

William Stallings

Comunicaciones y Redes de Computadores

Capítulo 10

Conmutación de paquetes

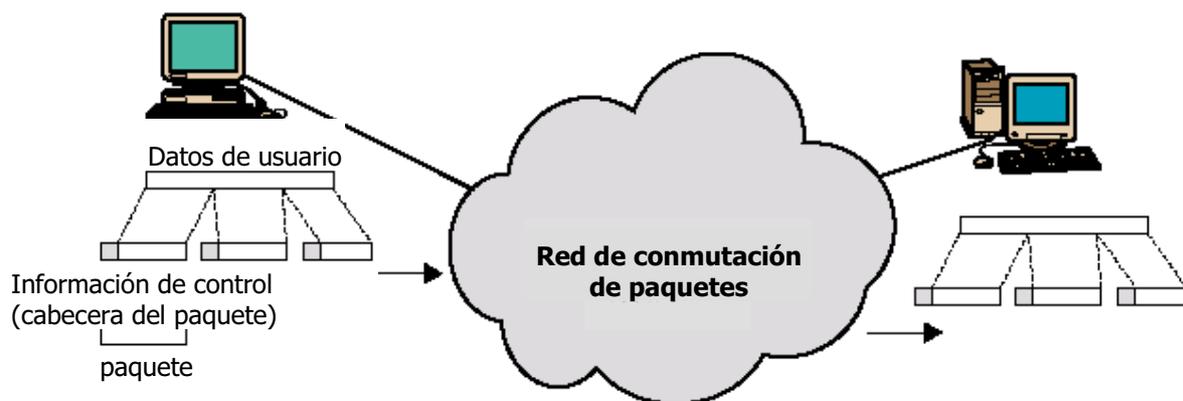
Principios

- Conmutación de circuitos diseñados para el tráfico de voz:
 - Se dedican recursos internos de la red a una llamada particular.
 - La línea está desocupada la mayor parte del tiempo.
 - Se fija una velocidad de datos constante.
 - ┆ Los dos dispositivos conectados deben transmitir y recibir a la misma velocidad.

Operación básica

- Datos transmitidos en paquetes cortos:
 - Normalmente de 1.000 octetos.
 - Los mensajes de mayor longitud se segmentan en una serie de paquetes.
 - Cada paquete contiene una parte de los datos del usuario, más cierta información de control.
- Información de control:
 - Comprende la información que necesita la red para encaminar el paquete a través de ella.
- Los paquetes se reciben, almacenan temporalmente y se envían al siguiente nodo:
 - Almacenamiento y envío.

Uso de paquetes



Ventajas

- **Eficiencia de la línea:**
 - Un único enlace entre dos nodos se puede compartir dinámicamente en el tiempo por varios paquetes.
 - Los paquetes en cola se transmiten lo más rápido posible.
- **Conversión en la velocidad de los datos:**
 - Cada estación se conecta a su nodo con su propia velocidad.
 - Los nodos almacenan los datos, si es necesario igualar velocidades.
- **Los paquetes siguen aceptándose, cuando la red está sobrecargada:**
 - Sin embargo, aumenta el retardo en la transmisión.
- **Se puede hacer uso de prioridades.**

Técnica de conmutación

- **La estación fragmenta los mensajes de longitud superior en paquetes.**
- **Los paquetes se envían, de uno en uno, a la red.**
- **Dos aproximaciones utilizadas en las redes actuales:**
 - **Datagramas.**
 - **Circuitos virtuales.**

Técnica de datagrama

- Cada paquete se trata de forma independiente.
- No todos los paquetes siguen la misma ruta.
- Es posible que los paquetes se reciban en distinto orden al que se enviaron.
- Puede que un paquete se pierda en la red.
- La estación receptora ha de reordenar y recuperar los paquetes perdidos.

Técnica de circuito virtual

- Establece una ruta previa al envío de los paquetes.
- Los paquetes Petición de Llamada y Llamada Aceptada establecen conexión.
- Cada paquete contiene un identificador de circuito virtual en lugar de una dirección de destino.
- No precisa la toma de decisiones de encaminamiento para cada paquete.
- Se finaliza la conexión con un paquete de Petición de Liberación.
- No se utilizan rutas dedicadas para la transferencia de datos.

Diferencias entre ambas técnicas

■ Circuito virtual:

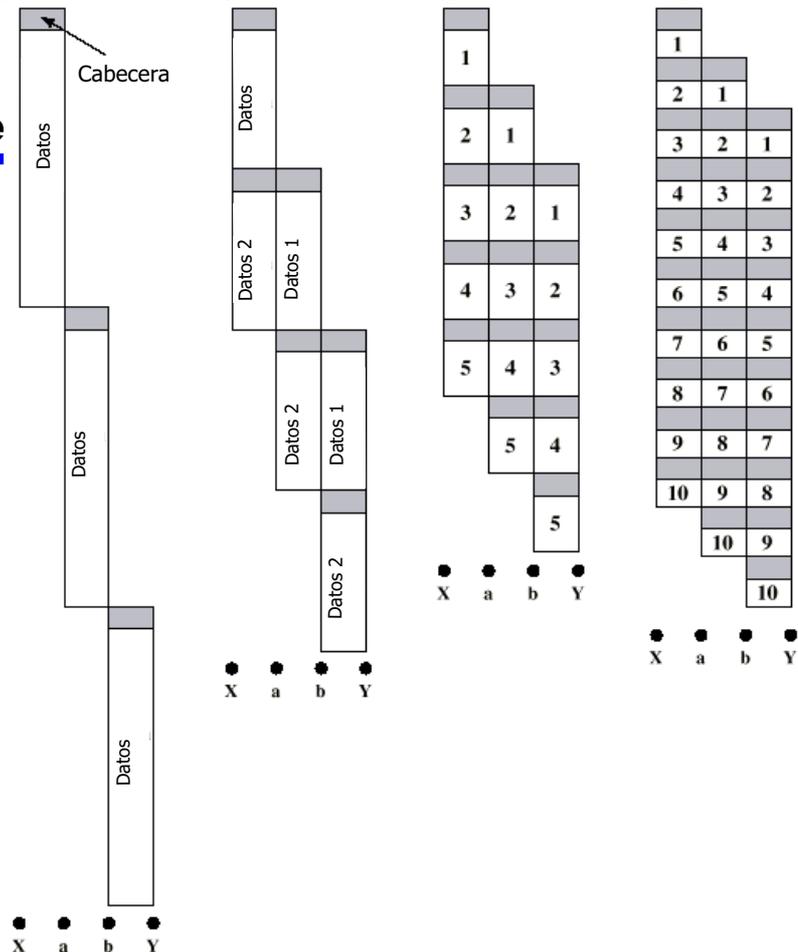
- La red ofrece servicios como el orden secuencial y el control de errores.
- Los paquetes viajan por la red más rápidamente:
 - ┆ No se precisa definir la ruta.
- Menor seguridad:
 - ┆ Si un nodo falla, se perderán todos los circuitos virtuales que atraviesan ese nodo.

■ Datagrama:

- No existe la fase de establecimiento de llamada:
 - ┆ Cuanto menos paquetes se envíen, mejor.
- Mayor flexibilidad:
 - ┆ Los paquetes pueden encaminarse hacia rutas lejanas para evitar las congestiones de la red.

Tamaño de paquete

(a) Mensaje de 1 paquete (b) Mensaje de 2 paquetes (c) Mensaje de 5 paquetes (d) Mensaje de 10 paquetes

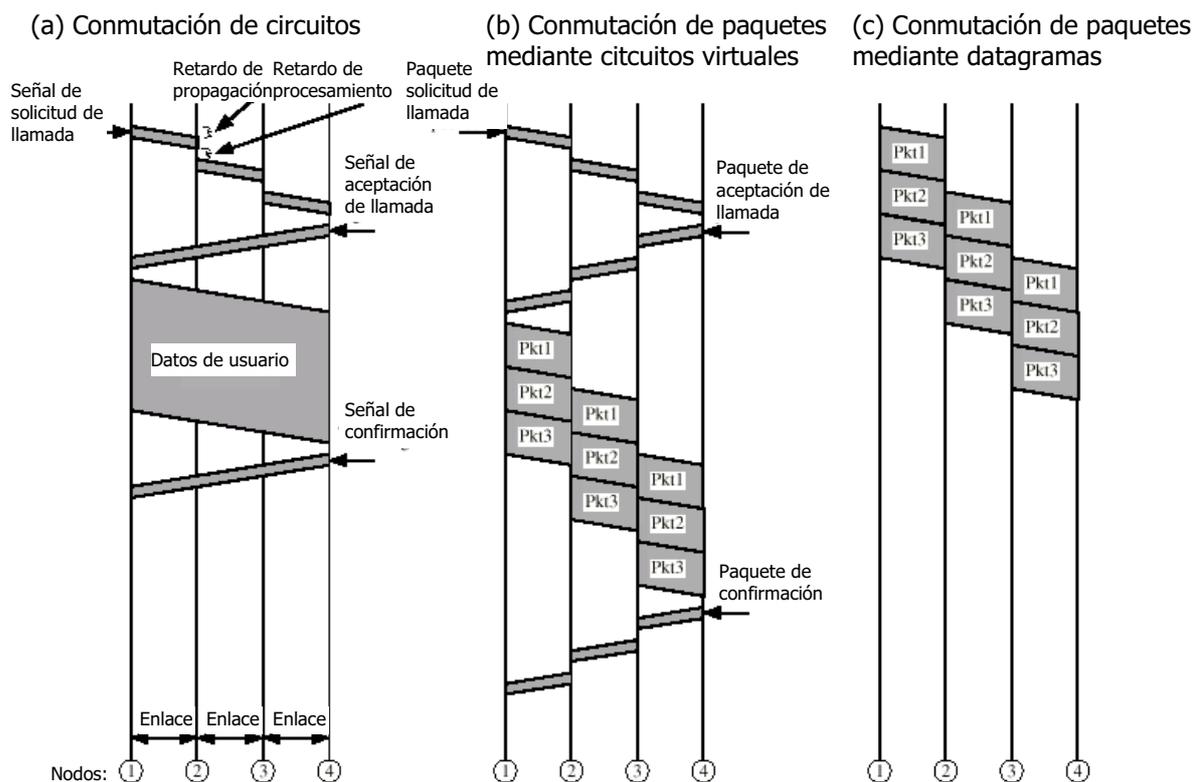


Comparación de las técnicas de conmutación de circuitos y de paquetes

■ Prestaciones:

- Retardo de propagación.
- Tiempo de transmisión.
- Retardo de nodo.

