

MEDIOS COMPARTIDOS Y CONTROL DE ACCESO

3.1. Introducción

Los conceptos estudiados en el capítulo anterior, correspondientes a la capa física del modelo OSI, posibilitan el intercambio de información, en forma de bits, entre equipos que puedan acceder (enviar o recibir) a señales sobre el mismo canal de información. En este sentido, podemos considerar el canal de comunicación como un recurso necesario para dar soporte a las comunicaciones, siendo sus dos propiedades más relevantes el tiempo durante el que está disponible para su uso y su ancho de banda, que limitará, como hemos visto en el capítulo anterior, la cantidad de información que es posible transmitir.

En este contexto aparecen dos problemas básicos relacionados con el uso del canal por parte de una pareja de equipos actuando como emisor y receptor. El primero de ellos está relacionado con el aprovechamiento adecuado del ancho de banda. Así, consideremos, a modo de ejemplo, una situación en la que se lleva a cabo la transmisión de una señal de voz, de ancho de banda aproximado de 4 KHz, sobre un canal de comunicación de, digamos, 1 MHz. Es claro que el aprovechamiento que del ancho de banda del canal se hace en este caso es solo del 0,4%. Aparte del hecho de que esta circunstancia es del todo indeseable, el resultado anterior sugiere que sobre un canal de comunicación dado se podrían realizar varias transmisiones simultáneas. Hasta 250 en el caso del ejemplo anterior si se dispusiera de una técnica que permitiera repartir el ancho de banda disponible.

El segundo problema está relacionado con el uso no exclusivo por parte de varios equipos del mismo canal, que hace necesario establecer mecanismos para compartir el canal entre ellos. Esta situación es evidente en las redes de computadores de medio compartido, donde todas las estaciones

transmiten sobre un único canal. Por otra parte, su uso también resulta importante en enlaces punto a punto. Pensemos que la no consideración de topologías completamente conectadas en las que existen tantos enlaces como parejas posibles emisor-receptor, por resultar inviables tanto económica como físicamente, hace preciso compartir las líneas de transmisión que constituyen la subred a fin de optimizar la capacidad de esta.

En consecuencia, el uso eficaz de un canal de comunicaciones para la transmisión conjunta de la información procedente de varias fuentes es un aspecto de importancia vital en cualquier sistema de comunicación.

Centrando nuestro interés, por tanto, en el estudio de técnicas que permitan compartir eficazmente el canal entre varias fuentes, diversos serán los esquemas introducidos a lo largo del presente capítulo. Como técnicas básicas mencionaremos las de multiplexación en el tiempo y en frecuencias en el Apartado 3.2. Estas, caracterizadas por la división, respectivamente, del tiempo y de las frecuencias en que transmite cada emisor que accede al canal, se implementan como funciones propias de la capa física; es decir, son aspectos relativos a la transmisión de datos. También dentro de este apartado se comentarán los esquemas de espectro expandido, en concreto, la técnica de multiplexación por división de código. Todas estas técnicas resultan eficaces cuando el tráfico es predecible y presenta pocas variaciones en el tiempo. Este es el caso, por ejemplo, de la radiodifusión comercial.

Frente a todas las anteriores, en entornos LAN se utilizan las técnicas de *control de acceso al medio* o MAC («Medium Access Control»), ya que permiten acomodar comunicaciones con grandes variaciones temporales en los recursos demandados y transmisiones a ráfagas, como es el caso típico de los computadores. A diferencia de las técnicas de multiplexación, los esquemas MAC, introducidos a lo largo de los Apartados 3.3 y 3.4, se definen como una subcapa dentro de la capa de enlace. Así, la capa de enlace en redes LAN se divide en dos subcapas (Figura 3.1): subcapa MAC, inferior y adyacente a la capa física, y subcapa de enlace, superior. Las funciones llevadas a cabo en la subcapa MAC, además de gestionar el acceso al medio, son dos: delimitación de tramas y detección de errores. Por su parte, la subcapa de enlace implementa las funciones de control de flujo y recuperación de errores emisor-receptor. Todas ellas se presentarán en profundidad en el capítulo próximo, centrándonos en este, como ya hemos mencionado, en el estudio del acceso al medio.

Finalmente, antes de abordar las técnicas mencionadas, hemos de considerar un factor adicional que puede condicionar su selección en un escenario concreto: el retardo en el acceso al canal. Todas las técnicas que se describirán introducen un retardo adicional en la comunicación, ya que es necesario repartir el uso del canal y procesar los datos para tal fin. En este sentido, será importante evaluar el retardo introducido por cada una de ellas y si este es determinista o simplemente un valor esperado. Así, por ejemplo, en el caso de una técnica de acceso basada en turnos fijos con llegadas deterministas, podremos evaluar de forma precisa el tiempo que tiene que esperar una fuente para realizar su

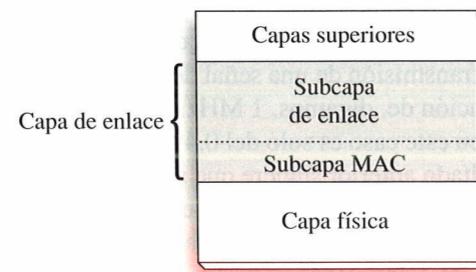


Figura 3.1. Capa de enlace en redes LAN.

transmisión sin más que tener en cuenta el número de turnos y su duración. Sin embargo, si el hecho de que una fuente no tuviese datos que enviar hiciera pasar el turno a la fuente siguiente, esta evaluación no sería tan simple. En este caso haría falta conocer el número de fuentes que tienen datos y cuáles son estas, lo que, evidentemente, variará en el tiempo. En este escenario no es posible conocer de forma exacta el retardo, sino sus valores promedio, y se hace necesario utilizar la teoría de colas para evaluar las prestaciones. Por este motivo, al final del capítulo se incorpora, en forma de apéndice, un resumen de teoría de colas y cómo esta se aplica en el caso de la multiplexación en el tiempo.

3.2. Multiplexación

Por *multiplexación* se entiende el proceso que permite la transmisión de la información procedente de varias fuentes sobre un mismo canal (Figura 3.2). Existen dos técnicas básicas de multiplexación (Figura 3.3), en función de si se reparte el uso temporal o el ancho de banda del mismo:

1. *Multiplexación por división en frecuencias*. En este caso todos los emisores transmiten simultáneamente en el tiempo sin más que utilizar para ello un rango de frecuencias distinto. Su aplicación típica se encuentra en la radiodifusión y, más recientemente, constituye la base de los sistemas ADSL.
2. *Multiplexación por división en el tiempo*. Esta técnica corresponde a la transmisión basada en turnos a lo largo del tiempo de los emisores que hacen uso del medio, utilizando cada uno de ellos el ancho de banda completo. Un ejemplo de aplicación donde se utiliza este método de multiplexación es la transmisión realizada en telefonía digital.

Dado que en ambos casos se reparte el uso del canal en múltiples canales, a las técnicas de multiplexación también se les denomina de *multicanalización*.

Tomando como base las definiciones anteriores, y relacionado con ellas, se define la transmisión en *banda ancha* como aquella en la que se posibilitan varias comunicaciones simultáneas sobre un mismo

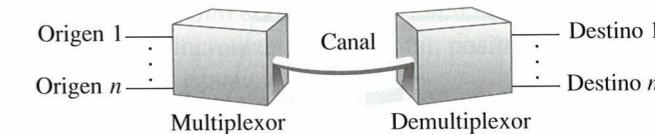


Figura 3.2. Concepto de multiplexación.

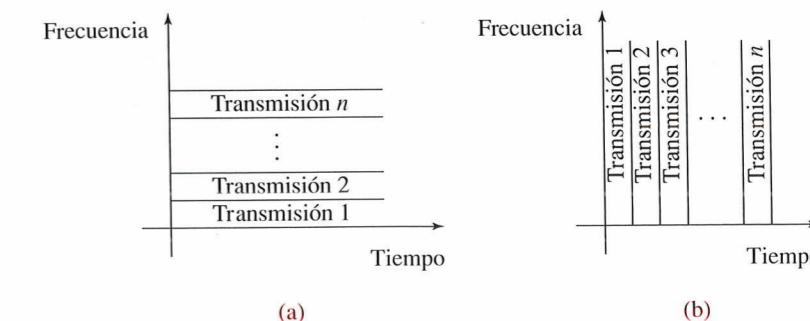


Figura 3.3. Técnicas de multiplexación (a) y en el tiempo (b).

medio a través de la asignación de rangos de frecuencias distintos. Frente a la anterior, se denomina en *banda base* a aquella transmisión en la que no se alteran las componentes en frecuencia originales de la señal. Dado el general solapamiento de las componentes en frecuencias de las señales manejadas, se suele generalizar la banda base como la transmisión de una única señal sobre el canal en un instante de tiempo dado. Un campo de aplicación típico de la transmisión en banda base es el de sistemas LAN tales como 100BASE-T, cuyo nombre se deriva precisamente de esta técnica de acceso.

3.2.1. Multiplexación por división en frecuencias

Del inglés «Frequency-Division Multiplexing» (FDM), esta técnica se caracteriza por el empleo de los esquemas de modulación estudiados en los Apartados 2.3.3 y 2.3.4, correspondientes a la utilización de una señal portadora de frecuencia dada, a partir de la cual se posibilita la transmisión analógica de una señal moduladora de datos analógica o digital.

De esta forma, como se muestra en la Figura 3.4, a cada emisor se le asigna una frecuencia portadora a la cual se traslada el espectro original de la señal emitida en base a uno de los procesos de

