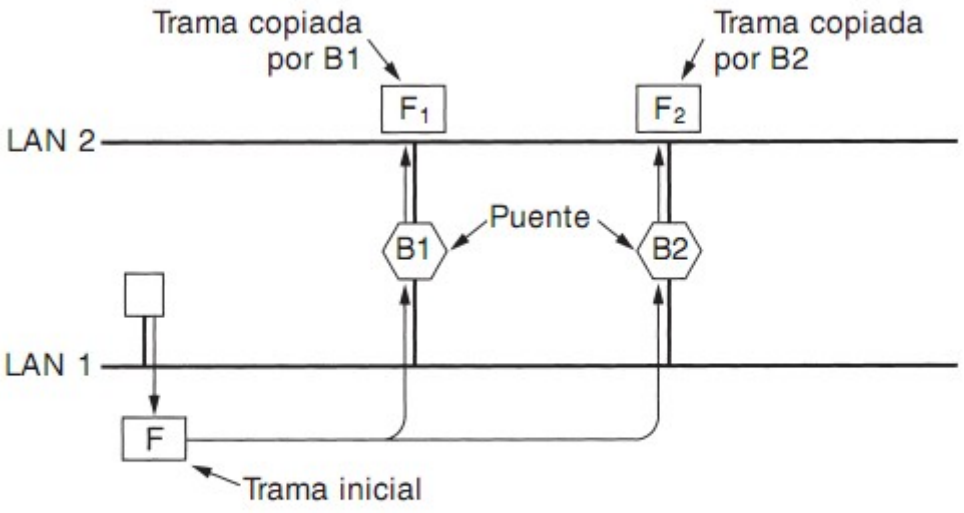


Figura 4-43. Dos puentes paralelos transparentes.

Un ejemplo simple de estos problemas lo tenemos al observar cómo se maneja una trama, F, con destino desconocido, en la figura 4-43. Cada puente, siguiendo las reglas normales para el manejo de destinos desconocidos, recurre a la inundación, que en este ejemplo es tan sólo copiar la trama a la LAN 2. Poco después, el puente 1 detecta a F_2, una trama con destino desconocido, y la copia a la

LAN 1, lo cual genera a F3 (no se muestra). De manera similar, el puente 2 copia a F_1 a la LAN 1 y genera a F_4 (tampoco se muestra). El puente 1 reenvía ahora a F_4 y el puente 2 copia a F_3. Este ciclo se repite una y otra vez.

La solución a este problema es que los puentes se comuniquen entre sí y cubran la topología existente con un árbol de expansión que llegue a todas las LANs. En realidad, algunas conexiones potenciales entre LANs se ignoran en el afán de construir una topología ficticia libre de ciclos. Por ejemplo, en la figura 4-44(a) vemos nueve LANs interconectadas por diez puentes. Esta configuración se puede abstraer en un grafo con las LANs como nodos. Un arco conecta dos LANs que estén unidas por un puente. El grafo puede reducirse a un árbol de expansión eliminando los arcos que se muestran como líneas punteadas en la figura 4-44(b). Con este árbol de expansión existe exactamente una ruta desde cada LAN hasta las demás LANs. Una vez que los puentes se ponen de acuerdo en el árbol de expansión, todos los reenvíos entre LANs se hacen a través del árbol de expansión. Puesto que existe sólo una ruta de cada origen a cada destino, es imposible que se generen ciclos.

Para construir el árbol de expansión, los puentes primero tienen que escoger un puente que funja como raíz del árbol. Toman esta decisión haciendo que cada uno difunda su número de serie, instalado por el fabricante y con garantía de ser único en el mundo. El puente con el menor número de serie se vuelve la raíz. A continuación, se construye un árbol con las rutas más cortas de la raíz a cada puente y LAN. Éste es el árbol de expansión. Si falla un puente o una LAN, se calcula un árbol nuevo.

El resultado de este algoritmo es que se establece una ruta única de cada LAN hasta la raíz y, por tanto, a todas las demás LANs. Aunque el árbol abarca todas las LANs, no necesariamente están presentes todos los puentes en el árbol (para evitar ciclos). Aun después de que se ha establecido el árbol de expansión, el algoritmo continúa operando a fin de detectar automáticamente cambios de topología y actualizar el árbol. El algoritmo distribuido que se usa para construir el árbol de expansión fue inventado por Radia Perlman y se describe en detalle en (Perlman, 2000). Se estandarizó en el IEEE 802.1D.

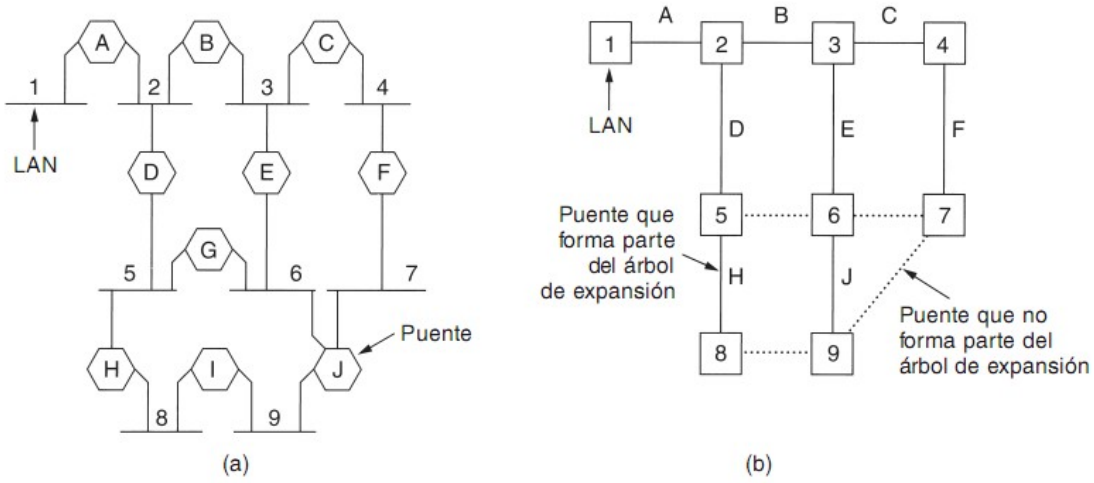


Figura 4-44. (a) LANs interconectadas. (b) Árbol de expansión que abarca las LANs. Las líneas punteadas no son parte del árbol de expansión.

