

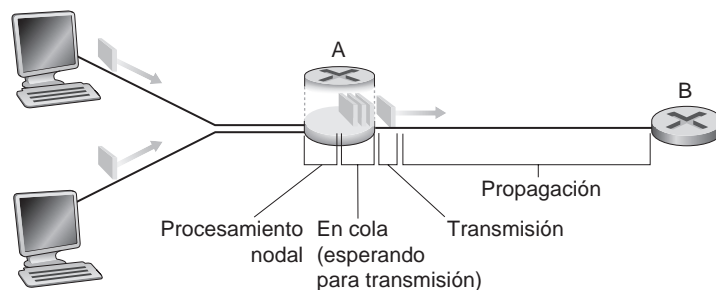
**Figura 1.15** ♦ Interconexión de los ISP.

### 1.4.1 El retardo en las redes de conmutación de paquetes

Recordemos que los paquetes se inician en un host (el origen), atraviesan una serie de routers y terminan su viaje en otro host (el destino). Cuando un paquete viaja de un nodo (host o router) al siguiente nodo (host o router) a lo largo de esa ruta, el paquete sufre varios tipos de retardo *en cada uno* de los nodos de dicha ruta. Los más importantes de estos retardos son: el **retardo de procesamiento nodal**, el **retardo de cola**, el **retardo de transmisión** y el **retardo de propagación**; todos estos retardos se suman para proporcionar el **retardo nodal total**. El rendimiento de muchas aplicaciones de Internet —como las de búsqueda, exploración web, correo electrónico, mapas, mensajería instantánea y voz sobre IP— se ve seriamente afectado por los retardos de red. Para adquirir un conocimiento profundo de la tecnología de conmutación de paquetes y de las redes de computadoras, es preciso comprender la naturaleza e importancia de estos retardos.

#### Tipos de retardo

Utilizaremos la Figura 1.16 para explorar estos retardos. Como parte de la ruta extremo a extremo entre el origen y el destino, un paquete se envía desde el nodo situado aguas arriba a través del router A y hasta el router B. Nuestro objetivo es caracterizar el retardo nodal en el router A. Observe que el router A dispone de un enlace de salida que lleva hasta el router B. Este enlace está precedido por una cola (o *buffer*). Cuando el paquete llega al router A procedente del nodo situado aguas arriba, el router A examina la cabecera del paquete para determinar cuál es el enlace de salida apropiado para el paquete y luego dirige dicho paquete a ese enlace. En este ejemplo, el enlace de salida para el paquete es el enlace que lleva hasta el router B. Un paquete puede transmitirse a



**Figura 1.16** ♦ Retardo nodal en el router A.

través de un enlace solo si actualmente no se está transmitiendo ningún otro paquete a través de él y si no hay otros paquetes que le precedan en la cola; si el enlace está ocupado actualmente o si existen otros paquetes en la cola esperando para ese enlace, entonces el paquete recién llegado tendrá que ponerse a la cola.

### *Retardo de procesamiento*

El tiempo requerido para examinar la cabecera del paquete y determinar dónde hay que enviarlo es parte del **retardo de procesamiento**. El retardo de procesamiento puede también incluir otros factores, como el tiempo necesario para comprobar los errores de nivel de bit del paquete que se hayan producido al transmitir los bits del paquete desde el nodo situado aguas arriba hasta el router A. Los retardos de procesamiento en los routers de alta velocidad suelen ser del orden de los microsegundos o menores. Una vez efectuado el procesamiento nodal, el router dirige el paquete a la cola situada antes del enlace que lleva al router B. (En el Capítulo 4 estudiaremos los detalles acerca de cómo funciona un router.)