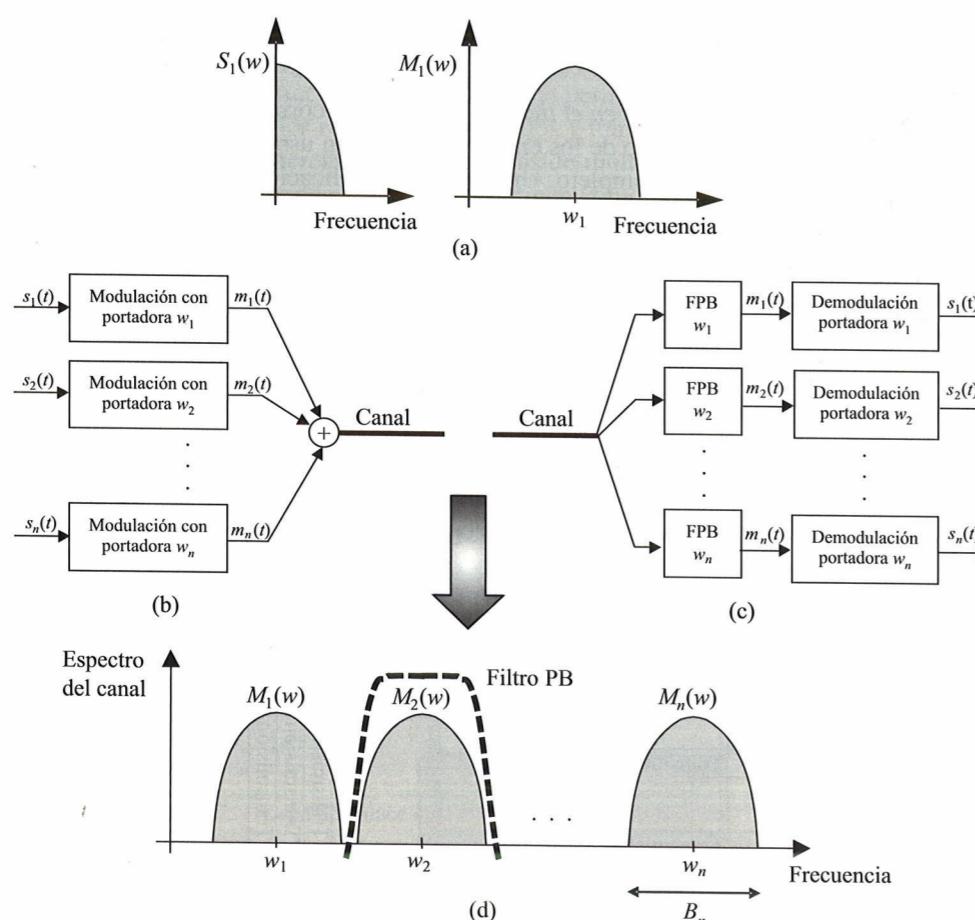


Figura 3.4. Multiplexación FDM: espectro de señal original (izda.) y modulada en AM (dcha.) (a), diagrama de bloques de emisión (b), diagrama de bloques de recepción (c) y espectro en el canal (d). En línea discontinua, filtro paso banda para seleccionar una de las emisiones.

modulación ya estudiados: AM, ASK, FM, PSK, PM, etc. El proceso de recepción (a veces referido como *sintonización*) se llevará a cabo en dos pasos:

1. Filtrado paso banda a fin de delimitar el rango de frecuencias de interés para cada una de las fuentes (Figura 3.4(d)).
2. Demodulación, con la que se consigue obtener la señal de datos original a partir de la señal modulada recibida (detección de envolvente o rectificado, por ejemplo, en el caso de AM-AP).

Según se deduce de la Figura 3.4(d), el ancho de banda utilizado en el canal debe ser tal que

$$B > \sum_{i=1}^n B_i \quad (3.1)$$

es decir, el ancho de banda total necesario para la transmisión, B , debe ser superior a la suma de los anchos de banda de las señales moduladas multiplexadas, B_i . Esto es debido a la necesidad de introducir unas bandas de separación mínima entre los espectros de cada emisión, denominadas *bandas de guarda* o de seguridad, a fin de que no solo no se solapen los espectros, sino que además se proporcione un margen de tolerancia adecuado para que los filtros paso banda puedan realizar la separación. Evidentemente, estas bandas no serían necesarias en caso de que los filtros fuesen ideales.

Esta técnica es también denominada acceso múltiple por división de frecuencia, FDMA («Frequency-Division Multiple Access»).

Una variante (óptica) del esquema FDM (de naturaleza eléctrica) es la técnica de multiplexación por división en la longitud de onda (WDMA, «Wavelength-Division Multiple Access»), utilizada en transmisiones sobre fibra óptica. En este caso, como es fácil deducir, distintas fuentes acceden a la misma fibra utilizando para ello longitudes de onda diferentes.

3.2.2. Multiplexación por división en el tiempo

La técnica de *multiplexación por división en el tiempo* (TDM, «Time-Division Multiplexing») consiste en la transmisión de datos procedentes de fuentes, normalmente digitales, en base a turnos (Figura 3.5(a)). De esta forma, tanto el multiplexor como el demultiplexor son ahora meros comutadores que, con una adecuada sincronización temporal, posibilitan la transmisión entre varias parejas emisor-receptor sobre un único canal.

La transmisión en TDM es tal que el comutador toma un bit o grupo de bits de tamaño l (típicamente un carácter) de la primera fuente, después uno de la segunda y así sucesivamente hasta

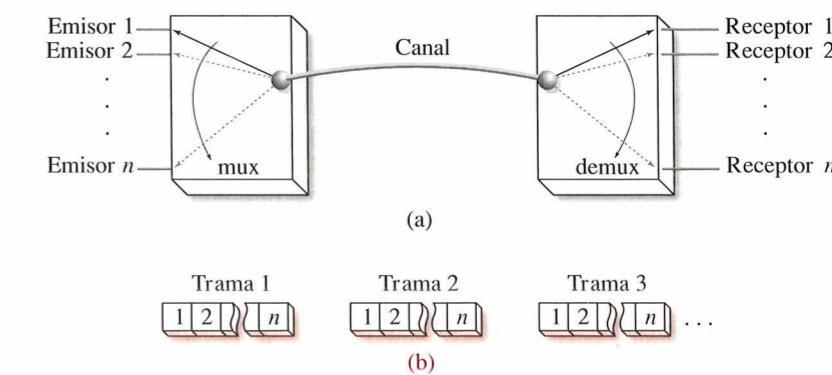


Figura 3.5. Multiplexación TDM: Esquema (a) y transmisión (b).

alcanzar la fuente n , formando una *trama* de bits a transmitir. Cada uno de los intervalos asignados a una fuente en la trama se denomina *ranura* («slot»), existiendo, por tanto, una ranura por fuente en cada trama. Tras finalizar una ronda o ciclo, el conmutador vuelve a la primera fuente (Figura 3.5(b)), insertando un delimitador entre cada dos tramas para permitir la detección de una potencial pérdida de sincronización entre emisor y receptor. De esta forma, cada fuente queda asociada a una posición dentro de la trama, constituyendo la secuencia de ranuras de cada fuente en las tramas sucesivas un canal.

En el caso de que las fuentes transmitan a diferentes velocidades, pero estas estén relacionadas según números enteros, es posible adaptar fácilmente el sistema TDM descrito sin más que considerar tamaños de ranura diferentes para cada una de las fuentes, siguiendo la misma proporción de sus respectivas velocidades.

Como consecuencia del uso de delimitadores, y de forma similar a lo especificado en (3.1) para FDM, se cumple que:

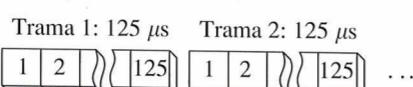
$$V > \sum_{i=1}^n v_i \quad (3.2)$$

donde v_i es la velocidad de transmisión de la fuente i y V la velocidad de salida del multiplexor.

EJEMPLO

Dado un canal de 1 Mbps, ¿cuántas fuentes de 8 kbps podemos multiplexar TDM sobre él? Muestre la forma en que se realiza la transmisión de los bits correspondientes a cada emisor.

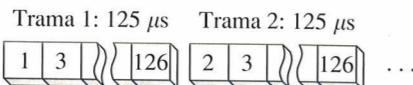
En este caso, dado que todas las fuentes son de la misma velocidad, resulta: $n = 10^6/8 \cdot 10^3 = 125$ emisores, los cuales deberán «muestrearse» con un período $1/8 \text{ kbps}^{-1} = 125 \mu\text{s}$. Así pues, la transmisión se efectuará de la forma:



EJEMPLO

Repita el ejercicio anterior para el caso en que se consideren dos de las fuentes a 4 Kbps, digamos las número 1 y 2.

Como antes, podremos considerar 125 fuentes a 8 kbps. Como dos de ellas son de 4 kbps, resultará un total de $n = 126$ emisores: 124 a 8 kbps y 2 a 4 kbps. La transmisión en este caso será de la forma:

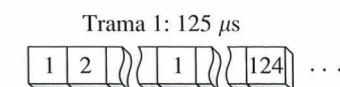


donde cada trama, como antes, está compuesta por 125 bits. Ahora no obstante, la velocidad mitad de los emisores 1 y 2 se traduce en una transmisión de ellos cada 2 tramas o ciclos a diferencia de como sucedía en el ejemplo anterior y como sigue sucediendo para las fuentes 3, 4, ..., n .

EJEMPLO

Repita el ejercicio anterior para el caso en que se considere, por ejemplo, el emisor 1 a 16 kbps y el resto a 8 kbps.

Como antes, podremos considerar 125 fuentes a 8 kbps. Como una de ellas es a 16 kbps, resultará un total de $n = 124$ emisores: 123 a 8 kbps y 1 a 16 kbps. La transmisión en este caso será de la forma:



donde el emisor 1 transmitirá dos veces por trama o ciclo, el doble, por tanto, que el resto.

Aunque también podría situarse la segunda ranura asignada a la fuente 1 al inicio de trama, suele resultar más práctico, si el multiplexor lo permite, ubicarla a mitad de trama para optimizar el uso de la memoria temporal a la entrada.

En aquellas ocasiones en las que la relación entre las velocidades de transmisión de los distintos emisores no es un número entero, la secuenciación en las tramas no es tan inmediata como la indicada en los ejemplos anteriores. En estos casos suele recurrirse a la inserción de bits de relleno a efectos de hacer entera esta relación y, en consecuencia, más fácil la composición de las tramas para su transmisión.

Como comentario adicional hemos de indicar la existencia de memorias de almacenamiento temporal asociadas a cada fuente a la entrada del multiplexor. Su finalidad es doble, ya que permiten almacenar los bits correspondientes a una ranura mientras el conmutador esté atendiendo a otras fuentes y, al mismo tiempo, amortiguar las posibles variaciones en el tiempo del tráfico generado por dicha fuente. Este último aspecto puede presentar un importante efecto en las prestaciones y comportamiento del multiplexor, por lo que será considerado en el Apéndice 3.A, una vez establecidas las nociones necesarias de teoría de colas.

De forma análoga al caso de FDM, esta técnica también es denominada acceso múltiple por división en el tiempo, TDMA («Time-Division Multiple Access»).

Tanto la técnica FDM como la técnica TDM implican una división estática del medio. Ello significa que si una de las fuentes no dispone momentáneamente de datos que transferir, se produce el consecuente desaprovechamiento del canal. Este hecho queda reflejado en la expresión de la eficiencia de ocupación de canal que presenta este tipo de técnicas:

$$E = \frac{K}{N} \quad (3.3)$$

donde N es el número de divisiones predeterminadas sobre el canal y K el número medio de emisiones o ranuras ocupadas a lo largo del tiempo. Es evidente pues que si $K = N$, es decir, si todos los emisores disponen siempre de datos que transmitir, la eficiencia será del 100%. En cambio, a medida que K disminuya frente a N también lo hará la eficiencia.

Frente a los esquemas estáticos anteriores, surge la idea de elaborar técnicas de acceso dinámicas que permitan un mejor aprovechamiento del canal en situaciones de transmisiones típicas a ráfagas, no continuas. Así, por ejemplo, en la técnica *TDM asíncrona o estadística* (ATDM, «Asynchronous Time-Division Multiplexing») se realiza una transmisión por turnos como en TDM, pero a diferencia de esta, se trata de evitar la existencia de ranuras sin uso. Ello se consigue de la siguiente forma: si el emisor al que le llega el turno no dispone de datos a transmitir, cede su turno a la siguiente estación, y así sucesivamente hasta que haya alguna que desee aprovecharlo (Figura 3.6).