4.7.4 Puentes remotos

Un uso común de los puentes es conectar dos (o más) LANs distantes. Por ejemplo, una empresa podría contar con plantas en varias ciudades, cada una con su propia LAN. En un plano ideal, todas las LANs deberían estar interconectadas de tal forma que funcionaran como una sola LAN grande. Este objetivo se puede cumplir colocando un puente en cada LAN y conectando los puentes por pares con líneas punto a punto (por ejemplo, líneas alquiladas a una compañía telefónica). En la figura 4-45 se ilustra un sistema sencillo, con tres LANs. Aquí se aplican los algoritmos comunes de enrutamiento. La forma más sencilla de entender esto es considerar las tres líneas punto a punto como LANs sin *hosts*. A continuación tenemos un sistema normal de seis LANs interconectadas mediante cuatro puentes. En ninguna parte hasta aquí hemos dicho que una LAN debe contener *hosts*.

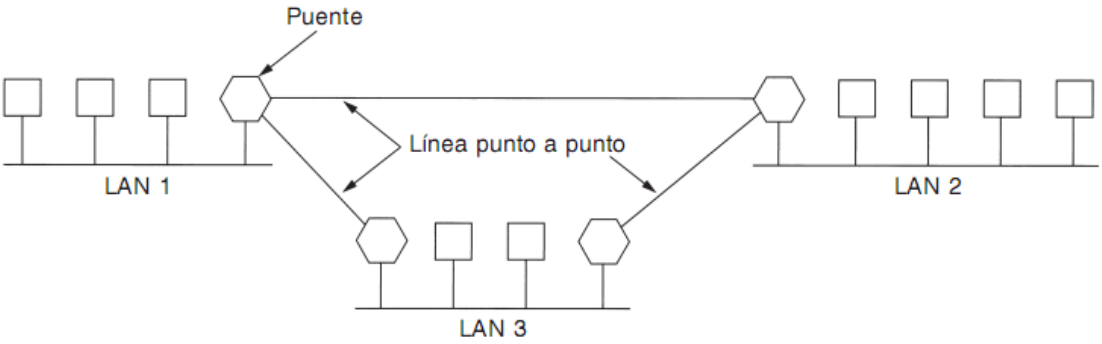


Figura 4-45. Los puentes remotos se pueden utilizar para interconectar LANs distantes.

En las líneas punto a punto se pueden utilizar diversos protocolos. Una opción es elegir algún protocolo de enlace de datos estándar de punto a punto como PPP y colocar tramas MAC completas en el campo de carga útil. Esta estrategia funciona mejor si todas las LANs son idénticas, y el único problema es conseguir que las tramas lleguen a la LAN correcta. Otra opción es eliminar tanto el encabezado como el terminador MAC en el puente de origen y agregar lo que queda en el campo de carga útil del protocolo de punto a punto. A continuación, en el puente de destino se pueden generar un nuevo encabezado y un nuevo terminador MAC. Una desventaja de este método consiste en que la suma de verificación que llega al *host* de destino no es la que se calculó en el *host* de origen, debido a lo cual tal vez no se detecten los errores ocasionados por bits defectuosos en la memoria de un puente.

4.7.5 Repetidores, concentradores, puentes, conmutadores, enrutadores y puertas de enlace

Hasta este punto hemos visto una gran variedad de formas para desplazar tramas y paquetes de un segmento de cable a otro. Hemos mencionado repetidores, puentes, conmutadores, concentradores, enrutadores y puertas de enlace. Todos estos dispositivos son de uso común, aunque difieren en formas sutiles y no tan sutiles. Puesto que son tantos, tal vez valga la pena analizarlos en conjunto para conocer sus similitudes y diferencias.
Para empezar, estos dispositivos operan en diferentes capas, como se muestra en la figura 4-46(a). La capa es importante porque los distintos dispositivos utilizan diferentes partes de información para decidir su modo de operación. En un escenario común, el usuario genera algunos datos que se enviarán a una máquina remota. Estos datos se pasan a la capa de transporte, que le agrega un encabezado, por ejemplo, un encabezado TCP, y pasa la unidad que resulta a la capa de red. Ésta incorpora su propio encabezado para obtener un paquete de capa de red, por ejemplo, un paquete IP. En la figura 4-46(b) podemos ver el paquete IP con un sombreado gris. A continuación, el paquete pasa a la capa de enlace de datos, que incorpora su propio encabezado y suma de verificación (CRC) y envía la trama resultante a la capa física para que desde ahí sea transmitida, por ejemplo, sobre una LAN.

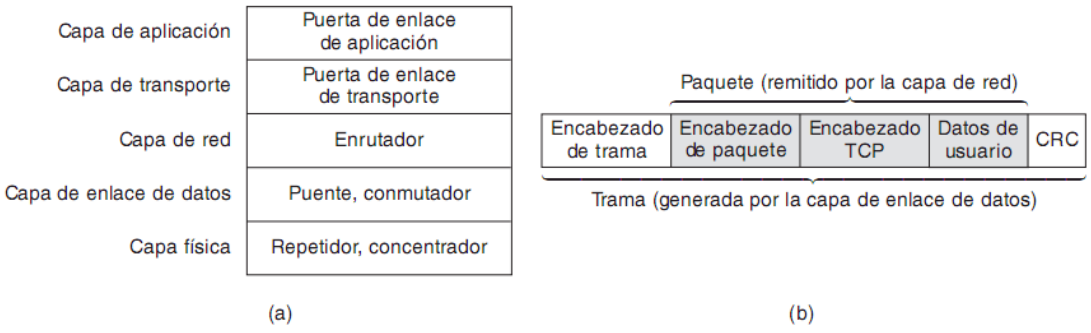


Figura 4-46. (a) Los dispositivos y sus capas correspondientes. (b) Tramas, paquetes y encabezados.

Ahora demos un vistazo a los dispositivos de conmutación y veamos cómo se relacionan con los paquetes y las tramas. Al fondo, en la capa física, se encuentran los repetidores. Éstos son dispositivos análogos conectados a dos segmentos de cable. Una señal que aparece en uno de ellos es amplificada y enviada al otro. Los repetidores no distinguen entre tramas, paquetes o

encabezados. Manejan voltios. Por ejemplo, la Ethernet tradicional admite cuatro repetidores, con el propósito de extender la longitud máxima de cable de 500 a 2500 metros.
Pasemos ahora a los concentradores. Un concentrador tiene numerosos puertos de entrada que une de manera eléctrica. Las tramas que llegan a cualquiera de las líneas se envían a todas las demás. Si dos tramas llegan al mismo tiempo, chocarán, al igual que en un cable coaxial. En otras palabras, el concentrador constituye un solo dominio de colisión. Todas las líneas que convergen en un concentrador deben operar a la misma velocidad. A diferencia de los repetidores, los concentradores (por lo general) no amplifican las señales entrantes y su diseño les permite contener varias tarjetas de línea con múltiples entradas, aunque las diferencias son ligeras. Al igual que los repetidores, los concentradores no examinan las direcciones 802 ni las utilizan de ninguna manera. En la figura 4-47(a) se muestra un concentrador.

