

Estructura de redes de computadores

Estructura de redes de computadores

**Jordi Íñigo Grieria
José María Barceló Ordinas
Llorenç Cerdà Alabern
Enric Peig Olivé
Jaume Abella i Fuentes
Guiomar Corral i Torruella**



EDITORIAL UOC

Diseño de la colección: Editorial UOC

Primera edición en lengua castellana: Diciembre 2008

© Jordi Íñigo Grieria, José María Barceló Orinas, Llorenç Cerdà Alabern
Enric Peig Olivé, Jaume Abella i Fuentes, Guiomar Corral i Torruella, del texto

© Imagen de la cubierta: Istockphoto

© Editorial UOC, de esta edición
Rambla del Poblenou 156, 08018 Barcelona
www.editorialuoc.com

Realización editorial: Carrera Edició, S.L.

Impresión:

ISBN: 978-84-9788-791-5

Depósito legal B.

Ninguna parte de esta publicación, incluido el diseño general y la cubierta, puede ser copiada, reproducida, almacenada o transmitida de ninguna forma, ni por ningún medio, sea éste eléctrico, químico, mecánico, óptico, grabación fotocopia, o cualquier otro, sin la previa autorización escrita de los titulares del copyright.

Jordi Íñigo Griera

Ingeniero de Telecomunicación por la Universitat Politècnica de Catalunya. Actualmente es director de desarrollo de software en Safelayer Secure Communications, S. A. y profesor en la Universitat Politècnica de Catalunya.

José María Barceló Orinas

Doctor ingeniero de Telecomunicación por la Universitat Politècnica de Catalunya. Es profesor titular en el Departamento de Arquitectura de Computadores en la UPC y miembro del Área de Redes de Computadores en la Facultad de Informática de la UPC.

Llorenç Cerdà Alabern

Doctor ingeniero de Telecomunicación e ingeniero técnico industrial por la Universitat Politècnica de Catalunya. Es profesor titular en el Departamento de Arquitectura de Computadores en la UPC y miembro del Área de Redes de Computadores en la Facultad de Informática de la UPC.

Enric Peig Olivé

Ingeniero de Telecomunicación por la Universitat Politècnica de Catalunya y doctor por la Universitat Pompeu Fabra. Es profesor de la Escuela Superior Politécnica de la Universitat Pompeu Fabra.

Jaume Abella i Fuentes

Ingeniero electrónico e ingeniero técnico de Telecomunicaciones por Ingeniería y Arquitectura de La Salle-Universidad Ramon Llull. Actualmente trabaja en sistemas de seguridad en redes informáticas. Profesor de Redes de comunicaciones y de CCNA y CCNP de CISCO en el *Networking Academy Program* de CISCO Systems. Director del máster en Seguridad de ingeniería y arquitectura de La Salle-Universidad Ramon Llull.

Guiomar Corral i Torruella

Ingeniera electrónica e ingeniera técnica de Telecomunicaciones por Ingeniería y Arquitectura de La Salle-Universidad Ramon Llull. Máster en Seguridad en tecnologías de la Información de Ingeniería y Arquitectura de La Salle-Universidad Ramon Llull. Actualmente trabaja en sistemas de seguridad en redes informáticas. Profesora de Redes de ordenadores, Redes de comunicaciones y de CCNA y CCNP en el *Networking Academy Program* de CISCO Systems.

Índice

Capítulo I. Conceptos básicos de redes de computadores

Jordi Íñigo Griera, Enric Peig Olivé

Introducción	13
1. Breve historia de las comunicaciones	14
1.1. El teléfono	14
1.2. Aparecen los primeros ordenadores	20
1.3. Arquitecturas de protocolos	24
1.4. La digitalización de la red telefónica	27
1.5. La banda ancha	29
1.6. La telefonía móvil	30
2. Las redes de gran alcance	31
2.1. Conmutación de circuitos	31
2.2. Datagramas y circuitos virtuales	37
2.3. Comparación entre conmutación de circuitos y conmutación de paquetes	39
2.4. Encaminamiento	41
3. Arquitecturas de protocolos: el modelo OSI	50
3.1. Definición	50
3.2. Los protocolos	51
3.3. Los servicios	53
3.4. Los siete niveles del modelo OSI	53