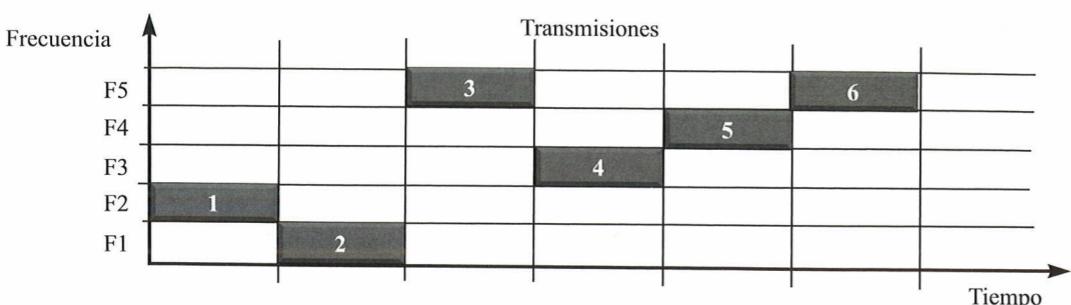


Figura 3.9. Transmisión de una estación mediante salto de frecuencias (FH).

- b) De longitud infinita. Con ello se evita su potencial predicción por parte de terceros ajenos al emisor y al receptor. En este sentido, hay que apuntar la necesidad de utilizar un mecanismo de sincronización emisor-receptor a fin de aplicar en ambos extremos la misma secuencia pseudo-aleatoria.

3.2.4. Discusión

Las distintas técnicas de multiplexación estudiadas a lo largo de este apartado se caracterizan, en general, por llevar a cabo una división (en el tiempo, en frecuencias o en código) estática del medio de transmisión. Si bien este proceder resulta adecuado en aquellas situaciones en las que todos los emisores transmiten y lo hacen de forma continua, no ocurre lo mismo cuando el número de emisores activos es bajo y/o el tráfico que generan es a ráfagas. En tal situación puede demostrarse, haciendo uso de teoría de colas¹, que la eficacia conseguida con las técnicas de multiplexación resulta muy pobre.

Por otra parte, las técnicas de multiplexación introducen un retardo en las transmisiones que puede ser evaluado también haciendo uso de teoría de colas. Así, suponiendo una única fuente transmitiendo sobre un canal de capacidad C bps con un ritmo de llegada de λ tramas/segundo, cada una de ellas de longitud L bits, el retardo medio sufrido por cada trama en su envío sobre el canal es:

$$T = \frac{1}{\frac{C}{L} - \lambda} \quad (3.5)$$

Si, de acuerdo a como se procede en FDM o en TDM, dividimos el canal en N subcanales independientes, cada uno de ellos de capacidad C/N bps y ritmo de llegada λ/N tramas/segundo, el retardo medio sufrido en el envío de datos será:

$$T_{FDM/TDM} = \frac{1}{\frac{C}{L-N} - \frac{\lambda}{N}} = \frac{N}{\frac{C}{L} - \lambda} \quad (3.6)$$

Es decir, el retardo en FDM/TDM es N veces superior al obtenido en el caso de considerar el envío de todas las tramas en base a una única cola más grande. Este resultado, junto con la infrautilización del canal cuando las fuentes no transmiten de forma constante, nos lleva a la necesidad de diseñar técnicas de acceso dinámicas mediante las que realizar la transmisión en entornos de redes de computadores,

¹ En el apéndice desarrollado al final de este capítulo se hace una breve introducción a la teoría de colas.

caracterizados eminentemente por envíos de datos a ráfagas. Estas técnicas se caracterizan por establecer unos conjuntos de reglas, en forma de protocolos, que deben seguir las diferentes estaciones para poder acceder al canal. De esta forma, la transmisión se realizará a demanda de la estación cuando esta tenga datos para enviar y se cumplan las reglas para ello, posibilitándose así la asignación de recursos a una estación cuando los necesite.

En los apartados que siguen se estudian dos tipos de técnicas de acceso dinámico: basadas en contención y libres de colisión o planificadas. Estas técnicas no son disjuntas con respecto a las de multiplexación anteriormente estudiadas, sino que, por el contrario, pueden usarse en conjunción con ellas. Así, por ejemplo, ante la existencia de un gran número de estaciones en el medio podríamos dividir el espectro mediante FDM y, para el acceso en cada rango de frecuencias, utilizar una técnica de acceso dinámico como CSMA/CD, o incluso, por qué no, TDM.

3.3. Técnicas de contención

La característica principal de este tipo de esquemas de acceso al medio es su naturaleza aleatoria, ya que las distintas estaciones que desean transmitir tienen que competir entre sí para conseguirlo. De ahí el término «contención», en ocasiones referido como competición o contienda. Adicionalmente, la competencia entre las estaciones hace que el instante en el que una de ellas conseguirá finalmente realizar la transmisión es desconocido e impredecible, no estando siquiera garantizado que pueda realizarla en un tiempo finito. De ahí que también se denomine a estas técnicas de acceso aleatorio.

Una característica común a todas las variantes de las técnicas de contención es la existencia de colisiones. Se denomina *colisión* a la interferencia causada entre transmisiones de tramas simultáneas o solapadas temporalmente procedentes de diversas fuentes. Las tramas que sufren colisión serán incorrectas y, consecuentemente, se desaprovechará el uso del canal durante su transmisión. Evidentemente, será necesario retransmitir las tramas dañadas, para lo que es necesario esperar un tiempo aleatorio, denominado *tiempo de retroceso*, antes de intentar la retransmisión. Esto es debido a que, si se utilizase un tiempo de retroceso fijo, se volvería a producir colisión entre las tramas procedentes de los mismos equipos, ya que estos utilizarían el mismo intervalo. En consecuencia, y dado que las colisiones serán inevitables en estas técnicas, uno de los objetivos de las diversas variantes será reducir el número de colisiones.

Otra característica relevante de los protocolos de acceso aleatorio es la ausencia de coordinación entre las estaciones, lo que simplifica su operación. Las reglas del protocolo, comunes para todos los equipos, deben establecer mecanismos para el acceso que permitan a cada equipo determinar si pueden intentar la transmisión por sus propios medios, sin depender de ningún tipo de información que deban proporcionar los restantes equipos. En este sentido, los protocolos de contención tendrían un funcionamiento similar al de un debate en el que todos los interlocutores conocen (y respetan) las reglas de cortesía y no se necesita moderador que asigne turnos de palabra. Cada interlocutor intentará hablar (acceder al canal) siguiendo esas reglas, que establecerán cuándo se puede hablar (p. e., cuando no haya nadie más hablando) y qué hacer en caso de que haya dos o más personas hablando (colisión). Si las reglas son adecuadas, el número de colisiones será reducido y estas serán de corta duración, posibilitando un debate fluido.

3.3.1. ALOHA puro y ALOHA ranurado

La Universidad de Hawái desarrolló en 1970 un esquema de acceso para posibilitar la comunicación entre los campus existentes en las distintas islas. La técnica ideada, de nombre ALOHA, es de lo más simple: una estación transmite cuando dispone de datos para hacerlo, sin importarle consideraciones

adicionales. Es evidente, desde un punto de vista meramente intuitivo, que este modo de proceder resulta del todo ineficiente por cuanto que implica la ocurrencia de numerosas colisiones, salvo que el número de transmisiones sea realmente bajo, esto es, haya baja ocupación del canal.

Para llevar a cabo un estudio aproximado de la eficiencia de la técnica de acceso ALOHA consideraremos los siguientes parámetros:

- t_{trama} = tiempo que tarda en completarse la transmisión de una trama de datos.
- S = eficiencia o rendimiento (*«throughput»*), expresado como el número de tramas transmitidas correctamente por unidad de tiempo de trama. Es claro que $S \leq 1$. También se denomina carga ofrecida.
- G = número de intentos de transmisión por parte de todas las estaciones por unidad de tiempo de trama. Es fácil constatar que $G \geq S$, de modo que para baja carga ($G \downarrow$) resulta $S \approx G$, mientras que para alta carga ($G \uparrow$) $S \ll G$. También es denominada carga demandada.

A partir de estas definiciones se puede establecer que $S = G \cdot P[0]$, siendo G , como se ha establecido, el número de intentos de transmisión y $P[0]$ la probabilidad de que no se produzcan colisiones, es decir, 0 transmisiones adicionales simultáneas. Suponiendo para este estudio que k , definido como el número de intentos de transmisión para una trama dada, sigue una distribución de Poisson, se verificará que su probabilidad viene dada por la expresión:

$$P[k] = \frac{\mu^k \cdot e^{-\mu}}{k!} \quad (3.7)$$

siendo μ el número medio de ellos. A partir de la anterior, podemos calcular la eficiencia de ALOHA sin más que hacer $k = 0$ en (3.7) y multiplicar por G , obteniendo:

$$S = G \cdot e^{-\mu} \quad (3.8)$$

La obtención de una expresión definitiva para la eficiencia precisa conocer el valor de μ ; o lo que es lo mismo, el número de intentos de transmisión que tienen lugar durante el periodo de tiempo que garantiza que una trama no colisiona con otra. Este periodo de tiempo es el denominado *intervalo de vulnerabilidad*. Suponiendo un tiempo de trama t_{trama} constante, es fácil concluir que el valor de dicho intervalo es $2t_{\text{trama}}$ si, como se ilustra en la Figura 3.10(a), se tiene en consideración que basta un solapamiento mínimo para que se produzca una situación de colisión. En consecuencia, el parámetro μ en (3.8) hará referencia al número medio de intentos de transmisión en el intervalo de tiempo $2t_{\text{trama}}$, es decir, $\mu = 2G$. Por tanto,

$$S = G \cdot e^{-2G} \quad (3.9)$$

La máxima eficiencia alcanzada en ALOHA es, así, $S_{\max} = 1/2e = 0,184$, obteniéndose para una carga demandada de $G = 0,5$, lo cual resulta del todo escaso (Figura 3.11).