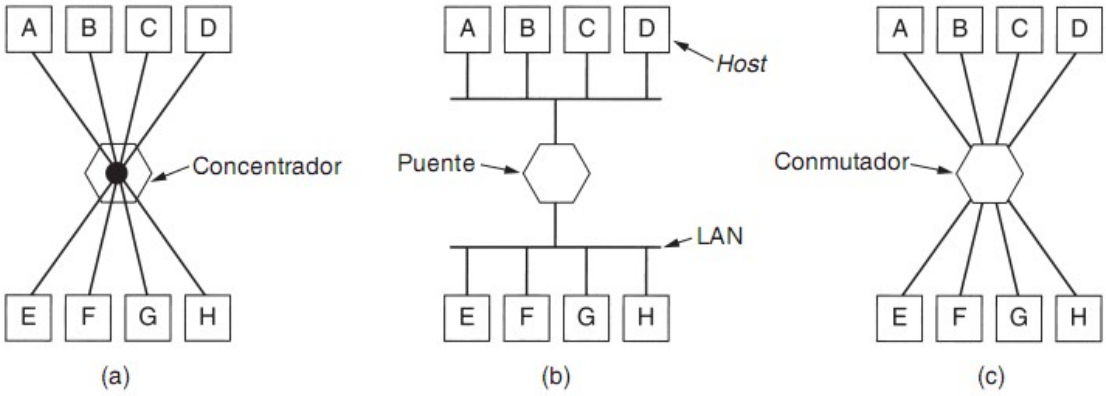


Figura 4-47. (a) Concentrador. (b) Puente. (c) Conmutador.

Veamos a continuación la capa de enlace de datos donde operan los puentes y los conmutadores. Ya hemos visto algo de los puentes. Un puente conecta dos o más LANs, como se puede ver en la figura 4-47(b). Cuando llega una trama, el software del puente extrae la dirección de destino del encabezado y la busca en una tabla para averiguar a dónde debe enviar la trama. En Ethernet, esta dirección es la dirección de destino de 48 bits que se muestra en la figura 4-17. De la misma manera que un concentrador, un puente moderno tiene tarjetas de línea, por lo general para cuatro u ocho puertos de entrada de un tipo determinado. Una tarjeta de línea para Ethernet no puede manejar tramas token ring debido a que no sabe dónde buscar la dirección de destino que viene en el encabezado de la trama. Sin embargo, un puente podría tener tarjetas de línea para diferentes tipos de red y diferentes velocidades. En contraste con un concentrador, en un puente cada puerto constituye su propio dominio de colisión.
Los conmutadores son similares a los puentes en el aspecto de que ambos enrutan tomando como base las direcciones de las tramas. De hecho, mucha gente se refiere a ellos de manera indistinta. La principal diferencia consiste en que un conmutador se utiliza con mayor frecuencia para conectar computadoras individuales, como se puede ver en la figura 4-47(c). En consecuencia, cuando el host A de la figura 4-47(b) desea enviar una trama al host B, el puente toma la trama pero la descarta. Por el contrario, en la figura 4-47(c), el conmutador debe reenviar activamente la trama de A a B porque no existe otra forma para que ésta llegue ahí. Puesto que por lo general cada puerto del conmutador va hacia una sola computadora, éstos deben contar con espacio para muchas más tarjetas de línea que los puentes, cuyo propósito es conectar solamente LANs. Cada tarjeta de línea proporciona espacio de búfer para las tramas que llegan a sus puertos. Como cada puerto constituye su propio dominio de colisión, los conmutadores nunca pierden tramas por colisiones. Sin embargo, si las tramas llegan con mayor rapidez de la que pueden retransmitirse, el conmutador podría quedarse sin espacio de búfer y proceder a descartar tramas.
Para aliviar en parte este problema, los conmutadores modernos empiezan el reenvío de tramas tan pronto como llega el campo de encabezado del destino, antes de que el resto de la trama haya llegado (siempre y cuando el puerto de salida esté disponible, por supuesto). Estos conmutadores no utilizan la técnica de conmutación de almacenamiento y reenvío. En ocasiones se les menciona como conmutadores cut-through. Por lo general, este tipo de manejo se realiza por completo en hardware, en tanto que los puentes contienen tradicionalmente una CPU que realiza la conmutación de almacenamiento y reenvío en software. No obstante, debido a que todos los puentes y conmutadores modernos contienen circuitos integrados especiales para conmutación, la diferencia entre un conmutador y un puente es más un asunto de mercadotecnia que técnico.
Hasta aquí hemos visto repetidores y concentradores, que son bastante similares, así como puentes y conmutadores, que también son muy semejantes. Ahora pasaremos a los enrutadores, que son

diferentes de todos los anteriores. Cuando un paquete llega a un enrutador, el encabezado y el terminador de la trama se eliminan y el paquete contenido en el campo de carga útil de la trama (sombreado en la figura 4-46) se pasa al software de enrutamiento. Este software se vale del encabezado del paquete para elegir un puerto de salida. En un paquete IP, el encabezado contendrá una dirección de 32 bits (IPv4) o 128 bits (IPv6), no una dirección 802 de 48 bits. El software de enrutamiento no analiza las direcciones de las tramas e incluso no sabe si el paquete proviene de una LAN o una línea punto a punto. En el capítulo 5 estudiaremos los enrutadores y el enrutamiento.
Una capa más arriba encontramos puertas de enlace de transporte. Estos dispositivos conectan dos computadoras que utilizan diferentes protocolos de transporte orientados a la conexión. Por ejemplo, imagine que una computadora que utiliza el protocolo TCP/IP orientado a la conexión necesita comunicarse con una computadora que emplea el protocolo de transporte ATM, también orientado a la conexión. La puerta de enlace de transporte puede copiar los paquetes de una conexión a la otra y darles el formato que necesiten.
Por último, las puertas de enlace de aplicación comprenden el formato y contenido de los datos y traducen los mensajes de un formato a otro. Por ejemplo, una puerta de enlace de correo electrónico puede traducir mensajes Internet en mensajes SMS para teléfonos móviles.