Capítulo II. Transmisión de datos

Llorenç Cerdà Alabern, Jordi Íñigo Griera

Introducción	59
1. Conceptos básicos de transmisión de datos	59
1.1. Modelo sencillo de comunicaciones	62

2. Interfaz DTE-DCE	65
2.1. RS-232	65
3. Circuito de datos	68
3.1. Circuitos unidireccionales y bidireccionales	68
3.2. Velocidad de transmisión y velocidad de modulación	69
3.3. Tipos de codificaciones de canal	73
3.4. Cálculo de la probabilidad de error	86
3.5. Multiplexación	88
4. Medio de transmisión	92
4.1. Perturbaciones de la señal	93
4.2. Tipo de medios de transmisión	111

Capítulo III. Enlace de datos

José M. Barceló Ordinas, Llorenç Cerdà Alabern

Introducción	125
1. Descripción del nivel de enlace	126
1.1. Montaje de las tramas	127
1.2. Sincronismo de trama	127
2. Detección de errores	131
2.1. Distancia de Hamming	133
2.2. Capacidad de detección de una ráfaga de error	134
2.3. Probabilidad de que una combinación arbitraria de bits sea aceptada como palabra válida	134
2.4. Control de paridad	135
2.5. Códigos de paridad longitudinal y transversal	137
2.6. Códigos detectores de errores CRC	140
2.7. Códigos correctores de errores	142
3. Control de errores	144
3.1. Diagramas de tiempo	145
3.2. Evaluación de los protocolos: eficiencia	148
3.3. Protocolo <i>Stop & Wait</i>	149
3.4. Protocolos de transmisión continua	157
4. Control de flujo	162
4.1. Protocolos de ventana	163

4.2. Dimensionado de la lista de transmisión	164
4.3. Ventana de recepción	165
4.4. Ventana óptima	166
4.5. Dimensionamiento del campo de los identificadores de trama ...	167
5. Otras consideraciones sobre el nivel de enlace	169
5.1. <i>Piggybacking</i>	169
5.2. Sincronismo de protocolo	170
5.3. Importancia del nivel de enlace según el contexto	172
5.4. Multiplexación en el nivel de enlace	174
6. Ejemplo: HDLC y ATM	176
6.1. HDLC	176
6.2. ATM	179

Capítulo IV. Tecnologías de red de área local

*José M. Barceló Ordinas, Jordi Íñigo Griera, Enric Peig Olivé,
Jaume Abella i Fuentes, Guiomar Corral i Torruella*

Introducción	183
1. Conceptos básicos	184
1.1. Arquitectura de protocolos en las LAN	186
2. Topologías	188
2.1. Topología en estrella	188
2.2. Topología en bus	189
2.3. Topología en anillo	190
2.4. Topologías lógicas y topologías físicas	191
2.5. Pseudotopología sin hilo	194
3. Control de acceso al medio	196
3.1. Control de acceso al medio estático	197
3.2. Control de acceso al medio dinámico	203
3.3. Control de acceso al medio aleatorio	205
3.4. Acceso múltiple por escucha de portadora con eliminación de colisiones	220
4. Commutación en las LAN: dominios de colisión	224
5. Estándares para redes de área local	230
5.1. Ethernet y IEEE802.3	232

5.2. Fast Ethernet y Gigabit Ethernet	237
5.3. Cableado EIA/TIA 568	246
5.4. Redes inalámbricas: norma IEEE802.11	251
6. Nuevas prestaciones de las redes Ethernet	256
6.1. Ethernet full-duplex	256
6.2. Control de flujo	257
6.3. Sistemas multiestándar: autonegociación	258
7. Redes de área local virtuales: VLAN	259
7.1. Características de las VLAN	260
7.2. Tipos de VLAN	263
7.3. IEEE 802.1Q	265