Podemos obtener la probabilidad de éxito en una transmisión como el cociente entre el número de intentos de transmisión y el número de transmisiones con éxito, es decir, entre la carga demandada y el rendimiento, con lo que

$$P_{\text{éxito}} = \frac{G}{S} = e^{-2G} \quad (3.10)$$

En consecuencia, el valor esperado del número de intentos de transmisión fallidos (colisiones) por paquete, ε , será

$$\varepsilon = \frac{G}{S} - 1 = e^{-2G} - 1 \quad (3.11)$$

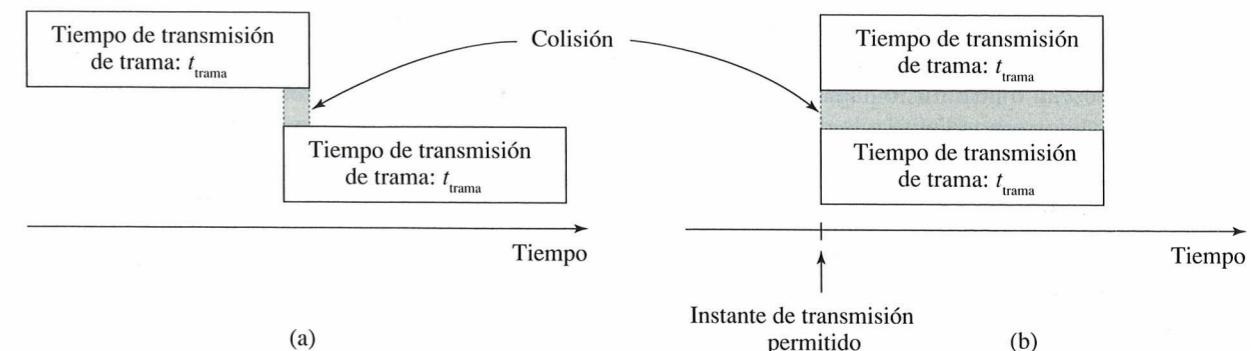


Figura 3.10. Estudio del intervalo de vulnerabilidad para ALOHA puro (a) y para ALOHA ranurado (b).

A partir de este valor y del tiempo de retroceso medio, B , podemos estimar el valor esperado del retardo, T_{ALOHA} , en el acceso al canal, ya que habrá ε intentos de transmisión fallidos, tras los que habrá que esperar el tiempo de retroceso, seguidos de una transmisión con éxito. Así,

$$E[T_{\text{ALOHA}}] = t_{\text{trama}} + (e^{-2G} - 1)(t_{\text{trama}} + B) \quad (3.12)$$

donde hemos supuesto que es la estación emisora la que detecta la existencia de la colisión de forma instantánea. El valor de t_{trama} se puede obtener a partir de la expresión:

$$t_{\text{trama}} = \frac{L}{V_t} \quad (3.13)$$

siendo L la longitud de la trama de datos en bits y V_t la velocidad de transmisión de la estación en bps.

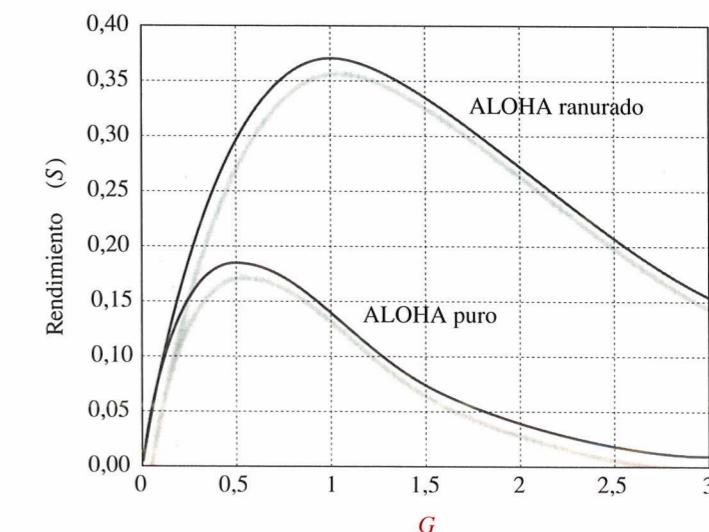


Figura 3.11. Eficiencia, S , de las técnicas ALOHA puro y ranurado en función de G .

Además de por el acceso simultáneo, también pueden producirse colisiones por efecto del retardo en la propagación de las señales por el canal. Así, es posible no detectar el canal como ocupado a pesar de que ya lo esté si la señal emitida por una estación aún no ha alcanzado a la estación que está sondeando el canal. El caso más desfavorable ocurrirá cuando la estación que ha iniciado la transmisión y la que sondea se encuentran en los extremos más distantes del canal, lo que dará lugar a que durante t_p tras el inicio de una transmisión podrá producirse una colisión, siendo t_p el tiempo de propagación de una señal de un extremo a otro del canal. En consecuencia, hemos de entender, en este contexto, que el acceso simultáneo de dos estaciones al canal es aquel que se produce en el intervalo correspondiente al tiempo de propagación entre ambas.

A modo de resumen, y como se muestra en la Figura 3.12, la eficiencia conseguida por cualquiera de los esquemas CSMA es superior a la alcanzada con ALOHA. Tal como se ha explicado anteriormente, la que peores prestaciones a alta carga presenta de las tres variantes descritas es la 1-persistente, pudiendo justificarse este hecho por la gran cantidad de colisiones que se producirían al constatar simultáneamente todas las estaciones la eventualidad de que el canal quedase libre y, en consecuencia, tratar de transmitir al mismo tiempo. A través de la técnica no-persistent se consigue distribuir los accesos a lo largo del tiempo, lo que se traduce en un número menor de colisiones y un consecuente mejor valor de la eficiencia. La variante que mejores prestaciones consigue es la p -persistente para valores muy pequeños de p . El argumento es el mismo: a menor valor de p mayor será la distribución temporal (desde un punto de vista estadístico) de los intentos de transmisión realizados por las estaciones que comparten el medio. Un razonamiento similar, pero al contrario, merece el comportamiento de las técnicas descritas desde el punto de vista del retardo de acceso al canal por parte de las estaciones.

3.3.3. CSMA/CD

A pesar de la mejora introducida por la capacidad que presentan las estaciones de escucha del medio y detección de portadora, en las técnicas CSMA se sigue desaprovechando el canal. Dicho desaprovechamiento corresponde al tiempo consumido en la transmisión de datos en el caso de ocurrencia de colisiones. Es decir, la transmisión CSMA de una trama no cesa hasta que esta se completa, se produzca o no colisión. Para solventar este problema se dota adicionalmente a las estaciones de la capacidad de detectar la aparición de colisiones², circunstancia ante la cual cesaría de forma inmediata cualquier transmisión. Esta característica conforma las técnicas denominadas *CSMA con detección de colisión* (CSMA/CD, «CSMA with Collision Detection»).

¿Cuál es el tiempo que tarda una estación usando CSMA/CD en percatarse de la ocurrencia de una hipotética colisión en la transmisión y, en consecuencia, abortar la misma? Este periodo de tiempo se denomina *intervalo de contención*. Basémonos para el estudio de este parámetro en la Figura 3.13, donde se muestra el caso más desfavorable correspondiente a las dos estaciones del medio más alejadas entre sí. A comienza a transmitir en t_0 ante la evidencia de desocupación del medio tras su sondeo. Tras el tiempo de propagación, t_p , la trama se comenzará a recibir en B. Justo antes de $t_0 + t_p$, B, dado su deseo de transmitir, sondea el canal y, puesto que este se encuentra libre, comienza a generar una trama de datos. Ante la inmediata colisión ocasionada, B deja de transmitir su trama, pero A no se percibirá de este hecho hasta que la colisión se propague hasta ella, es decir, en $t_0 + 2t_p$. En conclusión, el tiempo máximo que tarda una estación en constatar la

² La capacidad de detección de colisiones por parte de las estaciones emisoras se basa en la recepción de la señal transmitida sobre el medio y su comparación con la transmitida, siendo ambas distintas en caso de colisión. Por su parte, las estaciones receptoras se percatarán de este hecho a través de la constatación de la naturaleza errónea de las tramas recibidas (ver capítulo siguiente).

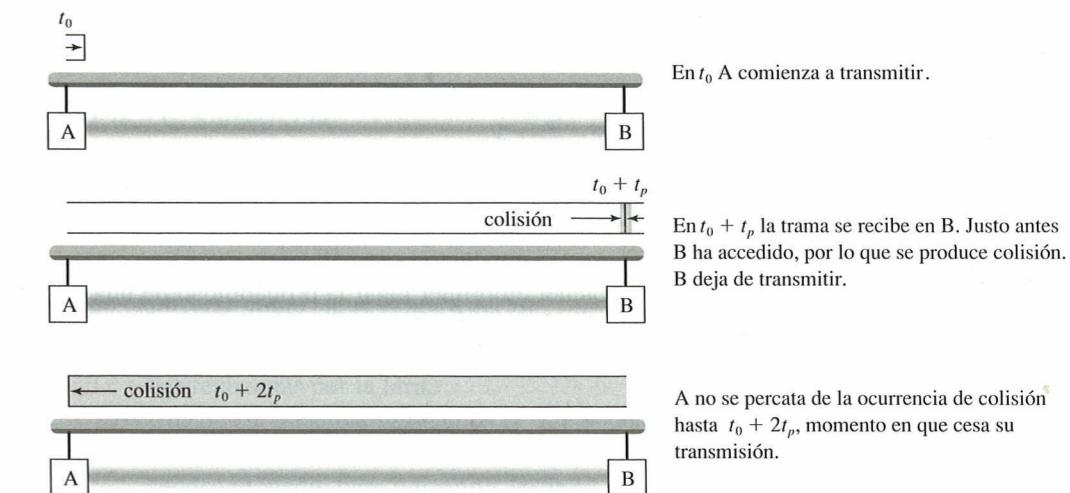


Figura 3.13. Estudio de la duración del intervalo de contención en CSMA/CD.

ocurrencia de una colisión en la transmisión es $\tau = 2t_p$, siendo t_p el tiempo de propagación de las señales entre las dos estaciones más alejadas.

Así pues, la transmisión CSMA/CD de las estaciones sobre el canal seguirá el esquema indicado en la Figura 3.14. En ella se muestra la existencia de varios intervalos de contención correspondientes a intentos de transmisión fallidos (colisiones), antes de conseguir transmitir con éxito una trama de datos. También existirán intervalos de tiempo en los que el medio está desocupado debido a la inactividad de las estaciones.

A partir de este esquema, es fácil constatar que la eficiencia, U , del esquema de acceso CSMA/CD puede aproximarse mediante la expresión:

$$U = \frac{t_{\text{trama}}}{t_{\text{trama}} + R \cdot 2 \cdot t_p} \quad (3.17)$$

donde t_{trama} es el tiempo de transmisión o generación de una trama de datos, t_p el tiempo de propagación en el medio y R el número medio de intervalos de contención antes de conseguir transmitir con éxito la trama. Es decir, se define la eficiencia del esquema de acceso como la relación entre el tiempo efectivo que implica la transmisión de una trama de datos y el tiempo total consumido para ello.

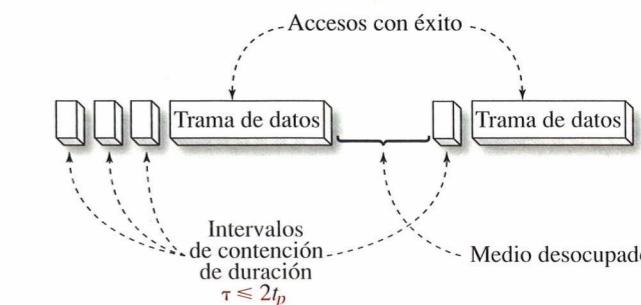


Figura 3.14. Eventos de transmisión en CSMA/CD.