4.7.6 LANs virtuales

En los primeros días de las redes de área local, cables amarillos gruesos serpenteaban por los ductos de muchos edificios de oficinas. Conectaban a todas las computadoras por las que pasaban. Con frecuencia había muchos cables, los cuales se conectaban a una red vertebral central (como en la figura 4-39) o a un concentrador central. No importaba cuál computadora pertenecía a cuál LAN. Todos los usuarios de oficinas cercanas se conectaban a la misma LAN aunque no estuvieran relacionados con ella. El aspecto geográfico se imponía al lógico.
Todo cambió con el surgimiento de 10Base-T y los concentradores en la década de 1990. El cableado de los edificios se renovó (a un costo considerable) para desechar todas las mangueras amarillas de jardín e instalar cables de par trenzado desde cada oficina hasta gabinetes centrales al final de cada pasillo o hasta salas centrales de máquinas, como se observa en la figura 4-48. Si el encargado del reemplazo del cableado era un visionario, se instalaba cable de par trenzado categoría 5; si era un simple administrador, se instalaba el cable telefónico (categoría 3) existente (que tenía que reemplazarse algunos años más tarde con la aparición de Fast Ethernet).

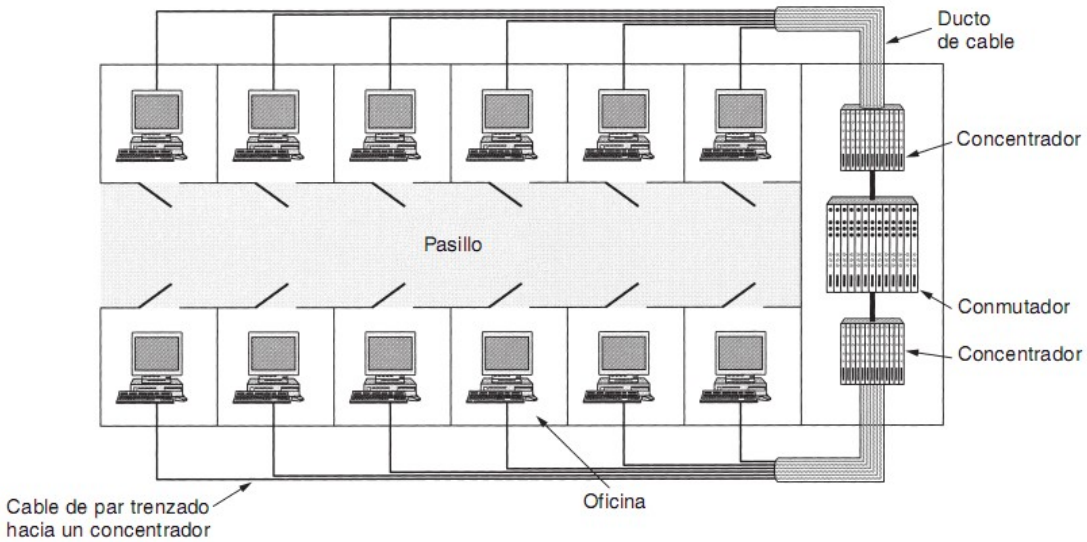


Figura 4-48. Edificio con cableado centralizado que utiliza concentradores y un conmutador.

El uso de concentradores (y de conmutadores posteriormente) con Ethernet hizo posible configurar las LANs con base en el aspecto lógico más que en el físico. Si una empresa necesita k LANs, compra k concentradores. Al elegir con cuidado qué conectores incorporar en qué concentradores, los usuarios de una LAN se pueden seleccionar de tal manera que tenga sentido para la organización, sin tomar mucho en cuenta el aspecto geográfico. Por supuesto, si dos personas del mismo departamento trabajan en diferentes edificios, es muy probable que estarán en diferentes concentradores y, en consecuencia, en diferentes LANs. No obstante, esto es mucho mejor que tener usuarios de una LAN con base totalmente en el aspecto geográfico.
¿Es importante quién está en qué LAN? Después de todo, en casi todas las organizaciones las LANs están interconectadas. Como veremos en breve, sí es importante. Por diversas razones, a los

administradores de red les gusta agrupar a los usuarios en LANs para reflejar la estructura de la organización más que el diseño físico del edificio. Un aspecto es la seguridad. Cualquier interfaz de red se puede operar en modo promiscuo para que copie todo el tráfico que llegue. Muchos departamentos, como los de investigación, patentes y contabilidad, manejan información que no debe salir de los límites de sus respectivas áreas. En casos como éste se justifica que todos los usuarios de un departamento sean asignados a una sola LAN y que no se permita que el tráfico salga de ésta. A los directivos no les agrada escuchar que un arreglo de este tipo sólo es posible si todos los usuarios de un departamento están en oficinas adyacentes, sin más gente entre ellos.

Un segundo aspecto es la carga. Algunas LANs se utilizan mucho más que otras, y en ocasiones podría ser necesario separarlas. Por ejemplo, si los usuarios de investigaciones realizan toda clase de experimentos que en ocasiones se les van de las manos y saturan su LAN, tal vez a los usuarios de contabilidad no les agrade tener que ceder parte de su capacidad para ayudarles.

Un tercer aspecto es la difusión. La mayoría de las LANs soporta la difusión, y muchos protocolos de la capa superior utilizan ampliamente esta característica. Por ejemplo, cuando un usuario desea enviar un paquete a una dirección IP x, ¿cómo sabe a cuál dirección MAC enviar la trama? En el capítulo 5 estudiaremos este asunto, pero en pocas palabras, la respuesta es que debe difundir una trama con la pregunta: ¿Quién posee la dirección IP x?, y esperar la respuesta. Existen muchos más ejemplos del uso de la difusión. Conforme se interconectan más y más LANs, la cantidad de difusiones *(broadcasts)* que pasan por cada máquina se incrementa de manera lineal con el número de máquinas.

Las difusiones tienen el problema asociado de que de vez en cuando las interfaces de red se averían y empiezan a generar flujos interminables de tramas de difusión. El resultado de una **tormenta de difusión** es que 1) las tramas ocupan toda la capacidad de la LAN, y 2) las máquinas de todas las LANs interconectadas se atascan procesando y descartando las tramas difundidas.

A primera vista parecería que la magnitud de las tormentas de difusión podría limitarse separando las LANs con puentes o conmutadores, pero si el objetivo es conseguir transparencia (es decir, que una máquina pueda cambiarse a una LAN distinta al otro lado del puente sin que nadie lo note), entonces los puentes tienen que reenviar las tramas difundidas.

Después de analizar por qué las empresas podrían requerir varias LANs con un alcance limitado, regresemos al problema de desacoplar la topología lógica de la física. Supongamos que un usuario es transferido de un departamento a otro de la misma empresa sin que se le cambie de oficina o que se le cambia de oficina pero no de departamento. En un entorno de concentradores con cables, cambiar al usuario a la LAN correcta implica que el administrador de la red debe desplazarse hasta el gabinete de cableado, quitar de un concentrador el conector de la máquina del usuario e insertar el mismo conector en otro concentrador.