Capítulo V. Redes de gran alcance: Internet

José M. Barceló Ordinas, Jordi Íñigo Griera, Enric Peig Olivé

Introducción	269
1. Estructura de protocolos en Internet	270
1.1. Protocolos de Internet	272
1.2. Encapsulamiento	272
2. El IP (<i>Internet protocol</i>)	274
2.1. Direcciones IP	275
2.2. Subredes	277
2.3. Direcciones de propósito especial	279
2.4. CIDR y supernetting	281
2.5. El formato del paquete IP	282
2.6. Encaminamiento y encaminadores	286
3. El ARP (<i>address resolution protocol</i>)	290
4. El ICMP (<i>Internet control message protocol</i>)	292
4.1. Mensajes ICMP	292
4.2. El programa ping	294
4.3. El programa traceroute	297
4.4. Mensaje de reencaminamiento	298
5. Protocolos de encaminamiento	300
5.1. RIP	301
5.2. IGRP	302

5.3. OSPF	302
5.4. IS-IS	303
6. Mecanismos de acceso a Internet	304
6.1. Acceso telefónico: el PPP	305
6.2. Acceso ADSL	309
6.3. Acceso LAN: el protocolo Ethernet	311
6.4. El DHCP (<i>Dynamic Host Configuration Protocol</i>)	312
7. NAT	314
7.1. NAT estática	315
7.2. NAT dinámica	317
7.3. PAT (<i>Port Address Translation</i>)	319
7.4. LSNAT (<i>Load Sharing NAT</i>)	323
8. IPv6	325
Glosario	327
Bibliografía	335

Capítulo I

Conceptos básicos de redes de computadores

Jordi Íñigo Grier

Enric Peig Olivé

Introducción

Las redes de ordenadores actuales constituyen una amalgama de dispositivos, técnicas y sistemas de comunicación que han ido apareciendo desde finales del siglo XIX o, lo que es lo mismo, desde la invención del teléfono. Este último se desarrolló exclusivamente para transmitir voz, pero actualmente, en muchos casos se utiliza también para conectar ordenadores entre sí. Desde entonces, han aparecido las redes locales, las conexiones de datos a larga distancia con enlaces transoceánicos o satélites, Internet, la telefonía móvil, etc. Son una gran cantidad de tecnologías que configuran las redes de ordenadores que utilizamos como usuarios y que nos proponemos estudiar en este libro.

Dedicaremos este capítulo a introducir las ideas y los conceptos básicos de las redes de ordenadores que trataremos exhaustivamente a lo largo del libro.

Para tener una buena perspectiva de estas tecnologías y entender por qué se han creado, es recomendable considerar la evolución histórica de las telecomunicaciones, que a partir de mediados del siglo XX va íntimamente ligada a la historia de la informática. Este breve repaso histórico debe permitirnos contextualizar dichas tecnologías.

Después introduciremos brevemente el concepto de red de paquetes, en contraposición a las redes de conmutación de circuitos, que nos servirá de punto de partida tanto para las redes de área local como para la red Internet, que veremos en los otros capítulos.

Por último, se presentará un concepto fundamental en sistemas distribuidos: las arquitecturas de protocolos en general y el modelo de referencia OSI en particular. Aunque hoy día este modelo no disfruta de una gran popularidad, sus vir-

tudes pedagógicas están más que demostradas. A partir de este modelo es fácil estudiar y entender otras arquitecturas, como la arquitectura Internet.

1. Breve historia de las comunicaciones

1.1. El teléfono

En 1878, Alexander Graham Bell mostró su “máquina eléctrica parlante” y cómo podía mantener una conversación a distancia entre dos de estos aparatos unidos por un hilo eléctrico.

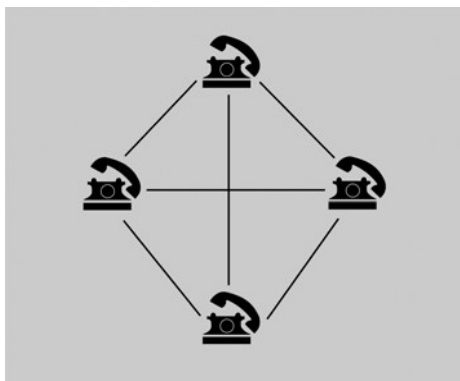
El teléfono no fue el primer sistema de telecomunicación. Mucho antes se habían utilizado sistemas ópticos que, con la luz del sol y juegos de espejos, permitían comunicarse desde distancias considerables: con un obturador que se abría y se cerraba a voluntad con diferentes periodos, se podían componer mensajes. Con posterioridad, a mediados del siglo XIX, se inventó el telégrafo. El mismo concepto, pero con un circuito eléctrico, un pulsador y un timbre.