En la ecuación anterior se ha supuesto que la duración de los intervalos de contención es la máxima: $2t_p$. Se puede evaluar t_p a partir de la expresión:

$$t_p = \frac{D}{V_p} \quad (3.18)$$

donde D es la distancia entre las dos estaciones más alejadas en el medio y V_p la velocidad de propagación de las señales en este, que corresponde a la velocidad de la luz en el medio. Típicamente su valor es $2,8 \times 10^8$ m/s en la atmósfera y 2×10^8 m/s en conductores metálicos.

Por su parte, para estimar R vamos a obtener en primer lugar la probabilidad de una transmisión con éxito, $P_{\text{éxito}}$. Si N es el número de estaciones en el medio y P la probabilidad de transmisión de una estación en un momento dado³,

$$P_{\text{éxito}} = \binom{N}{1} \cdot P \cdot (1 - P)^{N-1} \quad (3.19)$$

Es decir, la probabilidad de llevar a cabo con éxito una transmisión es la probabilidad de que una, cualquiera, de las N estaciones decida transmitir y el resto, $N - 1$, no. Obtenida $P_{\text{éxito}}$, el valor esperado del número de intervalos de contención se podrá obtener a partir de la siguiente serie:

$$E[R] = \sum_{i=0}^{\infty} i \cdot P_{\text{éxito}} (1 - P_{\text{éxito}})^i = \frac{1 - P_{\text{éxito}}}{P_{\text{éxito}}} \quad (3.20)$$

Sustituyendo (3.19) en (3.20) y este en (3.17), y normalizando a t_{trama} , la expresión de la eficiencia para la técnica de acceso CSMA/CD queda:

$$U = \frac{1}{1 + 2 \cdot a \left(\frac{1 - P_{\text{éxito}}}{P_{\text{éxito}}} \right)} \quad (3.21)$$

donde se ha introducido el parámetro adimensional a , definido como

$$a = \frac{t_p}{t_{\text{trama}}} \quad (3.22)$$

Si en un instante dado solo desease transmitir una estación es claro que $P_{\text{éxito}} = 1$, por lo que, según se deduce de (3.21), $U = 1$. En cambio, si hacemos $N \rightarrow \infty$, entonces $U \rightarrow 0$ debido a que $P_{\text{éxito}} \rightarrow 0$. En resumen, esto se traduce en un mejor comportamiento de las técnicas CSMA/CD a baja carga que en situaciones de alta carga.

Esta afirmación es extrapolable a las técnicas de contención en general, lo cual es fácilmente comprensible si entendemos que el deseo de transmisión por parte de varias estaciones se traducirá en numerosas colisiones, lo que introducirá retardo en el acceso al canal. Por el contrario, en el caso hipotético de que solo una de ellas desee hacerlo, obviamente, no se producirán colisiones, accediendo la estación de forma inmediata al medio.

Un último comentario respecto de los esquemas de contención en general, y de las técnicas CSMA en particular, se refiere al hecho de que el tiempo de acceso al medio con éxito por parte de las estaciones no está garantizado. Es decir, no se puede decir a priori el tiempo máximo que conllevará la

³ En ocasiones suele tomarse $P = 1/N$; es decir, todas las estaciones tienen, *a priori*, la misma probabilidad de transmitir. Esta situación es, además, la que maximiza el rendimiento.

transmisión con éxito de una trama de datos. Desde este punto de vista, el esquema que mejor comportamiento presenta es el 1-persistente.

3.3.4. CSMA/CA

La técnica CSMA con prevención de colisión (CSMA/CA, «CSMA with Collision Avoidance»), también denominada MACA («Multiple Access with Collision Avoidance») se desarrolló a partir de CSMA/CD para ser utilizada en redes inalámbricas. En estas, la aplicación directa de CSMA/CD resulta inviable debido a la situación denominada problema de la estación oculta. Dicha situación puede explicarse como sigue (Figura 3.15):

- a) Supongamos dos estaciones, A y B, tan lejanas que no son capaces de detectar las transmisiones realizadas por la otra.
- b) Una de las estaciones, digamos la A, tras detectar el medio libre, inicia una transmisión hacia una tercera estación, C, situada en la zona intermedia entre A y B. Cuando la otra estación, B, sondea el medio para transmitir hacia C, no se percata de que está en uso por parte de la otra estación, por lo que realiza un acceso.
- c) Ninguna de las dos estaciones transmisoras, A y B, se percata de la ocurrencia de una colisión, ya que quedan fuera de sus respectivos alcances. Sin embargo, ambas transmisiones se recibirán en C, produciéndose una colisión que únicamente será detectada por C. Esta estación intermedia, C, es la que se dice que «oculta un extremo al otro».

Para solucionar este problema se hace uso del esquema CSMA/CA, en el que se implementa el procedimiento conocido como *sondeo de portadora virtual* («virtual carrier sense»). Este consiste en lo siguiente. Cuando una estación, digamos A en la Figura 3.15, desea transmitir y detecta el medio

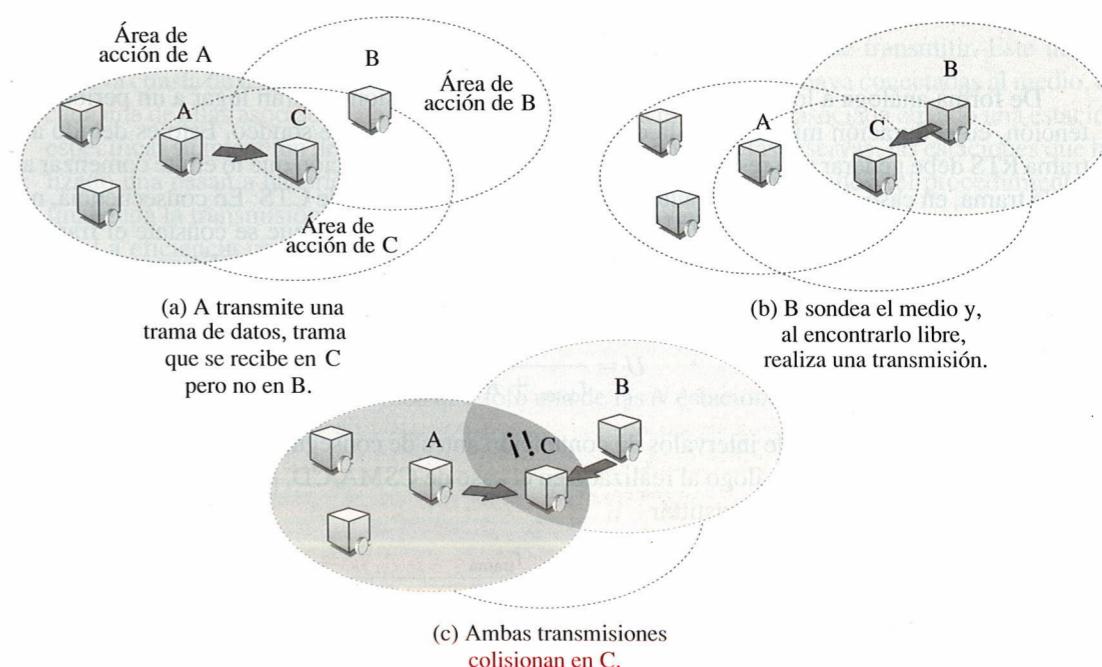


Figura 3.15. Problema de la estación oculta.

libre, genera una trama de solicitud de envío (RTS, «Request To Send») hacia la estación receptora, C. Ante la recepción de esta trama en las estaciones situadas en el área de acción de A (zona sombreada en la Figura 3.15), estas deben permanecer en silencio. El destino, C, debe responder con una trama de permiso de envío (CTS, «Clear To Send»), la cual se recibirá en todas las estaciones situadas en el rango de acción de C, entre ellas B, y hará que estas permanezcan en silencio. De esta forma, tanto las estaciones en el radio de acción de A como de C permanecen en silencio durante un periodo de tiempo preestablecido, durante el que se realiza la transmisión de la trama por parte de A. Habitualmente, la estación destinataria debe también confirmar la recepción mediante una trama de confirmación (ACK) dentro de dicho periodo.

Cuando se utiliza el esquema de sondeo de portadora virtual, por construcción, es imposible que se produzcan colisiones en las tramas de datos o en las tramas CTS. Sin embargo, sí que resulta posible que se produzcan colisiones en las tramas de solicitud (RTS), por lo que se utilizan algoritmos de retroceso como el retroceso exponencial binario (ver Capítulo 5) para la retransmisión de dichas tramas de solicitud.

Para estimar la eficiencia de CSMA/CA hemos de considerar el tiempo útil, que será el empleado en transmitir la trama, t_{trama} , frente al tiempo total empleado, t_{total} , el cual se refiere al que transcurre desde que se inicia un sondeo virtual hasta que una estación puede iniciar otro:

$$U = \frac{t_{\text{trama}}}{t_{\text{total}}} \quad (3.23)$$

De acuerdo al proceso que se sigue en CSMA/CA, y suponiendo que los tiempos de procesamiento en el origen y el destino son despreciables, podemos dividir el tiempo total en dos partes diferenciadas correspondientes al tiempo empleado en el sondeo, t_{sondeo} , y al envío de la trama de datos, t_{trama} , de forma que

$$t_{\text{sondeo}} = t_{\text{RTS}} + t_p + t_{\text{CTS}} + t_p \quad (3.24)$$

De forma análoga a lo que ocurría en CSMA/CD, las colisiones darán lugar a un periodo de contención, cuya duración mínima será la correspondiente al tiempo de sondeo. Esto es debido a que la trama RTS debe generar una reserva de tiempo que permita a la estación que lo emite comenzar a generar la trama, en caso de recibirse la autorización para ello en forma de CTS. En consecuencia, ninguna estación en el radio de alcance de la emisora intentará acceder hasta que se constate el fracaso en la solicitud, lo que ocurrirá cuando no se observe el inicio de la trama de datos. En consecuencia, podemos aproximar el rendimiento mediante

$$U = \frac{t_{\text{trama}}}{t_{\text{datos}} + R \cdot t_{\text{sondeo}}} \quad (3.25)$$

siendo R el número medio de intervalos de contención antes de conseguir enviar la trama con éxito. Si hacemos un razonamiento análogo al realizado en el caso de CSMA/CD, podemos estimar R mediante (3.20), por lo que, sin más que sustituir

$$U = \frac{t_{\text{trama}}}{(t_{\text{trama}} + t_p) + \left(\frac{1 - P_{\text{éxito}}}{P_{\text{éxito}}}\right) \cdot (2t_{\text{CTRL}} + 2t_p)} \quad (3.26)$$

donde hemos supuesto que, como es habitual, las tramas de control RTS y CTS tienen el mismo tamaño, por lo que tienen idéntica duración t_{CTRL} .