En muchas empresas, los cambios organizacionales ocurren todo el tiempo, lo cual quiere decir que los administradores de sistemas desperdician mucho tiempo quitando y metiendo conectores de un lado a otro. Asimismo, en algunos casos el cambio no se puede realizar de ninguna manera porque el cable de par trenzado de la máquina del usuario está demasiado lejos del concentrador correcto (por ejemplo, en otro edificio).

En respuesta a la demanda de mayor flexibilidad por parte de los usuarios, los fabricantes de redes empezaron a trabajar en una forma de volver a cablear edificios completos mediante software.

El concepto que surgió se denomina **VLAN (LAN Virtual)** e incluso fue estandarizado por el comité 802. Ahora se encuentra funcionando en muchas organizaciones. Analicémoslo brevemente.

Si desea información adicional, vea (Breyer y Riley, 1999, y Seifert, 2000).

Las VLANs se fundamentan en conmutadores especialmente diseñados para este propósito, aunque también podrían contar con algunos concentradores, como se muestra en la figura 4-48.

Para configurar una red VLAN, el administrador de la red decide cuántas VLANs habrá, qué computadoras habrá en cuál VLAN y cómo se llamarán las VLANs. Es común nombrar mediante colores a las VLANs (de manera informal), ya que de esta manera es posible imprimir diagramas en color que muestren la disposición física de las máquinas, con los miembros de la LAN roja en rojo, los de la LAN verde en verde, etc. De esta forma, tanto el diseño físico como el lógico se pueden reflejar en un solo esquema.

Por ejemplo, considere las cuatro LANs de la figura 4-49(a), en la cual ocho de las máquinas pertenecen a la VLAN G (gris) y siete forman parte de la VLAN W (blanca). Dos puentes, *B1* y *B2*, conectan las cuatro LANs físicas. Si se utiliza cableado de par trenzado centralizado, también podría haber cuatro concentradores (que no se muestran), pero desde el punto de vista lógico un cable con múltiples derivaciones y un concentrador representan lo mismo. Al esquematizar la figura de esta forma se aprecia un poco menos amontonada. Asimismo, el término “puente” se emplea actualmente cuando hay varias máquinas en cada puerto, como es el caso de esta figura, pero de otra manera, “puente” y “conmutador” en esencia son indistintos. En la figura 4-49(b) se muestran las mismas máquinas y las mismas VLANs, aunque en esta ocasión con conmutadores y una sola máquina en cada puerto.

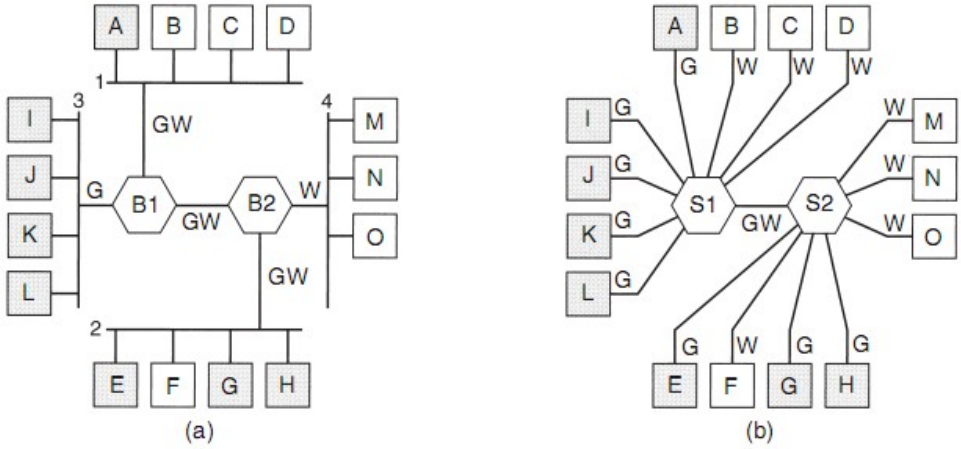


Figura 4-49. (a) Cuatro LANs físicas organizadas en dos VLANs, en gris y blanco, mediante dos puentes. (b) Las mismas 15 máquinas organizadas en dos VLANs mediante conmutadores.

Para que las VLANs funcionen correctamente, las tablas de configuración se deben establecer en los puentes o en los conmutadores. Estas tablas indican cuáles VLANs se pueden acceder a través de qué puertos (líneas). Cuando una trama llega procedente de, digamos, la VLAN gris, debe reenviarse a todos los puertos G. De este modo se puede enviar tráfico ordinario (es decir, de unidifusión), así como de difusión y multidifusión.
Observe que un puerto puede marcarse con varios colores de VLAN. Esto se aprecia con más claridad en la figura 4-49(a). Suponga que la máquina A difunde una trama. El puente *B1* la recibe y detecta que proviene de una máquina de la VLAN gris, por lo cual la reenvía a todos los puertos G (excepto al puerto del que procede). Puesto que *B1* tiene sólo otros dos puertos y ambos son G, la trama se envía a ambos.
En *B2* la situación es distinta. Aquí el puerto sabe que no hay máquinas grises en la LAN 4, por lo que no envía la trama ahí. Sólo la manda a la LAN 2. Si uno de los usuarios de la LAN 4 debe cambiar de departamento y trasladarse a la VLAN gris, entonces las tablas de *B2* deben actualizarse y renombrar el puerto como GW en lugar de W. Si la máquina F cambia a gris, entonces el puerto de la LAN 2 debe renombrarse como G en lugar de GW.
Imaginemos ahora que todas las máquinas de las LANs 2 y 4 cambian a gris. En ese caso, no sólo los puertos de *B2* para las LANs 2 y 4 se renombran como G, sino que también el puerto de *B1* que va a *B2* debe renombrarse como G en lugar de GW porque las tramas blancas que llegan a *B1* procedentes de las LANs 1 y 3 ya no tienen que reenviarse a *B2*. En la figura 4-49(b) permanece la misma situación, sólo que aquí todos los puertos que van hacia una sola máquina se marcan con un solo color porque sólo hay una VLAN.
Hasta aquí hemos dado por sentado que los puentes y los conmutadores saben de alguna forma qué color tienen las tramas que llegan. ¿Cómo lo saben? Por medio de los tres métodos siguientes:

1. A cada puerto se le asigna un color de VLAN.
2. A cada dirección MAC se le asigna un color de VLAN.
3. A cada protocolo de la capa 3 o a cada dirección IP se le asigna un color de VLAN.