Todos estos sistemas requerían conocer un código para interpretar el mensaje. En cambio, para utilizar el teléfono no es necesario conocer ningún código: se escucha exactamente lo mismo que si se tuviera al interlocutor al lado. Ésta ha sido la razón principal de su éxito y de que los otros dos sistemas casi no se utilicen.

Al principio, había muy pocos teléfonos y, para utilizarlos la gente, por cuenta propia, cableaba un aparato con otro: si alguien tenía un aparato en casa y otro en el trabajo, los conectaba directamente. A medida que el número de teléfonos instalados crecía, el interés por mantener múltiples comunicaciones también lo hacía: era preciso pensar en la manera de interconectarlos. Nacía la idea de red de comunicaciones.

Una posible manera, bastante inmediata, de interconectar todos los aparatos sería lo que se puede observar en la figura siguiente:

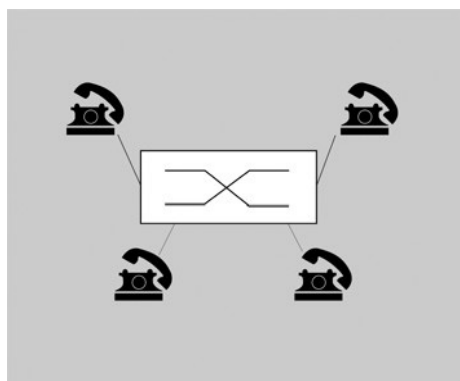




Todos con todos.

Es evidente que este modelo de conexión, “todos con todos”, es completamente inviable: para cada aparato nuevo que se incorpora a la red, se precisa un gran número de conexiones nuevas. Para hacernos una idea, una red “todos con todos” de cincuenta teléfonos necesita 1.225 líneas de conexión y, en cada teléfono, un dispositivo que permita cuarenta y nueve conexiones.

Para solucionar este problema, aparecieron compañías que ofrecían un servicio de conmutación: hacían llegar un cable hasta cada teléfono y conectaban los cables de los teléfonos que deseaban establecer una comunicación. De este modo, cada aparato disponía de una sola conexión y no era necesario establecer ninguna variación en la misma para incorporar nuevos aparatos a la red.



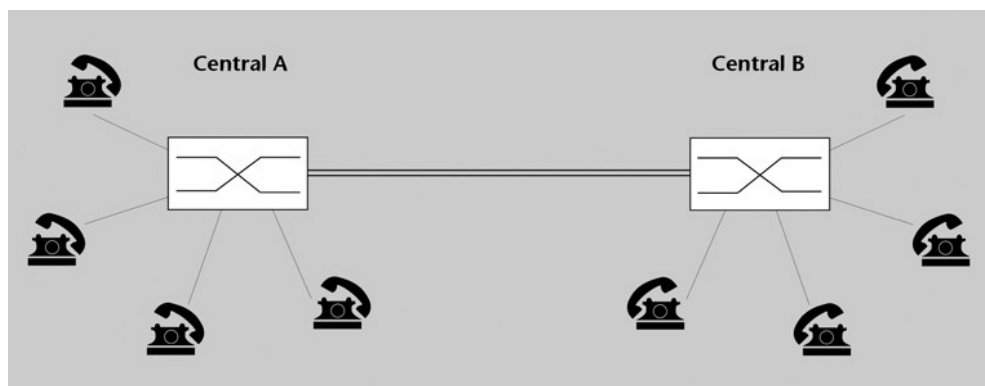
Central de conmutación.

De aquí provienen términos hoy tan comunes como abonado (el usuario que se abona a una central), bucle de abonado (el cable que une al abonado con la central) o central de conmutación.

Los primeros sistemas de conmutación no eran dispositivos muy sofisticados: eran personas, por lo general mujeres. Cuando alguien quería realizar una llamada, descolgaba y pedía a la operadora que le conectara con quien deseaba hablar. Una vez finalizada la comunicación, la operadora desconectaba los cables y, así, las líneas quedaban preparadas para recibir otras llamadas.