### *Retardo de cola*

En la cola, el paquete experimenta un **retardo de cola** mientras espera para ser transmitido a través del enlace. La duración del retardo de cola para un determinado paquete dependerá del número de paquetes que hayan llegado antes a la cola y que estén esperando para ser transmitidos por el enlace. Si la cola está vacía y no se está transmitiendo ningún paquete actualmente, entonces el retardo de cola de nuestro paquete será cero. Por el contrario, si hay mucho tráfico y muchos paquetes están esperando también para ser transmitidos, el retardo de cola será grande. Como veremos en breve, el número de paquetes con que un paquete entrante puede esperar encontrarse es una función de la intensidad y de la naturaleza del tráfico que llega a la cola. En la práctica, los retardos de cola pueden ser del orden de microsegundos a milisegundos.

### *Retardo de transmisión*

Suponiendo que los paquetes se transmiten de manera que el primero que llega es el primero que sale, como suele ser común en las redes de conmutación de paquetes, nuestro paquete solo puede ser transmitido después de que todos los paquetes que hayan llegado antes que él hayan sido transmitidos. Sea la longitud del paquete igual a  $L$  bits y la velocidad de transmisión del enlace del router A hasta el router B igual a  $R$  bits/segundo. Por ejemplo, para un enlace Ethernet a 10 Mbps, la velocidad es  $R = 10$  Mbps; para un enlace Ethernet a 100 Mbps, la velocidad será  $R = 100$  Mbps. El **retardo de transmisión** será igual a  $L/R$ . Este es el tiempo necesario para introducir (es decir, transmitir) todos los bits del paquete en el enlace. Normalmente, en la práctica, los retardos de transmisión son del orden de microsegundos a milisegundos.

### *Retardo de propagación*

Una vez que un bit ha entrado en el enlace, tiene que propagarse hasta el router B. El tiempo necesario para propagarse desde el principio del enlace hasta el router B es el **retardo de propagación**. El bit se propaga a la velocidad de propagación del enlace, que depende del medio físico del enlace (es decir, de que el medio sea fibra óptica, cable de cobre de par trenzado, etc.) y está comprendido en el rango entre

$$2 \cdot 10^8 \text{ m/s y } 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

que es igual, o ligeramente inferior, a la velocidad de la luz. El retardo de propagación es igual a la distancia entre dos routers dividida por la velocidad de propagación. Es decir, el retardo de

propagación es igual a  $d/s$ , donde  $d$  es la distancia entre el router A y el router B y  $s$  es la velocidad de propagación del enlace. Una vez que el último bit del paquete se ha propagado hasta el nodo B, este y todos los bits anteriores del paquete se almacenan en el router B. A continuación, el proceso continúa, encargándose el router B de llevar a cabo el reenvío. En las redes de área extensa, los retardos de propagación son del orden de milisegundos.



Nota de video

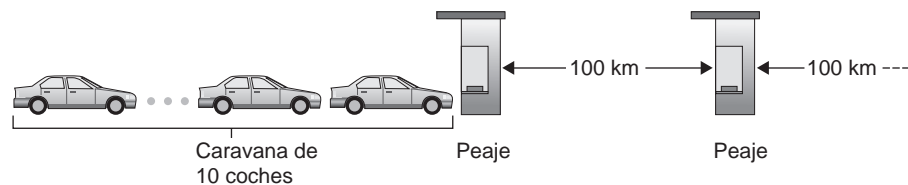
Exploración de los retardos de propagación y transmisión

### Comparación de los retardos de transmisión y de propagación

Los recién llegados al campo de las redes de computadoras en ocasiones tienen dificultades para comprender la diferencia entre el retardo de transmisión y el de propagación. Esta diferencia es sutil, pero importante. El retardo de transmisión es la cantidad de tiempo necesario para que el router saque fuera el paquete; es una función de la longitud del paquete y de la velocidad de transmisión del enlace, pero no tiene nada que ver con la distancia existente entre los dos routers. Por el contrario, el retardo de propagación es el tiempo que tarda un bit en propagarse de un router al siguiente; es una función de la distancia entre los dos routers, pero no tiene nada que ver con la longitud del paquete ni con la velocidad de transmisión del enlace.