En el primer método, cada puerto se marca con un color de VLAN. Sin embargo, este método sólo funciona si todas las máquinas de un puerto pertenecen a la misma VLAN. En la figura 4-49(a), esta propiedad se aplica a B1 para el puerto de la LAN 3 pero no al puerto de la LAN 1.
En el segundo método, el puente o el conmutador tienen una tabla con las direcciones MAC de 48 bits de cada máquina conectada a ellos, junto con la VLAN a la cual pertenece la máquina. Bajo estas condiciones, es factible mezclar VLANs en una LAN física, como en el caso de la LAN 1 de la figura 4-49(a). Cuando llega una trama, todo lo que tienen que hacer el puente o el conmutador es extraer la dirección MAC y buscarla en una tabla para averiguar de qué VLAN proviene.
En el tercer método el puente o el conmutador examinan el campo de carga útil de la trama, por ejemplo, para clasificar todas las máquinas IP en una VLAN y todas las máquinas AppleTalk en otra. En el primer caso, la dirección IP se puede utilizar también para identificar a la máquina.
Esta estrategia es más útil cuando varias máquinas son computadoras portátiles que se pueden acoplar en cualquiera de diversos lugares. Puesto que cada estación de acoplamiento tiene su propia dirección MAC, el solo hecho de saber cuál estación de acoplamiento se utilizó no indica en absoluto en cuál VLAN se encuentra la computadora portátil.
El único problema de este enfoque es que transgrede la regla más elemental de la conectividad: independencia de las capas. A la capa de enlace de datos no le incumbe lo que esté en el campo de

carga útil. No le corresponde analizar la carga útil ni tomar decisiones con base en el contenido. Una consecuencia del uso de este enfoque es que un cambio en el protocolo de la capa 3 (por ejemplo, una actualización de IPv4 a IPv6) ocasiona que los conmutadores fallen repentinamente. Por desgracia, en el mercado hay conmutadores que funcionan de esta manera.
Por supuesto, no hay nada de malo en enrutar con base en las direcciones IP —casi todo el capítulo 5 está dedicado al enrutamiento IP— pero al mezclar las capas se pueden propiciar problemas. Un fabricante de conmutadores podría minimizar esta situación argumentando que sus conmutadores comprenden tanto IPv4 como IPv6, así que no hay problema. ¿Pero qué pasará cuando surja IPv7? En tal caso, el fabricante tal vez dirá: Compre nuevos conmutadores, ¿cuál es el problema?

El estándar IEEE 802.1Q

Al ahondar un poco más en este asunto salta a la vista que lo importante es la VLAN de la trama, no la VLAN de la máquina emisora. Si hubiera alguna forma de identificar la VLAN en el encabezado de la trama, se desvanecería la necesidad de examinar la carga útil. Para una LAN nueva como 802.11 u 802.16 habría sido bastante fácil tan sólo agregar un campo de VLAN en el encabezado. De hecho, el campo *Identificador de conexión* del estándar 802.16 es muy parecido a un identificador VLAN. ¿Pero qué se puede hacer con Ethernet, que es la LAN dominante y no tiene campos disponibles para el identificador VLAN?
El comité IEEE 802 se enfrentó a este problema en 1995. Después de muchas discusiones, hizo lo impensable y cambió el encabezado de Ethernet. El nuevo formato se publicó en el estándar **802.1Q** del IEEE, emitido en 1998. El nuevo formato contiene una etiqueta VLAN; en breve la examinaremos. No es de sorprender que el cambio de algo ya bien establecido como el encabezado de Ethernet no sea nada sencillo. Algunas de las preguntas que surgen son:

1. ¿Tenemos que tirar a la basura cientos de millones de tarjetas Ethernet existentes?
2. Si no es así, ¿quién generará los nuevos campos?
3. ¿Qué sucederá con las tramas que ya tienen el tamaño máximo?

Por supuesto, el comité 802 estaba consciente de estos problemas y tenía que encontrar soluciones, lo cual hizo.
La clave para la solución consiste en comprender que los campos VLAN sólo son utilizados por los puentes y los conmutadores, no por las máquinas de los usuarios. De ahí que en la figura 4-49 no sea realmente necesario que estén presentes en las líneas que van hacia las estaciones finales siempre y cuando se encuentren en la línea entre los puentes o los conmutadores. Así, para utilizar VLANs, los puentes o los conmutadores deben tener soporte para VLAN, pero ese ya era un requisito. Ahora sólo estamos agregando el requisito adicional de que tengan soporte para 802.1Q, requisito que los nuevos ya cubren.
Respecto a la cuestión de si es necesario desechar todas las tarjetas Ethernet existentes, la respuesta es no. Recuerde que el comité 802.3 no pudo conseguir que la gente cambiara el campo *Tipo* por un campo *Longitud*. Ya podrá imaginar la reacción ante el anuncio de que todas las tarjetas Ethernet existentes tuvieran que desecharse. Sin embargo, se espera que las nuevas tarjetas Ethernet que salgan al mercado tendrán compatibilidad con el 802.1Q y llenarán correctamente el campo VLAN.
Por lo tanto, si el emisor no generará los campos VLAN, ¿quién lo hará? La respuesta es que el primer puente o conmutador con soporte de VLAN en recibir una trama los agregará y el último que los reciba los eliminará. ¿Pero cómo sabrán cuál trama corresponde a cuál VLAN? Bueno, el primer puente o conmutador podría asignar un número de VLAN a un puerto, analizar la dirección MAC o (`Dios no lo quiera!) examinar la carga útil. Mientras todas las tarjetas Ethernet no se apeguen al estándar 802.1Q, estaremos en donde empezamos. La esperanza real es que todas las tarjetas Gigabit Ethernet se apegarán a 802.1Q desde el principio y que en tanto la gente se actualiza a Gigabit Ethernet, el 802.1Q se introducirá automáticamente. En cuanto al problema de las tramas mayores a 1518 bytes, el 802.1Q tan sólo incrementó el límite a 1522 bytes.
Durante el proceso de transición, muchas instalaciones tendrán algunas máquinas heredadas (en su mayoría, clásicas o Fast Ethernet) que no soportarán VLAN y otras (por lo general, Gigabit Ethernet) que sí lo harán. Esta situación se ilustra en la figura 4-50, en donde los símbolos sombreados representan máquinas que soportan VLAN y los vacíos no las soportan. Por simplicidad, damos por sentado que todos los conmutadores soportan VLAN. Si no es así, el primer conmutador que soporte VLAN puede incorporar las etiquetas con base en las direcciones MAC o IP.