Las operadoras humanas fueron sustituidas progresivamente por ingenios electromecánicos: las centralitas. En los teléfonos se incorporó un disco con números para “marcar” el número del destinatario de la llamada. La centralita decodificaba este número para saber entre qué dos cables era preciso establecer la comunicación.

Este servicio de conmutación empezó en el ámbito local: un pueblo, un barrio, una ciudad. El paso siguiente consistió en ofrecer conexiones a larga distancia, conectando centrales locales entre sí directamente, o por medio de centrales de tráfico.



Comunicación entre dos centrales de conmutación

Entre las dos centrales locales se establece un enlace con diferentes cables independientes, de manera que los abonados de una de estas últimas pueden, además de conectarse entre sí, conectar con los abonados de la otra: se elige un cable de los que forman el enlace, se conecta con el abonado local y se pide a la otra central que conecte el enlace con el abonado destino si no está ocupado con otra llamada.

La conexión entre las dos centrales comporta un primer escollo importante: es preciso decidir con cuántas líneas diferentes se llevará a cabo.

Supongamos que la central A de la figura anterior proporciona servicio a cien abonados y la B, a doscientos cincuenta. Parece que, si se pretende dar el mejor servicio posible, se necesitan cien líneas para que todos los abonados de la central A puedan hablar de manera simultánea con otros de la central B.

No obstante, la probabilidad de que todos los abonados de una central realicen una llamada en el mismo momento es muy baja, puesto que las llamadas telefónicas son, en general, cortas y esporádicas. Por tanto, es completamente innecesario que la conexión entre las dos centrales incluya todas las llamadas posibles: esta situación no se dará nunca y tiene un coste exagerado.

Unos modelos matemáticos bastante complejos permiten calcular el número concreto de enlaces que se precisan a partir de la estadística de las llamadas que sirven las centrales (la frecuencia de aparición y su duración).

Supongamos que en el ejemplo anterior estos modelos nos dan veinticinco enlaces. Si en un momento dado hay veinticinco llamadas en curso entre A y B y llega otra llamada, no tendrá ningún camino disponible y, por consiguiente, no se podrá establecer. Esta situación se denomina *bloqueo*: el abonado a quien se quiere llamar no está ocupado; sin embargo, no se puede encontrar un camino libre por la red para establecer la comunicación.

De esta situación se desprenden dos ideas fundamentales en relación con la red telefónica:

- La conmutación de circuitos requiere pasar por tres fases para cada comunicación:
 - Establecimiento de llamada. Cuando se solicita iniciar una conversación, es preciso averiguar si el destinatario está disponible y, en caso afirmativo, debe buscarse un camino libre en la red, que incluya conmutadores dentro de las centrales y enlaces entre las mismas.
 - Comunicación. Una vez establecido el circuito, los interlocutores se intercambian información.
 - Liberación de recursos. Acabada la comunicación, se liberan los recursos utilizados (enlaces entre centrales y conmutadores dentro de las centrales).
- El hecho de que los recursos estén ocupados en exclusiva mientras dura la comunicación hace que las compañías que ofrecen el servicio cobren según la duración de la llamada: cuanto más tiempo están los recursos ocupados,

más se paga. De este modo, el usuario se apresura en acabar la comunicación y dejar los enlaces libres, de manera que disminuye la probabilidad de bloqueo.

La red telefónica constituye una red de conmutación de circuitos. Para llevar a cabo una comunicación es preciso establecer un circuito entre los dos extremos por medio de la red. Mientras dura la comunicación, se ocupan unos recursos en exclusiva, aunque no haya intercambio de información. Las compañías cobran el uso de los recursos por tiempo de ocupación.

Pronto el sistema telefónico pasó a ser una cuestión nacional. Los estados desarrollaban sus redes según sus criterios y gustos. Se creó un organismo, el CCITT (Comité Consultivo Internacional de Telegrafía y Telefonía, Comité Consultatif International Télégraphique et Téléphonique), para armonizar los sistemas nacionales y permitir, con centrales de tráfico internacionales, las comunicaciones entre países.