Eventos temporales



Funcionamiento externo e interno

- La red de conmutación de paquetes puede utilizar datagramas o circuitos virtuales.
- En la interfaz entre una estación y un nodo de red, la red puede ofrecer un servicio:
 - Orientado a la conexión:
 - ┆ La estación establece una conexión lógica (circuito virtual).
 - ┆ Todos los paquetes enviados hacia la red se identifican como pertenecientes a una conexión lógica dada y se numeran secuencialmente.
 - ┆ La red envía los paquetes en este orden.
 - ┆ Servicio de circuito virtual externo:
 - Ejemplo: X.25
 - ┆ Distinto del concepto de operación de circuito virtual interno.
 - No orientado a la conexión:
 - ┆ Gestión independiente de paquetes.
 - ┆ Servicio de datagrama externo.
 - ┆ Distinto del concepto de operación de datagrama interno.

Combinaciones

- Circuito virtual externo, circuito virtual interno:
 - ┆ Ruta dedicada a través de la red.
- Circuito virtual externo, datagrama interno:
 - ┆ La red gestiona cada paquete de forma independiente.
 - ┆ Paquetes distintos correspondientes a un mismo circuito virtual externo pueden seguir rutas diferentes.
 - ┆ La red almacena los paquetes en el nodo de destino para reordenarlos.

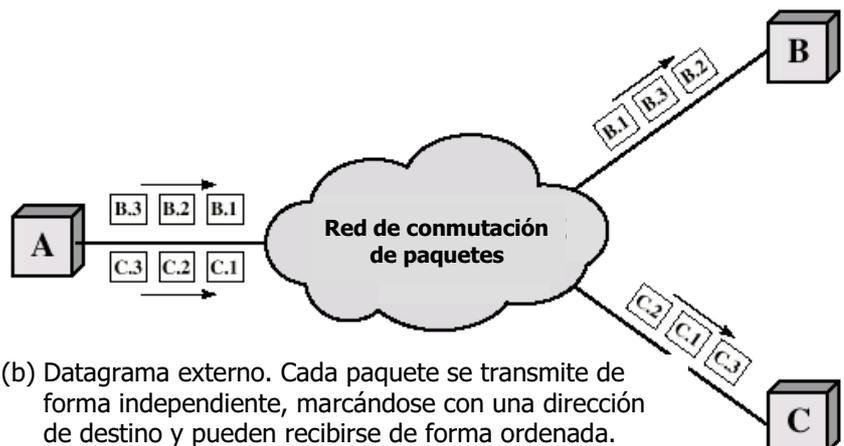
Combinaciones

- Datagrama externo, datagrama interno:
 - Los paquetes se tratan de forma independiente desde el punto de vista del usuario y del de la red.
- Datagrama externo, circuito virtual interno:
 - El usuario externo no ve conexión alguna.
 - El usuario externo envía los paquetes a lo largo del tiempo.
 - La red establece conexiones lógicas.

Operación de circuito virtual y de datagrama externos

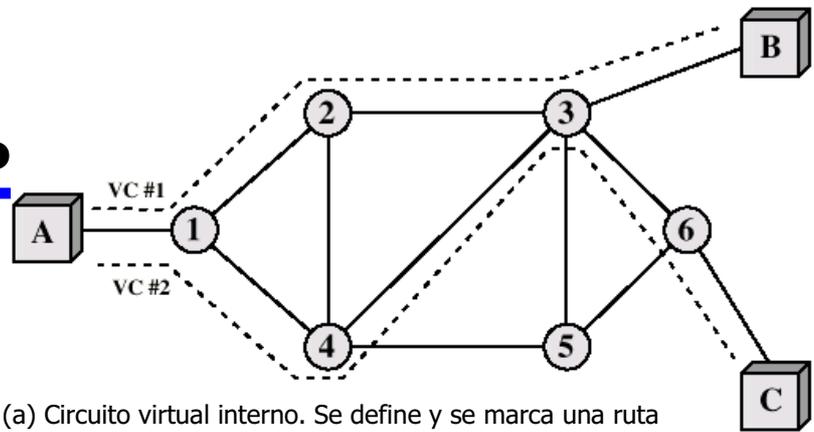


(a) Circuito virtual externo. Se establece una conexión lógica entre dos estaciones. Los paquetes se marcan con un número de circuito virtual y uno de secuencia. Los paquetes se reciben en orden.

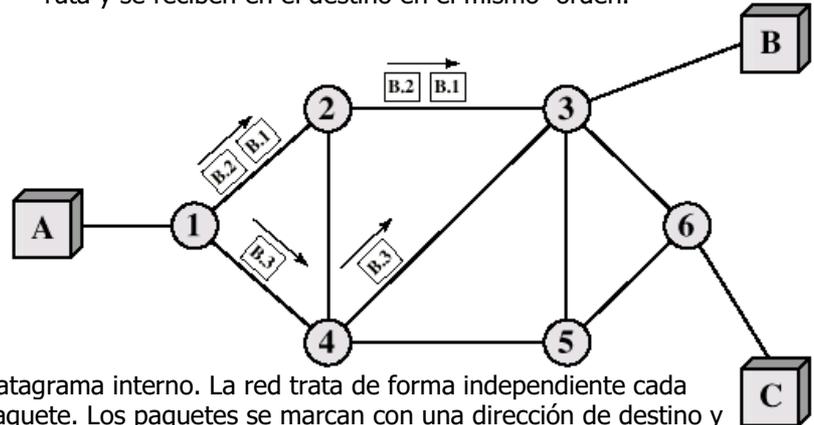


(b) Datagrama externo. Cada paquete se transmite de forma independiente, marcándose con una dirección de destino y pueden recibirse de forma ordenada.