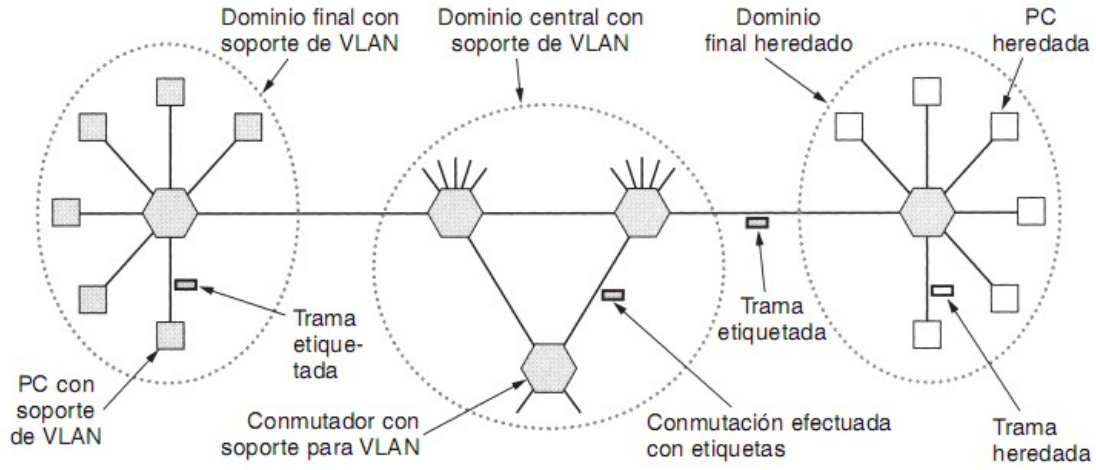


Figura 4-50. Transición de Ethernet heredada a Ethernet con soporte para VLAN. Los símbolos sombreados representan soporte para VLAN, a diferencia de los vacíos.

En esta figura, las tarjetas Ethernet con soporte para VLAN generan directamente tramas etiquetadas (es decir, 802.1Q) y la conmutación posterior se vale de estas etiquetas. Para realizar esta conmutación, los conmutadores tienen que saber cuáles VLANs están al alcance en cada puerto, lo mismo que antes. El hecho de saber que una trama pertenece a la VLAN gris no es de mucha ayuda sino hasta que el conmutador sabe cuáles puertos tienen conexión con las máquinas de la
VLAN gris. De esta forma, el conmutador necesita una tabla indexada por VLAN que le indique cuáles puertos puede utilizar y si éstos tienen soporte para VLAN o son heredados.
Cuando una PC heredada envía una trama a un conmutador con soporte para VLAN, el conmutador genera una trama etiquetada apoyándose en el conocimiento que tiene de la VLAN del emisor (utilizando el puerto, la dirección MAC o la dirección IP). De ahí en adelante, no importa que el emisor sea una máquina heredada. Asimismo, un conmutador que necesita entregar una trama etiquetada a una máquina heredada tiene que darle a la trama el formato heredado antes de entregarla.
Demos ahora un vistazo al formato de la trama 802.1Q, que se muestra en la figura 4-51. El único cambio es la adición de un par de campos de dos bytes. El primero es la *ID del protocolo de VLAN*. Siempre tiene el valor 0x8100. Como esta cifra es mayor que 1500, todas las tarjetas Ethernet lo interpretan como un tipo más que como una longitud. Lo que una tarjeta heredada hace con una trama como ésta es discutible porque dichas tramas no deberían enviarse a tarjetas heredadas.

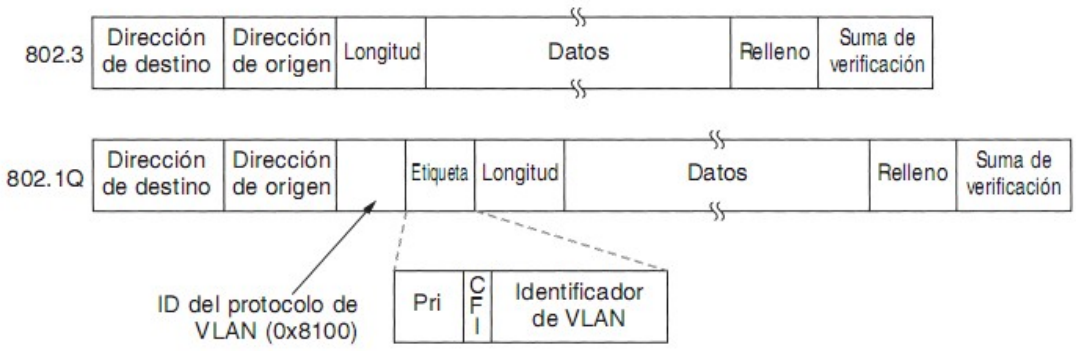


Figura 4-51. Formatos de trama Ethernet 802.3 (heredada) y 802.1Q.

El segundo campo de dos bytes contiene tres subcampos. El principal es el *Identificador de VLAN*, que ocupa los 12 bits de orden menor. Éste es el punto central de la cuestión: ¿a qué VLAN pertenece la trama? El campo *Prioridad* de 3 bits no tiene absolutamente nada que ver con las VLANs, pero como el cambio del encabezado Ethernet es un suceso poco frecuente que tarda tres años y ocupa a un ciento de personas, ¿por qué no incorporarle algunas otras cosas buenas en el proceso? Este campo permite distinguir el tráfico en tiempo real estricto del tráfico en tiempo real flexible y del tráfico no sensible al retardo, con el propósito de ofrecer una mejor calidad de servicio sobre Ethernet. Esto es necesario para el transporte de voz sobre Ethernet (aunque, para ser justos, IP tiene un campo similar desde hace un cuarto de siglo y nadie lo utiliza).
El último bit, *CFI (Indicador del Formato Canónico)*, debió haberse llamado *CEI (Indicador del Ego Corporativo)*. Su propósito original era indicar las direcciones MAC *little endian* en comparación con

las *big endian*, pero esto ha cambiado con el tiempo. Actualmente indica que la carga útil contiene una trama 802.5 congelada-seca que se espera encuentre otra LAN 802.5 en el destino cuando se transmita a través de Ethernet. Por supuesto, este arreglo no tiene absolutamente nada que ver con las VLANs. Pero la política de los comités de estándares no difiere mucho de la política común: si votas por mi bit, votaré por el tuyo.

Como ya mencionamos, cuando una trama etiquetada llega a un conmutador con soporte para VLAN, éste utiliza el ID de la VLAN como índice de tabla para averiguar a cuáles puertos enviar la trama. ¿Pero de dónde proviene la tabla? Si se elabora en forma manual, tenemos que empezar desde cero: la configuración manual de los puentes. La ventaja de los puentes transparentes es que son *plug and play* y no requieren configuración manual. Sería un terrible retroceso perder esa propiedad. Por fortuna, los puentes con soporte para VLAN se pueden autoconfigurar al observar las etiquetas que arriben a ellos. Si una trama etiquetada como VLAN 4 llega al puerto 3, entonces aparentemente una máquina en el puerto 3 se encuentra en la VLAN 4. El estándar 802.1Q explica cómo construir las tablas de manera dinámica, en su mayor parte referenciando porciones apropiadas del algoritmo de Perlman estandarizado en el 802.1D.