El CCITT o ITU-T

El CCITT es un organismo internacional patrocinado por las operadoras de telefonía, dedicado a tareas de normalización en el ámbito de las telecomunicaciones. El 1 de marzo de 1993 pasó a llamarse ITU-T (*International Telecommunication Union Standardisation Sector*).

Hemos comentado que entre las centrales existe una serie de líneas que permiten la conexión entre abonados de diferentes centrales. Al principio era realmente así: si se decidía que entre dos centrales era preciso disponer de cincuenta enlaces, se instalaban cincuenta cables entre una y otra. Sin embargo, con el progresivo aumento de enlaces necesarios, este sistema pronto fue totalmente inviable y fue preciso recurrir a una técnica ya conocida en radiodifusión: la multiplexación¹.

La técnica de multiplexación que se aplicó a la telefonía fue la multiplexación en frecuencia: se modulan los diferentes canales de entrada a distintas frecuencias portadoras, de manera que puedan viajar por el mismo medio sin interferirse. Se aplican filtros a la recepción que permiten separar los distintos canales multiplexados.

1. *Multiplexar* significa hacer pasar diferentes comunicaciones independientes por el mismo medio de transmisión.

Hacemos lo mismo al escuchar la radio o al ver la televisión. Hasta nuestra antena llegan todos los canales emitidos; con el dial y el selector de canales, respectivamente, seleccionamos el canal (la gama de frecuencias) correspondiente a la emisora que queremos recibir. Es decir, el dial o el selector de canales de la televisión constituyen los filtros que separan, en recepción, los diferentes canales multiplexados.

El número de canales diferentes que pueden viajar por un medio multiplexado depende del ancho de banda de la señal y de la capacidad del medio.

Por lo que respecta a la capacidad del medio, no dispone de la misma un par de hilos que un cable coaxial o que una fibra óptica.

En cuanto al ancho de banda, en el caso de la voz, debería ser de 19.980 Hz (que es un ancho de banda considerable) puesto que el oído humano es capaz de distinguir frecuencias entre los 20 Hz y los 20.000 Hz. No obstante, a raíz de estudios que se llevaron a cabo sobre las características de la voz humana, se llegó a la conclusión de que con mucho menos bastaba, puesto que la inteligibilidad de la voz se concentra en una banda bastante estrecha, entre los 300 Hz y los 3.400 Hz.

A partir de esta conclusión, se tomó una decisión que, a la larga, ha condicionado mucho el uso de la red telefónica: hacer el canal de voz de 4 kHz (entre 300 Hz y 3.400 Hz, más unas bandas laterales de guardia).

Ello explica por qué se escucha tan mal la música por el teléfono: no hay ni graves ni agudos, sólo están las frecuencias del medio.

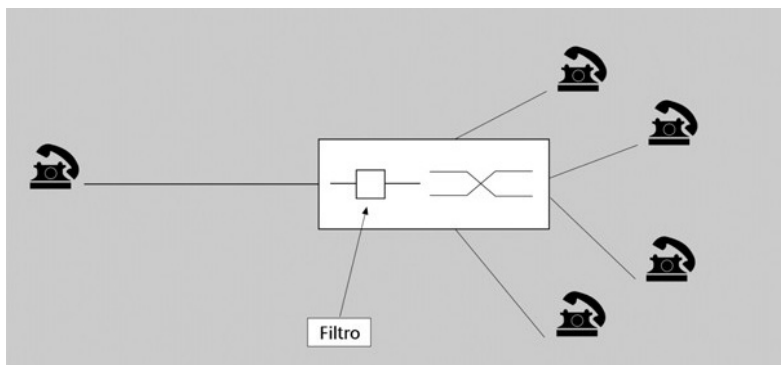
A partir de aquí, se estandarizaron los diferentes niveles de multiplexación. El nivel básico es la agrupación de distintos canales de 4 kHz, el siguiente es una agrupación de multiplexados básicos, etc.

Jerarquía estándar

La jerarquía que propuso la compañía americana AT&T es la siguiente:

Nombre	Rango	Ancho de banda	Canales de voz
Group	60-108 kHz	48 kHz	12
Supergroup	312-552 kHz	240 kHz	60
Mastergroup	564-3.084 kHz	2,52 MHz	600
Jumbogroup	0,5-17,5 MHz	17 MHz	3.600

En la entrada de la central local se encuentra un filtro que elimina cualquier frecuencia por encima de los 4 kHz. La señal de salida de este último es la que se multiplexa, conmuta y lleva hasta el destinatario.