Veamos una analogía que nos va a permitir clarificar los conceptos de retardo de transmisión y de retardo de propagación. Imagine una autopista en la que hay un puesto de peaje cada 100 kilómetros, como se muestra en la Figura 1.17. Podemos imaginar que los segmentos de autopista entre peajes son los enlaces y las casetas de peaje son los routers. Suponga que los automóviles viajan (es decir, se propagan) por la autopista a una velocidad de 100 km/hora (es decir, cuando un coche sale de un peaje, instantáneamente acelera hasta adquirir la velocidad de 100 km/hora y la mantiene entre puestos de peaje sucesivos). Supongamos ahora que hay 10 coches que viajan en caravana unos detrás de otros en un orden fijo. Podemos pensar que cada coche es un bit y que la caravana es un paquete. Supongamos también que cada puesto de peaje da servicio (es decir, transmite) a los coches a una velocidad de un coche cada 12 segundos y que es tarde por la noche, por lo que en la autopista solo se encuentra nuestra caravana de coches. Por último, supongamos que cuando el primer coche de la caravana llega a un peaje, espera en la entrada hasta que los otros nueve coches han llegado y se han detenido detrás de él (es decir, la caravana completa tiene que almacenarse en el peaje antes de poder ser reenviada). El tiempo necesario para que el peaje deje pasar a la caravana completa hacia el siguiente tramo de autopista es igual a  $(10 \text{ coches}) / (5 \text{ coches/minuto}) = 2 \text{ minutos}$ . Este tiempo es análogo al retardo de transmisión de un router. El tiempo necesario para que un coche se desplace desde la salida del peaje hasta el siguiente puesto de peaje es  $100 \text{ km} / (100 \text{ km/hora}) = 1 \text{ hora}$ . Este tiempo es análogo al retardo de propagación. Por tanto, el tiempo que transcurre desde que la caravana queda colocada delante de un peaje hasta que vuelve a quedar colocada delante del siguiente peaje es la suma del tiempo de transmisión y el tiempo de propagación (en este caso, dicho tiempo será igual a 62 minutos).

Profundicemos un poco más en esta analogía. ¿Qué ocurriría si el tiempo de servicio del puesto de peaje para una caravana fuera mayor que el tiempo que tarda un coche en viajar de un peaje al siguiente? Por ejemplo, supongamos que los coches viajan a una velocidad de 1.000 km/hora y que los peajes operan a una velocidad de un coche por minuto. Entonces, el retardo correspondiente al hecho de desplazarse entre dos puestos de peaje será de 6 minutos y el tiempo que tarda el puesto de peaje en dar servicio a una caravana será de 10 minutos. En este caso, los primeros coches de la



**Figura 1.17** ♦ Analogía de la caravana.

caravana llegarán al segundo puesto de peaje antes de que los últimos coches de la caravana hayan salido del primer peaje. Esta situación también se produce en las redes de conmutación de paquetes: los primeros bits de un paquete pueden llegar a un router mientras que muchos de los bits restantes del paquete todavía están esperando a ser transmitidos por el router anterior.

Si una imagen vale más que mil palabras, entonces una animación vale más que un millón de palabras. En el sitio web de este libro de texto se proporciona un applet Java interactivo que ilustra y compara convenientemente los retardos de transmisión y de propagación. Animamos a los lectores a visitar este applet. [Smith 2009] también proporciona una explicación bastante comprensible de los retardos de propagación, de cola y de transmisión.