Operación de circuito virtual y datagrama interno



(a) Circuito virtual interno. Se define y se marca una ruta para los paquetes entre dos estaciones. Todos los paquetes de dicho circuito virtual siguen la misma ruta y se reciben en el destino en el mismo orden.



(b) Datagrama interno. La red trata de forma independiente cada paquete. Los paquetes se marcan con una dirección de destino y pueden recibirse desordenadamente en el nodo de destino.

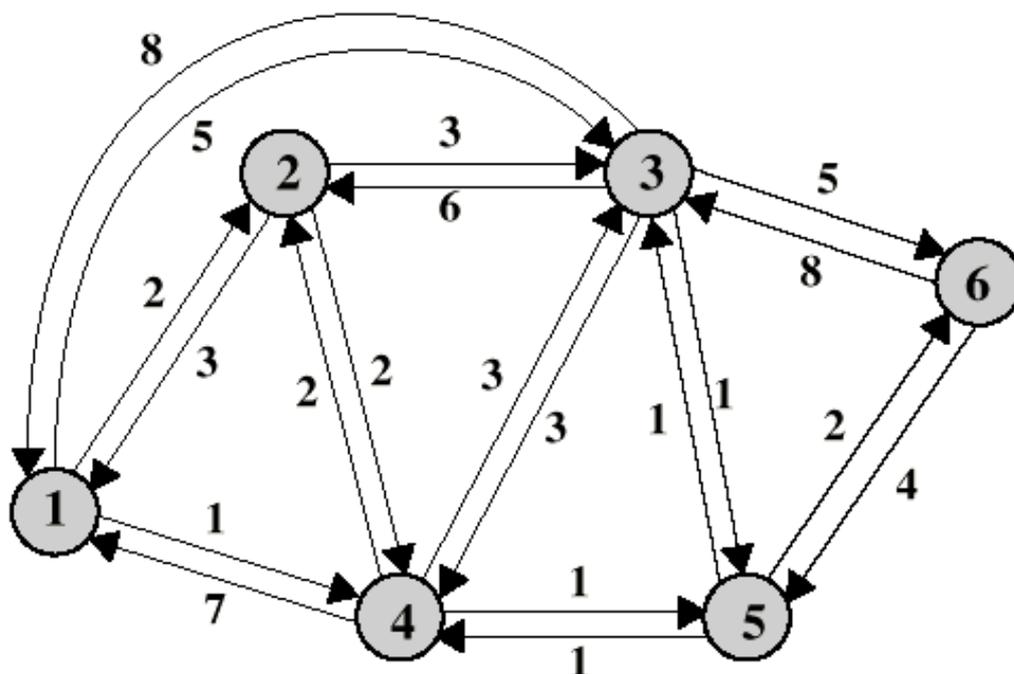
Encaminamiento

- Aspecto complejo y crucial del diseño de redes de conmutación de paquetes.
- Características requeridas:
 - Exactitud.
 - Simplicidad.
 - Robustez.
 - Estabilidad.
 - Imparcialidad.
 - Optimización.
 - Eficiencia.

Criterios de funcionamiento

- Elección del camino con:
 - menor número de saltos.
 - menor coste.
 - Véase el Apéndice 10A de su libro de texto para la descripción de varios algoritmos de mínimo coste.

Coste de las rutas



Instante y lugar de decisión

- Instante de decisión:
 - Basada en un paquete o en un circuito temporal.
- Lugar de decisión:
 - Encaminamiento distribuido:
 - Realizado por cada nodo.
 - Encaminamiento centralizado.
 - Encaminamiento de origen.

Fuente de información de la red y tiempo de actualización

- Las decisiones de encaminamiento están basadas en el conocimiento de la red, pero esto no siempre es así.
- Encaminamiento distribuido:
 - Los nodos utilizan la información local.
 - Pueden utilizar información de los nodos adyacentes.
 - Pueden obtener información de todos los nodos de una ruta potencial.
- Encaminamiento centralizado:
 - El nodo central utiliza información procedente de todos los nodos.
- Tiempo de actualización:
 - Si los nodos proporcionan la información de la red, entonces se da un tiempo de actualización.
 - Cuando la información es estática, no se actualiza nunca.
 - Cuando la información es adaptable, actualización periódica.

Estrategias de encaminamiento

- Encaminamiento estático.
- Inundaciones.
- Encaminamiento aleatorio.
- Encaminamiento adaptable.

Encaminamiento estático

- Una única y permanente ruta para cada par de nodos origen-destino.
- Determina las rutas utilizando algoritmos de encaminamiento de mínimo coste (descrito en el Apéndice 10A).
- Rutas fijas, al menos hasta que ocurra un cambio en la topología de la red.