Operando en (3.26), teniendo en cuenta (3.22) y suponiendo que las tramas de control tienen un tamaño despreciable frente a la de datos, podemos aproximar (3.26) según

$$U = \frac{1}{1 + a \left(\frac{2 - P_{\text{éxito}}}{P_{\text{éxito}}} \right)} \quad (3.27)$$

Si comparamos este rendimiento con el de CSMA/CD dado por (3.21) podemos observar que CSMA/CA presenta siempre una menor eficiencia en condiciones de carga similares debido al tiempo empleado en el sondeo, que implica un factor $2a$ adicional. Sin embargo, el uso de CSMA/CA resulta necesario dado el problema mencionado de la estación oculta.

Finalmente, hemos de mencionar que en los sistemas en los que se usa CSMA/CA se establecen periodos de valor fijo para que las estaciones permanezcan en silencio tras observar tramas RTS, CTS o de datos (ver Apartado 5.3.3), por lo que el estudio presentado es una aproximación teórica.

3.4. Protocolos libres de colisión

Los esquemas no basados en colisión suelen denominarse *planificados* por cuanto que, frente a la transmisión aleatoria seguida en las técnicas de contención, ahora las estaciones acceden de forma ordenada siguiendo una planificación previamente establecida. Dentro de los esquemas planificados se distingue entre los *basados en reserva* y *basados en consulta*, los cuales son estudiados a continuación.

3.4.1. Basados en reserva

En este tipo de técnicas las estaciones deben realizar una reserva, que debe ser conocida por todas las estaciones, antes de poder transmitir. Para ello se hace uso de un intervalo de tiempo, llamado *de reserva*, a fin de que las estaciones expresen públicamente su deseo de transmitir. Este intervalo de reserva consta de tantas «minirranuras» temporales como estaciones haya conectadas al medio, estando cada una de ellas asociada a una estación. Es durante la minirranura asociada cuando una estación debe especificar su intención de acceder al canal. Una vez realizadas las reservas, las estaciones que han realizado una pasan a hacerlo de forma secuencial (Figura 3.16), repitiéndose el procedimiento una vez finalizada la transmisión de todas las estaciones que hayan reservado.

La eficiencia conseguida con estas técnicas es fácil de estimar siguiendo la misma metodología que en (3.17). Para ello vamos a considerar que el intervalo de reserva consiste en la existencia de N bits, uno por estación, y que cada trama de datos tiene una longitud igual a d bits. Veamos las dos situaciones de carga extremas:

— *Baja carga*. Si suponemos que solo una de las N estaciones existentes en el medio desea transmitir:

$$U = \frac{d}{d + N} \quad (3.28)$$

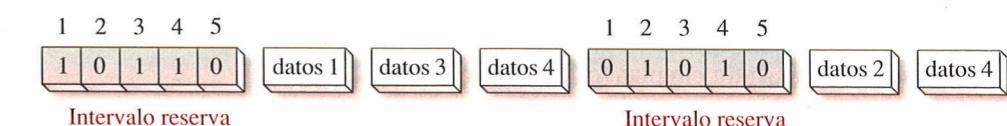


Figura 3.16. Ejemplo de transmisión basada en reserva para $N = 5$ estaciones.

- Alta carga. En el supuesto de que todas las estaciones desean transmitir:

$$U = \frac{d \cdot N}{d \cdot N + N} = \frac{d}{d + 1} \quad (3.29)$$

Según se deduce de (3.28) y (3.29), la eficiencia conseguida con las técnicas de reserva es mayor en situación de alta carga que en condiciones de baja carga. Este hecho es fácilmente comprensible desde un punto de vista teórico si pensamos que la planificación implica redundancia (bits suplementarios), con lo que el desaprovechamiento del canal que conlleva se reduce a medida que aumenta la relación datos transmitidos-redundancia considerada.

Por otra parte, es claro que en estas técnicas el retardo en el acceso al canal está acotado, si aceptamos que todas las estaciones tienen limitado el tiempo de transmisión en cada ciclo. El valor del retardo para una estación dada será la suma del tiempo que transcurre desde que se desea acceder al canal hasta que se puede realizar la reserva al inicio del siguiente ciclo, más el tiempo desde que se hace la reserva hasta que le llega el turno de transmisión. El valor máximo para el primero de estos tiempos es el de un ciclo completo de transmisión, siendo independiente de la posición asociada a la estación en el intervalo de reserva. Sin embargo, el segundo de los tiempos depende de esta posición, por lo que las estaciones asociadas a las primeras posiciones tienen cierta ventaja respecto de las restantes. Por este motivo, en este tipo de técnicas se suelen ir rotando las posiciones (direcciones) asociadas a las estaciones.

3.4.2. Basados en consulta

En los protocolos de consulta cada equipo en la red es sondeado cíclicamente. Se pueden diferenciar dos tipos de métodos de consulta:

- Sistemas de consulta centralizados: en este caso todas las comunicaciones son coordinadas por una estación central, que es la encargada de determinar las estaciones que desean transmitir y, en su caso, establecer los turnos.
- Sistemas de consulta distribuidos: las estaciones implementan un algoritmo descentralizado para determinar el orden de transmisión.

En los sistemas centralizados se utilizan tramas de sondeo, que se van enviando cíclicamente a todas las estaciones. En la variante más simple, las estaciones que desean transmitir lo harán cuando reciban la trama de sondeo, de forma que la propia trama de sondeo constituye un permiso para transmitir. Si la estación no tiene datos para enviar, se limita a responder con una confirmación. En otras variantes más sofisticadas, la estación que recibe la trama de sondeo informa a la estación central o coordinadora sobre las características de la transmisión que desea realizar en una trama de respuesta. Una vez recibidas todas las respuestas, es la estación central la que decide el orden de las transmisiones y va enviando tramas de permiso de transmisión a cada estación.

En los sistemas distribuidos se utiliza una trama especial, denominada *testigo* (*token*), que se va pasando de una estación a otra. Para que una estación pueda transmitir debe antes «capturar» dicho testigo. Por tanto, el testigo libre constituye una trama de permiso de acceso al medio. Por este motivo, a este tipo de sistemas se les denomina de *paso de testigo*.

El proceso de transmisión seguido es:

1. El testigo se encuentra circulando libremente por el medio.
2. Si una estación desea transmitir debe «capturar» el testigo, tras lo cual:
 - a) La estación transmite datos durante un intervalo de tiempo dado.
 - b) La estación regenera el testigo sobre el medio, volviendo el esquema al punto 1.

Para el estudio de la eficiencia de este procedimiento de acceso vamos a suponer, sin pérdida de generalidad, que: (1) los datos transmitidos durante el tiempo de posesión del testigo corresponden a una única trama y (2) la topología de red es la mostrada en la Figura 3.17. Así pues, bajo estas consideraciones, la expresión de la eficiencia resulta:

- Baja carga. Si suponemos que solo una de las N estaciones existentes en el medio desea transmitir:

$$U = \frac{t_{\text{trama}}}{t_{\text{trama}} + t_p} \quad (3.30)$$

- Alta carga. En el supuesto de que todas las estaciones desean transmitir:

$$U = \frac{N \cdot t_{\text{trama}}}{N \cdot \left(t_{\text{trama}} + \frac{t_p}{N} \right)} = \frac{t_{\text{trama}}}{t_{\text{trama}} + \frac{t_p}{N}} \quad (3.31)$$

En el estudio anterior se ha supuesto que el tiempo de generación del testigo es despreciable y que las estaciones se encuentran dispuestas de forma equiespaciada en el medio, de manera que el tiempo de paso de testigo entre estaciones es el tiempo total de propagación en el medio, t_p , dividido por N .

A pesar del carácter distribuido de los protocolos de paso de testigo, resulta necesario establecer mecanismos para resolver algunas contingencias, como la posible pérdida del testigo, que requieren de la existencia de una estación monitora que supervise la correcta operación del sistema.

Como en los esquemas basados en reserva, la eficiencia conseguida con la técnica de sondeo es superior en condiciones de alta carga que para baja carga. Otro hecho importante a concluir respecto de los esquemas planificados es que en estos, frente a los de contención, sí está acotado el tiempo máximo de acceso al medio por parte de las estaciones.

3.4.3. Contención limitada

Como conclusiones fundamentales al estudio de las técnicas de acceso dinámico estudiadas a lo largo de este Apartado, 3.4, y del anterior, 3.3, hemos de mencionar las tres siguientes:

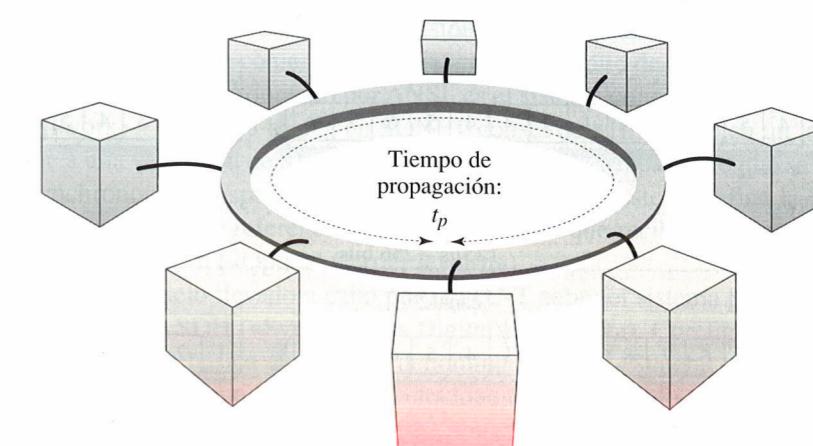


Figura 3.17. Red en anillo típica donde se utiliza la técnica de acceso basada en consulta.

- Las técnicas basadas en colisión se comportan mejor en condiciones de baja carga.
- Por el contrario, los esquemas de acceso planificados presentan un mejor comportamiento en condiciones de alta carga.
- El tiempo de acceso se encuentra acotado en las técnicas planificadas, pero no así en las basadas en contención.

A partir de estos resultados es fácil deducir la complementariedad que presentan ambos tipos de técnicas. Sería interesante, por tanto, combinar los esquemas basados en contención con los planificados en aquellas situaciones en las que el número de estaciones comienza a ser immanejable desde el punto de vista de los retrasos temporales introducidos en las transmisiones. La forma de hacer esta combinación podría consistir en agrupar las estaciones de modo que existiesen varios grupos, cada uno de ellos con un número reducido de estaciones. El acceso de los grupos al medio se organizaría en base a un esquema planificado, mientras que la decisión de cuál es la estación del grupo que transmite en la ranura temporal asociada se realizaría de acuerdo a un esquema de contención. Las técnicas que combinan los tipos de acceso aleatorio y planificado se conocen con el nombre de *contención limitada*.

3.5. Jerarquías digitales síncronas

Para concluir el desarrollo teórico de este tercer capítulo, en este apartado se presenta un ejemplo de uso de las técnicas de acceso al medio hasta ahora descritas. Consideraremos aquí la aplicación de las técnicas de multiplexación, en particular, de TDM, en la transmisión síncrona. En el Capítulo 5 se describirá la aplicación de las técnicas basadas en colisión en las redes LAN actuales, así como el uso de las técnicas de multiplexación en las redes de acceso.