Sean  $d_{\text{proc}}$ ,  $d_{\text{cola}}$ ,  $d_{\text{trans}}$  y  $d_{\text{prop}}$  los retardos de procesamiento, de cola, de transmisión y de propagación, respectivamente. Entonces el retardo nodal total estará dado por:

$$d_{\text{nodal}} = d_{\text{proc}} + d_{\text{cola}} + d_{\text{trans}} + d_{\text{prop}}$$

Las contribuciones de estos componentes de retardo pueden variar significativamente. Por ejemplo,  $d_{\text{prop}}$  puede ser despreciable (digamos que un par de microsegundos) para un enlace que conecte dos routers del mismo campus universitario; sin embargo,  $d_{\text{prop}}$  será de cientos de milisegundos para dos routers interconectados mediante un enlace vía satélite geoestacionario y puede llegar a ser el término dominante en  $d_{\text{nodal}}$ . Del mismo modo,  $d_{\text{trans}}$  puede ser despreciable o significativo. Su contribución normalmente es despreciable para velocidades de transmisión de 10 Mbps y superiores (por ejemplo, para las redes LAN); sin embargo, puede ser igual a cientos de milisegundos para paquetes grandes de Internet enviados a través de enlaces de acceso telefónico que usen modems de baja velocidad. El retardo de procesamiento,  $d_{\text{proc}}$ , suele ser despreciable; sin embargo, tiene una gran influencia sobre la tasa de transferencia máxima del router, que es la velocidad máxima a la que un router puede reenviar los paquetes.

### 1.4.2 Retardo de cola y pérdida de paquetes

El componente más complejo e interesante del retardo nodal es el retardo de cola,  $d_{\text{cola}}$ . De hecho, el retardo de cola es tan importante e interesante en las redes de computadoras que se han escrito miles de artículos y numerosos libros sobre él [Bertsekas 1991; Daigle 1991; Kleinrock 1975, Kleinrock 1976; Ross 1995]. Aquí solo vamos a abordarlo de forma intuitiva y panorámica; los lectores más curiosos pueden echar un vistazo a algunos de los libros que se ocupan de este tema (¡o incluso pueden escribir una tesis doctoral sobre el asunto!). A diferencia de los otros tres retardos ( $d_{\text{proc}}$ ,  $d_{\text{trans}}$  y  $d_{\text{prop}}$ ), el retardo de cola puede variar de un paquete a otro. Por ejemplo, si llegan 10 paquetes a una cola vacía al mismo tiempo, el primer paquete transmitido no sufrirá retardo de cola, mientras que el último paquete transmitido sufrirá un retardo de cola relativamente largo (mientras espera a que los restantes nueve paquetes sean transmitidos). Por tanto, al caracterizar el retardo de cola, suelen emplearse medidas estadísticas, como el retardo medio de cola, la varianza del retardo de cola y la probabilidad de que el retardo de cola exceda un cierto valor especificado.

¿En qué casos el retardo de cola es grande y en qué casos es insignificante? La respuesta a esta pregunta depende de la velocidad a la que llega el tráfico a la cola, de la velocidad de transmisión del enlace y de la naturaleza del tráfico entrante, es decir, de si el tráfico llega periódicamente o a ráfagas. Vamos a profundizar en este punto. Sea  $a$  la velocidad media a la que llegan los paquetes a la cola ( $a$  se expresa en paquetes/segundo). Recuerde que  $R$  es la velocidad de transmisión; es decir, es la velocidad (en bits/segundo) a la que los bits salen de la cola. Con el fin de simplificar, supongamos también que todos los paquetes constan de  $L$  bits. Entonces, la velocidad media a la que llegan los bits a la cola es igual a  $La$  bits/segundo. Supongamos por último que la cola es muy grande, por lo que podemos decir que puede almacenar un número infinito de bits. El cociente  $La/R$ , denominado **intensidad de tráfico**, suele desempeñar un papel importante a la hora de estimar la magnitud del retardo de cola. Si  $La/R > 1$ , entonces la velocidad media a la que los bits llegan a la cola excede la velocidad a la que los bits pueden ser transmitidos desde la cola. En esta desafortunada situación, la cola tenderá a aumentar sin límite ¡y el retardo de cola se aproximará a infinito! Por tanto, una de las