Tablas de encaminamiento estático

MATRIZ DE ENCAMINAMIENTO CENTRAL

		Nodo origen					
		1	2	3	4	5	6
Nodo destino	1	—	1	5	2	4	5
	2	2	—	5	2	4	5
	3	4	3	—	5	3	5
	4	4	4	5	—	4	5
	5	4	4	5	5	—	5
	6	4	4	5	5	6	—

Tabla del nodo 1

Destino	Nodo siguiente
2	2
3	4
4	4
5	4
6	4

Tabla del nodo 2

Destino	Nodo siguiente
1	1
3	3
4	4
5	4
6	4

Tabla del nodo 3

Destino	Nodo siguiente
1	5
2	5
4	5
5	5
6	5

Tabla del nodo 4

Destino	Nodo siguiente
1	2
2	2
3	5
5	5
6	5

Tabla del nodo 5

Destino	Nodo siguiente
1	4
2	4
3	3
4	4
6	6

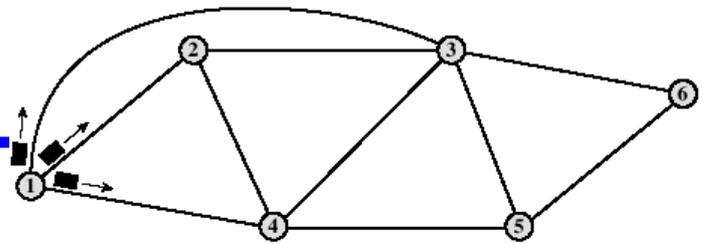
Tabla del nodo 6

Destino	Nodo siguiente
1	5
2	5
3	5
4	5
5	5

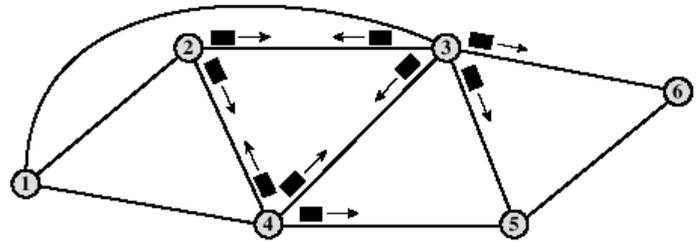
Inundaciones

- No precisa de ninguna información sobre la red.
- El nodo envía un paquete a todos sus nodos vecinos.
- A su vez, este paquete se envía sobre todos los enlaces excepto por el que llegó.
- Eventualmente se recibirán varias copias en el nodo de destino.
- Cada paquete contiene un identificador único para descartar los duplicados.
- Los nodos recuerdan la identidad de los paquetes retransmitidos con anterioridad para delimitar el tráfico de la red.
- Se puede incluir un contador de saltos en cada paquete.

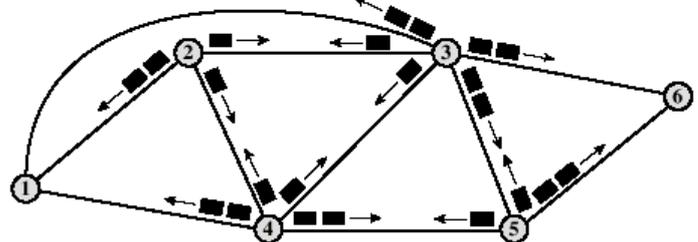
Ejemplo de inundaciones



(a) Primer salto



(b) Segundo salto



(c) Tercer salto

Propiedades de la técnica de inundaciones

- Se prueban todos los posibles caminos:
 - Muy resistente.
- Al menos una copia del paquete a recibir en el destino habrá usado una ruta de menor número de saltos:
 - Puede emplearse para establecer la ruta para un circuito virtual.
- Se visitan todos los nodos:
 - Útil para para la propagación de información (por ejemplo: el encaminamiento).

Encaminamiento aleatorio

- Un nodo selecciona un único camino de salida para retransmitir un paquete entrante.
- La selección puede ser aleatoria o de forma alternada.
- La selección del camino de salida se puede realizar por medio del cálculo de probabilidades.
- El uso de información sobre la red no es necesario.
- La ruta no corresponde en general, ni con la de mínimo coste, ni con la de menor número de saltos.

Encaminamiento adaptable

- Utilizado en casi todas las redes de conmutación de paquetes.
- Las decisiones de encaminamiento cambian a medida que lo hacen las condiciones de la red:
 - Fallos.
 - Congestión.
- Requiere información sobre el estado de la red.
- Las decisiones son más complejas.
- Compromiso entre la calidad de la información sobre la red y la cantidad de datos suplementarios.
- Si reacciona demasiado rápido, puede provocar oscilaciones.
- También puede reaccionar en el sentido contrario, y resultar irrelevante.

Ventajas del encaminamiento adaptable

- Prestaciones mejoradas.
- Ayuda en el control de la congestión (véase Capítulo 12).
- Sistema complejo:
 - Puede que no cumpla los supuestos beneficios.