A principios de los años 60 del siglo pasado comenzó a utilizarse la técnica TDM síncrona para la transmisión de voz sobre la red telefónica. Así nació en los Estados Unidos de América, auspiciado por ANSI, el sistema T-1. Muestreada la voz a transmitir a 8.000 Hz y codificadas las muestras con 8 bits PCM, la trama T-1, también llamada DS-1 («Digital Signal 1»), multiplexa 24 muestras procedentes de sendas fuentes de voz en un intervalo de $125\ \mu s$ de duración. Adicionalmente a los 192 bits correspondientes a las 24 muestras de voz se introduce un bit suplementario a fin de servir de delimitación de trama (Figura 3.18(a)).

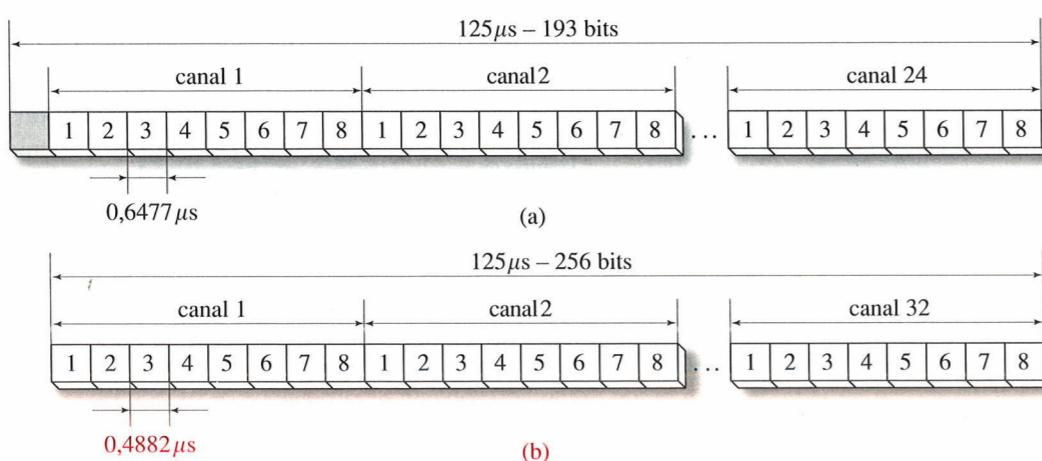


Figura 3.18. Sistemas de transmisión TDM T-1 (a) y E-1 (b).

Tabla 3.1. Jerarquías TDM en Norteamérica e internacionales.

Norte América (ANSI)			Internacional (ITU-T)		
Sistema	Canales voz	Velocidad (Mbps)	Sistema	Canales voz	Velocidad (Mbps)
T-0/DS-0	1	0,064	E-0	1	0,064
T-1/DS-1	24	1,544	E-1	30	2,048
T-2/DS-2	96	6,312	E-2	120	8,448
T-3/DS-3	672	44,736	E-3	480	34,386
T-4/DS-4	4.032	274,176	E-4	1.920	139,264
T-5/DS-5	8.064	560,16	E-5	7.680	565,148

De acuerdo con los datos anteriores, la velocidad de salida del sistema T-1 es $193/125 \cdot 10^{-6} = 1,544$ Mbps. Definidas de forma anidada en varios niveles, jerarquías de transmisión TDM superiores son (Tabla 3.1): sistema T-2/DS-2, que multiplexa 4 tramas T-1 (lo que equivale a una velocidad de $6,312$ Mbps⁴); sistema T-3/DS-3, que multiplexa 7 tramas T-2/DS-2 (44,736 Mbps); sistema T-4/DS-4, que multiplexa 6 tramas T-3/DS-3 (274,176 Mbps); y sistema T-5/DS-5, que multiplexa 2 T-4/DS-4.

Estas jerarquías, adoptadas también en Japón y Canadá, difieren de las estandarizadas en Europa y el resto del mundo por la ITU-T. En este caso el sistema básico es el E-1, también denominado CEPT-1 («Conference of European Post and Telegraphs»), consistente en la multiplexación de 32 canales en una trama, como antes, de $125\ \mu s$ de duración (Figura 3.18(b)). Esto equivale a una velocidad de $256/125 \cdot 10^{-6} = 2,048$ Mbps. No obstante, dos de los canales son de señalización, por lo que la velocidad efectiva de transmisión de datos es 1,92 Mbps. Las jerarquías de transmisión en el sistema europeo corresponden a la multiplexación en un factor 4 en cada nivel; es decir, la velocidad de transmisión en el nivel 2 será el cuádruple de la de nivel 1, en el nivel 3 4 veces la del 2, y así sucesivamente.

Como comentario adicional respecto de los sistemas T-n y E-n, diremos que en ellos se utiliza el esquema de codificación AMI, con sustitución de ceros mediante el esquema B8ZS en el primero y HDB3 en el segundo (ver Apartado 2.3.2).

De forma similar a las técnicas de transmisión telefónica comentadas con los sistemas T-1 y E-1, a mediados de los 80 Bellcore comenzó a trabajar en el desarrollo de un estándar para transmisión TDM síncrona sobre fibra óptica. Adoptado por ANSI, es el sistema conocido como SONET («Synchronous Optical NETwork»). La trama básica en SONET consta de 810 octetos en un intervalo de $125\ \mu s$, lo que equivale a una velocidad de $810 \times 8/125 \cdot 10^{-6} = 51,84$ Mbps. Es lo que se conoce como sistema STS-1 («Synchronous Transport Signal level-1»). A partir de este se define la jerarquía mostrada en la Tabla 3.2, donde se hace referencia a la denominación que reciben los esquemas STS-n cuando la portadora es óptica: OC-n («Optical Carrier level-n»).

El trabajo en paralelo llevado a cabo por la ITU-T sobre el sistema SONET dio lugar a las jerarquías conocidas como SDH («Synchronous Digital Hierarchy»). Con ligeras diferencias sobre el sistema SONET, la trama básica en SDH se denomina STM-1 («Synchronous Transfer Modules-1») y consta de 2.430 bytes, lo que implica una velocidad de 155,52 Mbps.

⁴ En realidad, $4 \times 1,544 = 6,176$ Mbps. Los bits extra se utilizan para delimitación y sincronización.

Tabla 3.2. Jerarquías SONET y SDH.

SONET	SDH	Velocidad (Mbps)	Datos útiles (Mbps)
STS-1/OC-1	—	51,84	50,112
STS-3/OC-3	STM-1	155,52	150,336
STS-9/OC-9	STM-3	466,56	451,008
STS-12/OC-12	STM-4	622,08	601,344
STS-18/OC-18	STM-6	933,12	902,016
STS-24/OC-24	STM-8	1.244,16	1.202,688
STS-36/OC-36	STM-12	1.866,24	1.804,032
STS-48/OC-48	STM-16	2.488,32	2.405,376
STS-96/OC-96	STM-32	4.976,64	4.810,752
STS-192/OC-192	STM-64	9.953,28	9.621,504

RESUMEN

En este capítulo se han estudiado distintas técnicas de acceso al medio con objeto de maximizar el aprovechamiento de los recursos de canal disponibles. Comenzando con técnicas propias de la capa física, se han introducido los esquemas de multiplexación en el tiempo (TDM) y en frecuencias (FDM). Como técnica de amplio uso en redes móviles se ha mencionado el esquema de multiplexación CDMA, que, junto con el de salto de frecuencias (FH), constituyen las técnicas de espectro expandido.

Frente a la división estática del canal proporcionada generalmente por las técnicas de multiplexación, a continuación se ha abordado el estudio de esquemas de acceso dinámicos, que presentan mejores prestaciones bajo las condiciones de transmisión a ráfagas propias de los entornos de redes de computadores. Se han estudiado así las técnicas de acceso aleatorio basadas en colisión ALOHA y CSMA, así como los esquemas de planificación de reserva y de consulta. A través del análisis de la eficiencia de estos esquemas se ha puesto de manifiesto el mejor comportamiento del primer tipo de técnicas en condiciones de baja carga y, por el contrario, lo adecuado del uso de las técnicas de planificación en situaciones de alta carga.

Como aplicación directa de las técnicas de multiplexación se han comentado los sistemas de transmisión síncrona E-n/T-n y SONET/SDH. La aplicación concreta de las técnicas de contención y de planificación se pospone para el Capítulo 5, momento en que se estudiarán distintos estándares LAN.

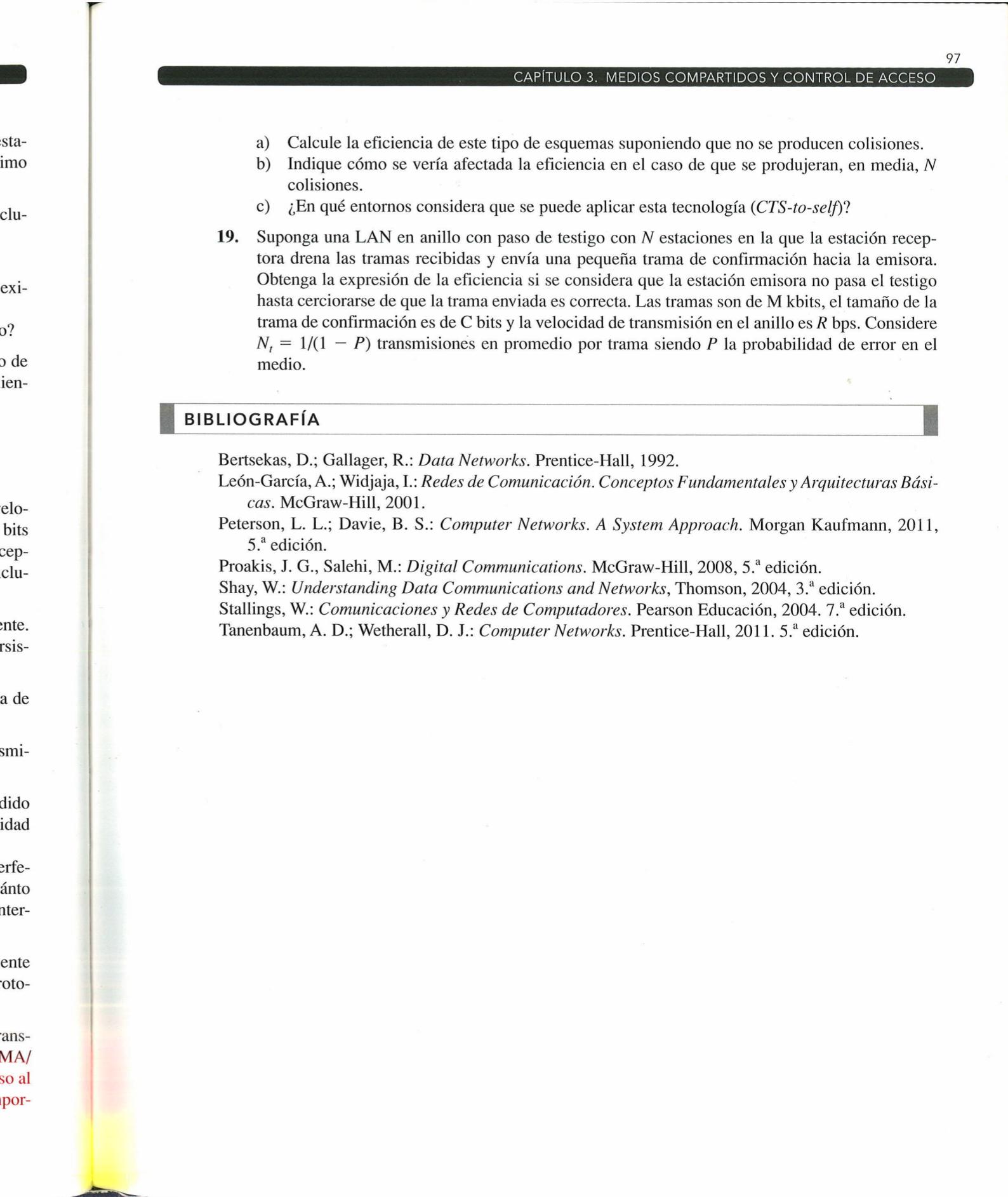
Como última cuestión tratada en el tema se presenta, en forma de apéndice, una breve introducción a la teoría de colas, aspecto que se aborda tras la bibliografía.