Antes de abandonar el tema del enrutamiento para VLAN, vale la pena hacer una última observación. Mucha gente de Internet y Ethernet es fanática de las redes no orientadas a la conexión y se oponen terminantemente a todo lo que huela a conexiones en las capas de enlace de datos y de red. No obstante, las VLANs incluyen un aspecto que es sorprendentemente similar a una conexión. Para utilizar las VLANs de manera apropiada, cada trama lleva un identificador especial nuevo que se utiliza como índice en una tabla dentro del conmutador para averiguar el destino al que se debe enviar la trama. Esto es precisamente lo que se hace en las redes orientadas a la conexión. En las redes no orientadas a la conexión, la dirección de destino es la que se utiliza para el enrutamiento, no un tipo de identificador de conexión. En el capítulo 5 abundaremos en este conexionismo gradual.

4.8 RESUMEN

Algunas redes tienen un solo canal que se usa para todas las comunicaciones. En estas redes, el aspecto clave del diseño es la asignación del canal entre las estaciones competidoras que desean usarlo. Se han desarrollado muchos algoritmos de asignación de canal. En la figura 4-52 se presenta un resumen de algunos de los métodos de asignación de canal más importantes.

Los métodos de asignación más sencillos son la FDM y la TDM; son eficientes con un número de estaciones pequeño y fijo y tráfico continuo. Ambos esquemas se usan ampliamente en estas circunstancias; por ejemplo, para dividir el ancho de banda de las troncales telefónicas.

Con un número grande y variable de estaciones, o con un tráfico en ráfagas, la FDM y la TDM son soluciones pobres. Se ha propuesto como alternativa el protocolo ALOHA, con y sin ranuras y control. El ALOHA y sus muchas variantes y derivaciones han sido ampliamente estudiados, analizados y usados en sistemas reales.

Cuando puede detectarse el estado del canal, las estaciones pueden evitar el comienzo de una transmisión mientras otra estación está transmitiendo. Esta técnica, la detección de portadora, ha producido varios protocolos que pueden usarse en LANs y MANs.

Método	Descripción
FDM	Dedica una banda de frecuencia a cada estación
WDM	Esquema FDM dinámico para fibra
TDM	Dedica una ranura de tiempo a cada estación
ALOHA puro	Transmisión asíncrona en cualquier momento
ALOHA ranurado	Transmisión aleatoria en ranuras de tiempo bien definidas
CSMA persistente-1	Acceso múltiple con detección de portadora estándar
CSMA no persistente	Retardo aleatorio cuando se detecta que el canal está ocupado
CSMA persistente-p	CSMA, pero con una probabilidad de persistencia p
CSMA/CD	CSMA, pero aborta al detectar una colisión
Mapa de bits	Calendarización *round robin* mediante mapa de bits
Conteo descendente binario	La estación disponible con el número más alto toma el turno
Recorrido de árbol	Contención reducida mediante habilitación selectiva
MACA, MACAW	Protocolos de LAN inalámbrica
Ethernet	CSMA/CD con retraso exponencial binario
FHSS	Espectro disperso con salto de frecuencia
DSSS	Espectro disperso de secuencia directa
CSMA/CA	Acceso múltiple con detección de portadora y evitación de colisiones

Figura 4-52. Métodos de asignación de canal y sistemas para canal común.

Se conoce una clase de protocolos que eliminan por completo la contención, o cuando menos la reducen considerablemente. El conteo binario descendente elimina por completo la contención.
El protocolo de recorrido de árbol la reduce dividiendo dinámicamente las estaciones en dos grupos separados, uno que puede transmitir y otro que no. Se intenta hacer la división de tal manera que sólo una estación lista para transmitir pueda hacerlo.
Las LANs inalámbricas tienen sus propios problemas y soluciones. El problema principal lo causan las estaciones ocultas, por lo que el CSMA no funciona. Una clase de soluciones, tipifica das por MACA y MACAW, intenta estimular las transmisiones en las cercanías del destino, para hacer que el CSMA funcione mejor. También se usan el espectro disperso con salto de frecuencia y el espectro disperso de secuencia directa. El IEEE 802.11 combina CSMA y MACAW para producir CSMA/CA.
Ethernet predomina en el campo de las redes de área local. Utiliza CSMA/CD para la asignación de canal. Las primeras versiones empleaban un cable que serpenteaba entre las máquinas, pero en la actualidad son más comunes los cables de par trenzado hacia concentradores y conmutadores. Las velocidades se han incrementado de 10 Mbps a 1 Gbps y siguen en aumento.
Las LANs inalámbricas se están popularizando, y el 802.11 domina el campo. Su capa física permite cinco diferentes modos de transmisión, entre ellos el infrarrojo, diversos esquemas de espectro disperso y un sistema FDM multicanal con una estación base en cada celda, aunque también puede funcionar sin ninguna. El protocolo es una variante de MACAW, con detección de portadora virtual.
Las MANs inalámbricas están empezando a aparecer. Son sistemas de banda amplia que utilizan radio para reemplazar la última milla en conexiones telefónicas. También utilizan técnicas tradicionales de modulación de banda estrecha. La calidad de servicio es importante, y el estándar 802.16 define cuatro clases (tasa de bits constante, dos tasas variables de bits y una de mejor esfuerzo).
El sistema Bluetooth también es inalámbrico, aunque está más enfocado a los sistemas de escritorio, para conectar diademas telefónicas y otros periféricos a las computadoras sin necesidad de cables. También se utiliza para conectar periféricos, como máquinas de fax, a los teléfonos móviles. Al igual que el 801.11, utiliza espectro disperso con saltos de frecuencia en la banda ISM.
Debido al nivel de ruido esperado en muchos entornos y a la necesidad de interacción en tiempo real, sus diversos protocolos incorporan una sofisticada corrección de errores hacia delante.
Con tantas LANs diferentes, es necesaria una forma para interconectarlas. Los puentes y los conmutadores tienen este propósito. El algoritmo de árbol de expansión se utiliza para construir puentes *plug and play*. La VLAN es un nuevo desarrollo del mundo de la interconexión de LANs, que separa la topología lógica de la topología física de las LANs. Se ha introducido un nuevo formato para las tramas Ethernet (802.1Q), cuyo propósito es facilitar la utilización de las VLANs en las organizaciones.