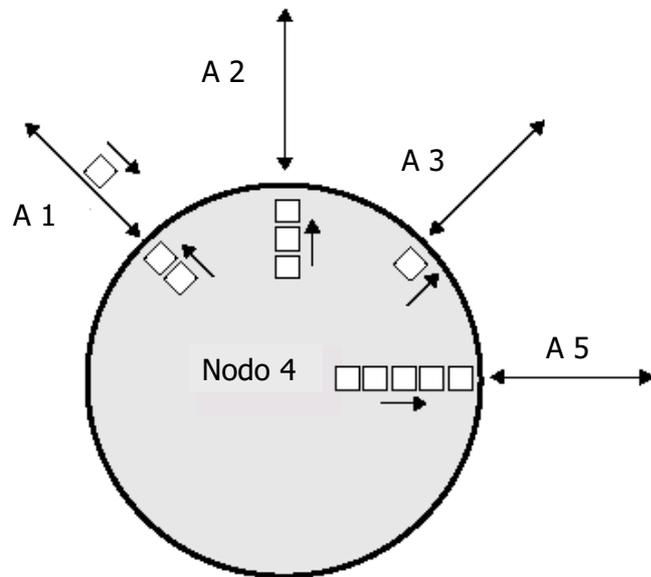
Clasificación

- Estrategias basadas en la fuente de información:
 - Local (aislado):
 - Cada nodo encamina cada paquete recibido por la línea de salida cuya cola asociada sea menor.
 - Puede incluir un peso para cada destino.
 - Usados rara vez: no explotan con facilidad la información disponible.
 - Procedente de los nodos adyacentes.
 - Procedente de todos los nodos.

Encaminamiento adaptable aislado

Tabla de pesos del nodo 4 para el destino 6

Nodo siguiente	Retardo
1	9
2	6
3	3
5	0



Estrategias de encaminamiento ARPANET

■ Primera generación:

- Diseñado en 1969.
- Algoritmo adaptable distribuido.
- Retardo estimado como criterio de funcionamiento.
- Algoritmo Bellman-Ford (véase Apéndice 10A).
- Cada nodo intercambia su vector de retardo con todos sus vecinos.
- Actualización de la tabla de encaminamiento basada en la información que llega.
- No tiene en cuenta la velocidad de la línea, sino la longitud de la cola.
- La longitud de cola no hace una buena estimación del retardo.
- Responde lentamente ante la congestión.

Estrategias de encaminamiento ARPANET

- Segunda generación:
 - El original se reemplazó en 1979.
 - Utiliza el retardo como criterio de funcionamiento.
 - El retardo se mide directamente.
 - Utiliza el algoritmo de Dijkstra (véase Apéndice 10A).
 - Funciona bien en condiciones de cargas pequeñas y moderadas.
 - Ante cargas altas, la correlación entre los retardos estimados y los realmente experimentados es muy pequeña.

Estrategias de encaminamiento ARPANET

- Tercera generación:
 - El algoritmo fue revisado en 1987.
 - Cambio de la función que determina el coste de los enlaces.
 - Medida del retardo medio en los últimos 10 segundos.
 - Normalización basada en el valor real y en los resultados anteriores.

X.25

- Aprobado en 1976.
- Interfaz entre una estación y una red de conmutación de paquetes.
- Utilizado casi mundialmente para interaccionar con redes de conmutación de paquetes, así como en conmutación de paquetes en RDSI.
- Especifica tres capas de protocolos:
 - Capa física.
 - Capa de enlace.
 - Capa de paquete.

Capa física de X.25

- Interfaz entre una estación y el enlace que la conecta con un nodo.
- Máquina de usuario: equipo terminal de datos (DTE, data terminal equipment).
- Nodo: equipo terminal del circuito de datos (DCE, data circuit-terminating equipment).
- Hace uso de la especificación de la capa física X.21.
- Transferencia fiable de datos a través del enlace físico.
- Secuencia de tramas.