EJERCICIOS

1. ¿Por qué se utilizan técnicas de multiplexación en los sistemas de comunicaciones? ¿En qué se diferencian y asemejan las técnicas de multiplexación y las técnicas MAC? Compare ambos tipos de esquemas y explique en qué casos son más indicados los unos y los otros.
2. Se van a multiplexar 24 canales de voz (ancho de banda de 4 kHz) sobre un par trenzado:
 - a) ¿Cuál es el ancho de banda requerido para FDM si no se utilizan bandas de guarda?
 - b) ¿Y si se suponen bandas de guarda de 1 kHz entre canales?

- c) Suponiendo una eficiencia de la codificación de 1 bps/Hz, ¿qué ancho de banda se requiere si se utiliza TDM y se codifica la señal de voz mediante PCM con 8 bits/muestra?
3. Se multiplexan 10 líneas a 9.600 bps haciendo uso de TDM. Ignorando los bits supplementarios, ¿cuál es la capacidad total requerida para TDM síncrona? Suponiendo que deseamos limitar la utilización media de línea a 0,8 y suponiendo que cada línea está ocupada el 50% del tiempo, ¿cuál es la capacidad necesaria en TDM estadística?
4. Dado un canal de 1 Mbps,
 - a) ¿Cuántas fuentes de 8 kbps podemos multiplexar mediante FDM sobre dicho canal si se usa codificación NRZ y bandas de guarda de 100 Hz?
 - b) ¿Cuántas fuentes de 8 kbps podemos multiplexar mediante TDM sobre el canal? Muestre la forma en la que se realiza la transmisión de los bits correspondientes a cada emisor.
 - c) Repita el apartado b) si las fuentes 1 y 2 son de 4 kbps.
 - d) Repita el apartado b) si la fuente 1 es de 16 kbps.
5. Diseñe un sistema de multiplexación en el tiempo que pueda proporcionar servicio a los 1.500 usuarios de voz existentes en una demarcación geográfica, en los casos a) y b) que se indican a continuación. La voz es digitalizada de acuerdo al estándar PCM (8 bits/muestra, frecuencia de muestreo 8 kHz). El porcentaje de usuarios que utilizan simultáneamente el teléfono es, en promedio, del 5% y se desea que la utilización de la línea de salida sea, como máximo, del 70%. Indique, en cada caso, la capacidad de la línea necesaria.
 - a) Solo se va a dar cabida al 5% de los usuarios, es decir, no se consideran situaciones de pico.
 - b) Se incluye la posibilidad de alojar picos de tráfico de hasta el 10% de los usuarios.
6. En un sistema celular se hace uso de la técnica de multiplexación FDM mediante el empleo de 150 frecuencias portadoras distintas. En combinación con FDM se hace uso de la técnica TDM para la multiplexación temporal en ranuras de 500 μ s a razón de 150 bits/ranura, de los cuales 120 bits corresponden a datos y el resto, 30 bits, a delimitación y sincronización. Si cada uno de los canales de datos a multiplexar en el sistema es de 19.200 bps:
 - a) ¿A cuántos canales se le podrá dar servicio de forma simultánea?
 - b) ¿Cuál será la capacidad total del sistema? ¿Y la capacidad útil del mismo?
 - c) Si se utilizan bandas de guarda correspondientes al 25% del ancho de banda de cada canal, ¿cuál es el ancho de banda que necesita el sistema para operar?
7. Se dispone de 32 fuentes de datos que generan caracteres de 8 bits a razón de 8.000 caracteres por segundo. Los datos deben ser transmitidos sobre un par trenzado de 10 km de longitud, disponiéndose de 512 kHz de ancho de banda. La SNR medida es de 30 dB. Diseñe el sistema necesario para possibilitar esa transmisión, teniendo en cuenta que se necesita de un canal adicional de 64 kbps para controlar las transmisiones. Indique todos los parámetros de diseño del sistema y represente gráficamente la solución propuesta.
8. Un emisor desea llevar a cabo el envío de la secuencia de bits 01101011 a un receptor dado, haciendo uso para ello del esquema de espectro expandido CDMA.
 - a) ¿Cuál es el factor de expansión del esquema si se usa como secuencia pseudo-aleatoria 101100011100101011100011?
 - b) ¿Cuál será la secuencia finalmente transmitida?
9. Mil estaciones comparten un canal que usa ALOHA ranurado. En promedio, una estación realiza 20 peticiones/hora y las tramas tienen una duración de 100 μ s. ¿Cuál es el rendimiento o throughput aproximado del canal, S?

10. Un grupo de N estaciones comparte un canal de 56 kbps que utiliza ALOHA puro. Cada estación genera, en promedio, una trama de 1.000 bits cada 100 segundos. ¿Cuál es el valor máximo de N para que el rendimiento no se degrade?
11. Un gran número de estaciones que utilizan ALOHA ranurado generan 120 peticiones/s, incluyendo las peticiones nuevas y las retransmisiones. La duración de las tramas es de 50 ms.
 - a) ¿Cuál es la probabilidad de éxito en el primer intento?
 - b) ¿Cuál es la probabilidad de que se produzcan 10 colisiones antes de una transmisión exitosa?
 - c) ¿Cuál es el número esperado de transmisiones para que una trama sea enviada con éxito?
12. Las medidas realizadas sobre un canal que utiliza ALOHA ranurado con un número infinito de usuarios muestran que el 20% de las ranuras están vacías. Responda razonadamente a las siguientes cuestiones:
 - a) ¿Cuál es la carga G del canal?
 - b) ¿Cuál es el rendimiento?
 - c) ¿Está el canal sobrecargado?
13. Una red de área local que usa CSMA/CD utiliza un cable de 1 km y opera a 10 Mbps. La velocidad de propagación es de 200 m/ μ s. Las tramas de datos son de 256 bits, incluyendo 32 bits de cabecera y otras sobrecargas. Tras una transmisión, se reserva una ranura para que el receptor envíe una trama de confirmación de 48 bits. ¿Cuál es la tasa de transferencia efectiva, excluyendo los bits de sobrecarga, si se supone que no hay colisiones ni errores?
14. Como es conocido, el esquema CSMA p-persistente es más eficiente que el CSMA 1-persistent. Sin embargo, la norma Ethernet en todas sus variantes (Fast, Giga, ...) utiliza CSMA 1-persistent. ¿Por qué?
15. Discuta de forma breve y razonada cómo afecta a la expresión de la eficiencia del esquema de acceso CSMA/CD el hecho de considerar en el medio de transmisión ranuras temporales.
16. Considere un sistema CSMA/CD con N estaciones equidistantes, con una velocidad de transmisión de 10 Mbps y una distancia máxima entre estaciones de 1 km.
 - a) ¿Cuál es el tiempo máximo para enviar una trama de 10.000 bits a otra estación, medido desde el comienzo de la transmisión hasta el final de la recepción? Suponga una velocidad de propagación de 200 m/ μ s.
 - b) Si dos estaciones comienzan a transmitir exactamente al mismo tiempo, sus paquetes interfeirirán entre sí. Si cada estación transmisora monitoriza el bus durante la transmisión, ¿cuánto tiempo tarda, en segundos, en percatarse de la ocurrencia de una interferencia? ¿Y en intervalos de duración de un bit?
17. Los protocolos MAC de contención permiten la aparición de colisiones, con el consiguiente desaprovechamiento de la capacidad del canal. Sin embargo, son más utilizados que los protocolos libres de colisión. ¿Por qué?
18. Considere una red inalámbrica de infraestructura que utiliza CSMA/CA, una velocidad de transmisión de 11 Mbps y un alcance máximo de la emisión de 200 m. El sistema de acceso CSMA/CA se ha configurado de modo que las estaciones no emiten tramas RTS para solicitar acceso al canal, sino simplemente envían una trama CTS que reserva durante un tiempo el canal (comportamiento *CTS-to-self*). En estas condiciones:



- a) Calcule la eficiencia de este tipo de esquemas suponiendo que no se producen colisiones.
 - b) Indique cómo se vería afectada la eficiencia en el caso de que se produjeran, en media, N colisiones.
 - c) ¿En qué entornos considera que se puede aplicar esta tecnología (*CTS-to-self*)?
19. Suponga una LAN en anillo con paso de testigo con N estaciones en la que la estación receptora drena las tramas recibidas y envía una pequeña trama de confirmación hacia la emisora. Obtenga la expresión de la eficiencia si se considera que la estación emisora no pasa el testigo hasta cerciorarse de que la trama enviada es correcta. Las tramas son de M kbits, el tamaño de la trama de confirmación es de C bits y la velocidad de transmisión en el anillo es R bps. Considere $N_t = 1/(1 - P)$ transmisiones en promedio por trama siendo P la probabilidad de error en el medio.

BIBLIOGRAFÍA

- Bertsekas, D.; Gallager, R.: *Data Networks*. Prentice-Hall, 1992.
 León-García, A.; Widjaja, I.: *Redes de Comunicación. Conceptos Fundamentales y Arquitecturas Básicas*. McGraw-Hill, 2001.
 Peterson, L. L.; Davie, B. S.: *Computer Networks. A System Approach*. Morgan Kaufmann, 2011, 5.^a edición.
 Proakis, J. G., Salehi, M.: *Digital Communications*. McGraw-Hill, 2008, 5.^a edición.
 Shay, W.: *Understanding Data Communications and Networks*, Thomson, 2004, 3.^a edición.
 Stallings, W.: *Comunicaciones y Redes de Computadores*. Pearson Educación, 2004. 7.^a edición.
 Tanenbaum, A. D.; Wetherall, D. J.: *Computer Networks*. Prentice-Hall, 2011. 5.^a edición.