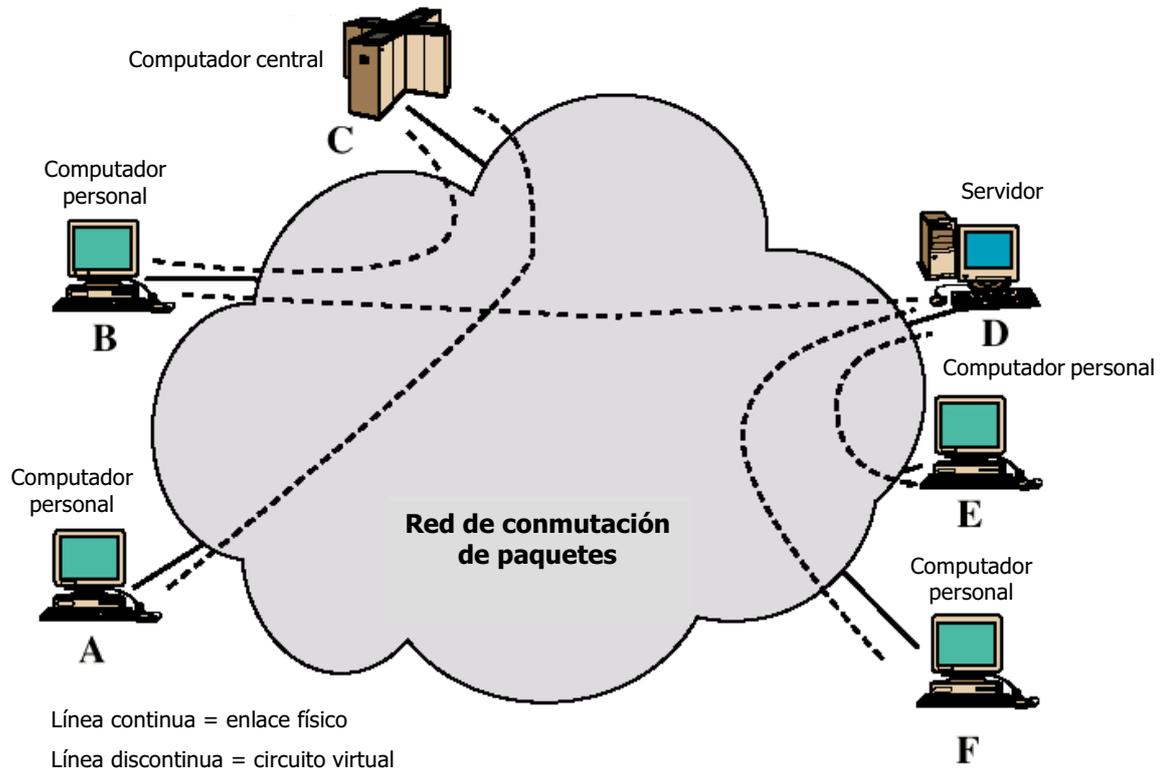
Capa de enlace de X.25

- Protocolo equilibrado de acceso al enlace (LAPB, Link Access Protocol Balanced):
 - Subproducto del protocolo HDLC.
 - Véase el Capítulo 7.

Capa de paquete de X.25

- Circuitos virtuales externos.
- Conexiones lógicas (circuitos virtuales) entre los abonados.

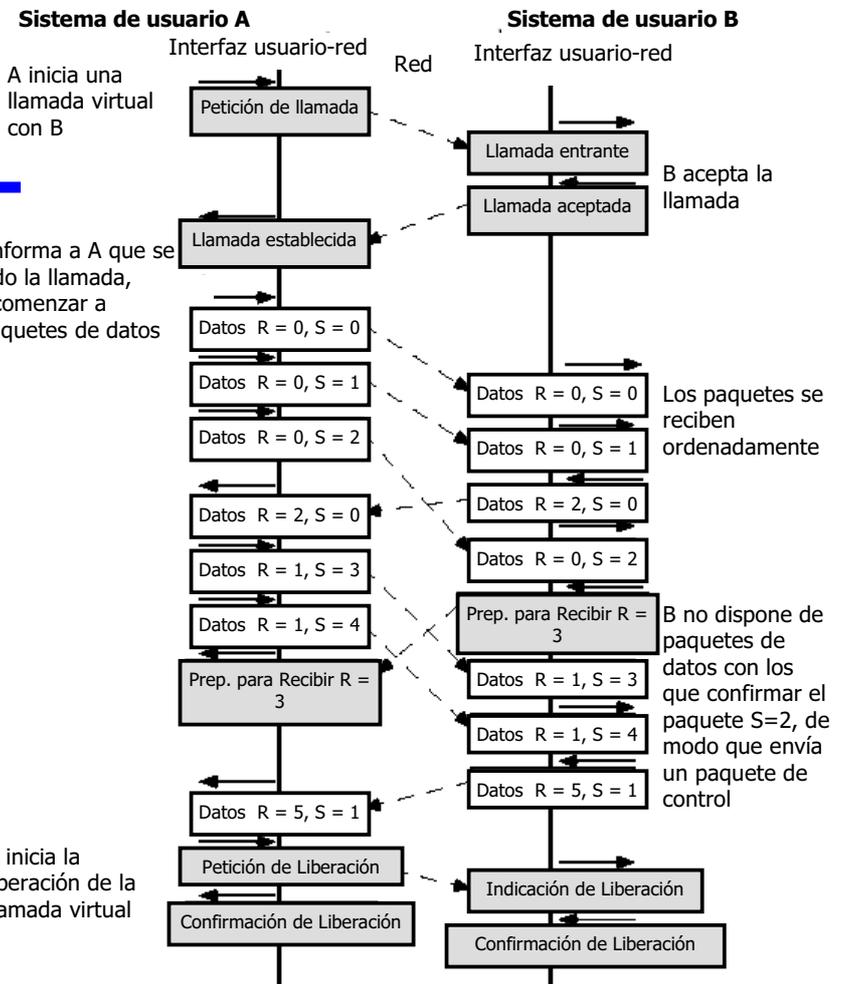
Utilización de circuitos virtuales



Servicio de circuito virtual

- Llamada virtual:
 - Establecida dinámicamente.
- Circuito virtual permanente:
 - Circuito virtual fijo asignado en la red.

Llamada virtual



Formatos de paquete en X.25

Q	D	0	1	Número de grupo
Número de canal				
P(R)		M	P(S)	
Datos de usuario				

(a) Paquete de datos con números de secuencia de 3 bits

Q	D	1	0	Número de grupo
Número de canal				
P(S)		0		
P(R)		M		
Datos de usuario				

(d) Paquete de datos con números de secuencia de 7 bits

0	0	1	1	0	0	0	0
Q	D	1	1	Número de grupo			
Número de canal							
P(S)- parte baja				0			
P(S)- parte alta							
P(R)- parte baja				M			
P(R)- parte alta							
Datos de usuario							

(g) Paquete de datos con números de secuencia de 15 bits

X	0	0	1	Número de grupo
Número de canal				
Tipo de paquete		1		
Información adicional				

(b) Paquete de control para llamadas virtuales con números de secuencia de 3 bits

X	0	1	0	Número de grupo
Número de canal				
Tipo de paquete		1		
Información adicional				

(e) Paquete de control para llamadas virtuales con números de secuencia de 7 bits

0	0	1	1	0	0	0	0
X	0	1	1	Número de grupo			
Número de canal							
Tipo de paquete		1					
Información adicional							

(h) Paquete de control para llamadas virtuales con números de secuencia de 15 bits

0	0	0	1	Número de grupo
Número de canal				
P(R)		Tipo de paquete		
1				

(c) Paquetes RR, RNR y REJ con números de secuencia de 3 bits

0	0	1	0	Número de grupo
Número de canal				
Tipo de paquete		1		
P(R)		0		

(f) Paquetes RR, RNR y REJ con números de secuencia de 7 bits

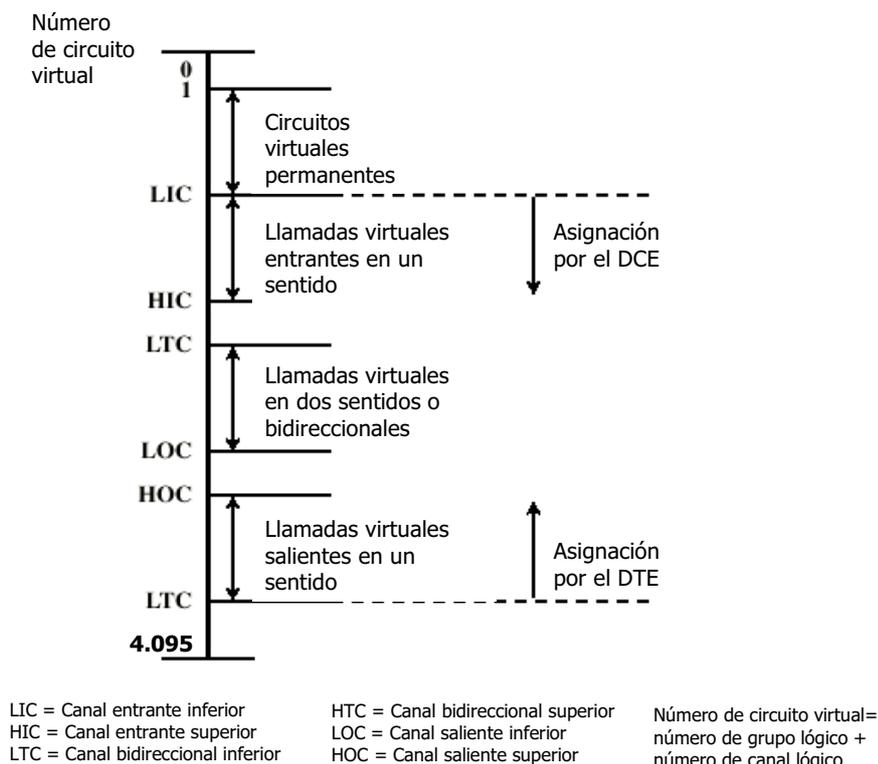
0	0	1	1	0	0	0	0
X	0	1	1	Número de grupo			
Número de canal							
Tipo de paquete		1					
P(R)- parte baja				0			
P(R)- parte alta							

(i) Paquetes RR, RNR y REJ con números de secuencia de 15 bits

Multiplexación

- Un DTE puede establecer hasta 4.095 circuitos virtuales simultáneamente con otros DTE sobre el mismo enlace físico DTC-DCE.
- Cada paquete contiene un número de circuito virtual de 12 bits.

Asignación de números de circuito virtual



Control de flujo y de errores

- Protocolo HDLS (véase Capítulo 7).

Secuencia de paquetes

- Secuencia completa de paquetes.
- Permite el envío de bloques de datos de tamaño mayor al permitido por la red, sin que pierdan su integridad.
- Paquetes de tipo A:
 - El bit M toma el valor 1, el bit D el valor 0.
- Paquetes de tipo B:
 - Los demás paquetes.
- Cero o más paquetes A seguidos de un paquete tipo B.

Reinicio y rearranque

■ Reinicio:

- Para reiniciar un circuito virtual.
- Los números de secuencia se igualan a cero.
- Pérdida de paquetes en tránsito.
- El protocolo de nivel superior es el encargado de la recuperación de paquetes perdidos.
- Provocado por: la pérdida de paquetes, errores en el número de secuencia, congestión o pérdida de un circuito virtual interno a la red.

■ Rearranque:

- Equivale a la emisión de un paquete Petición de Reinicio sobre todos los circuitos virtuales.
- Es decir, pérdida temporal del acceso a la red.

Lecturas recomendadas

- Stallings, W. *Comunicaciones y Redes de Computadores*, sexta edición. Madrid: Prentice Hall, 2000: Capítulo 10.
- Información sobre el X.25 del sitio web ITU-T.
- Información sobre el encaminamiento de Comer.