Con todo ello, ya podemos dibujar un panorama completo de la red telefónica, tal como era hasta los años setenta:

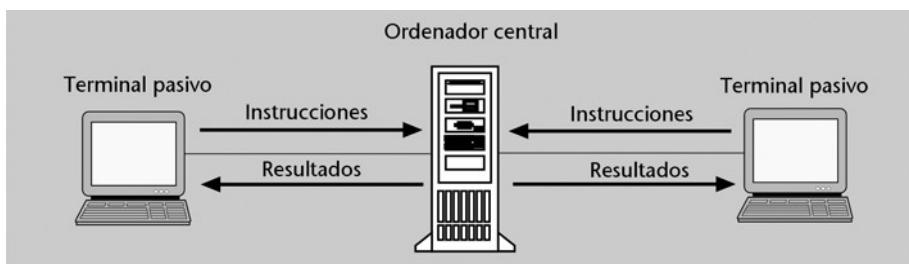
La red telefónica es analógica, ubicua, trabaja con la técnica de conmutación de circuitos, con tarificación por tiempo de ocupación, con enlaces multiplexados en frecuencia y con canales limitados a 4 kHz.

1.2. Aparecen los primeros ordenadores

La década de los sesenta vio la aparición de los primeros ordenadores comerciales. Eran grandes, caros y poco potentes². Sólo organismos oficiales, grandes empresas o universidades podían comprarlo, y lo que es más normal es que sólo compraran uno (o algunos, pero no uno para cada usuario, como hoy día estamos acostumbrados a ver). Por ello, estos ordenadores llevaban sistemas operativos multitarea y multiusuario, para que diferentes usuarios, realizando distintos trabajos, pudieran utilizarlos simultáneamente. El acceso a dichos ordenadores

2. Evidentemente, comparados con los que hoy estamos acostumbrados a ver. Para la época, eran unas máquinas fantásticas.

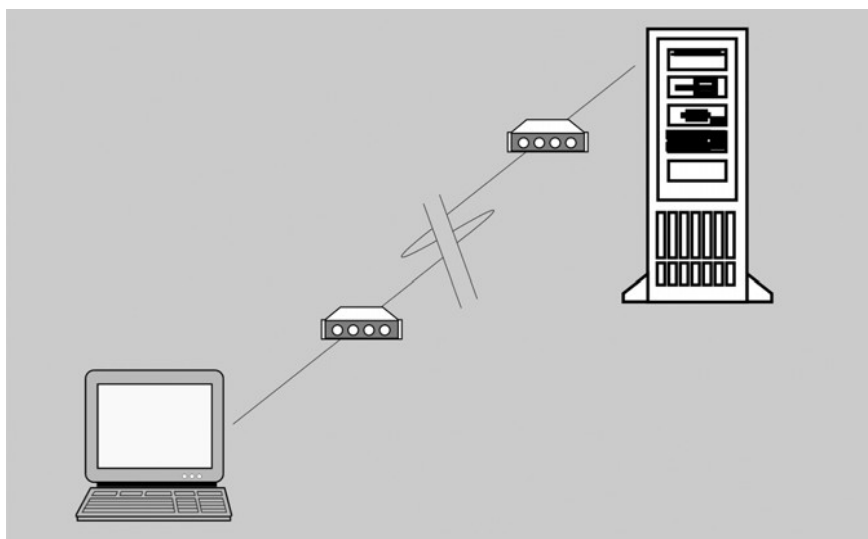
se llevaba a cabo por medio de terminales sin ninguna capacidad de proceso, pasivos³:



1.2.1. Los módems

No tardó mucho en aparecer la necesidad de poder alejar los terminales de la unidad central para conectarse, por ejemplo, desde casa o desde una delegación al ordenador central.

Para poder realizar este acceso remoto, la primera solución que aportaron los ingenieros informáticos de la época fue utilizar la red telefónica que, por su ubicuidad, les ahorra generar infraestructuras nuevas. Sólo se precisaba un apar-

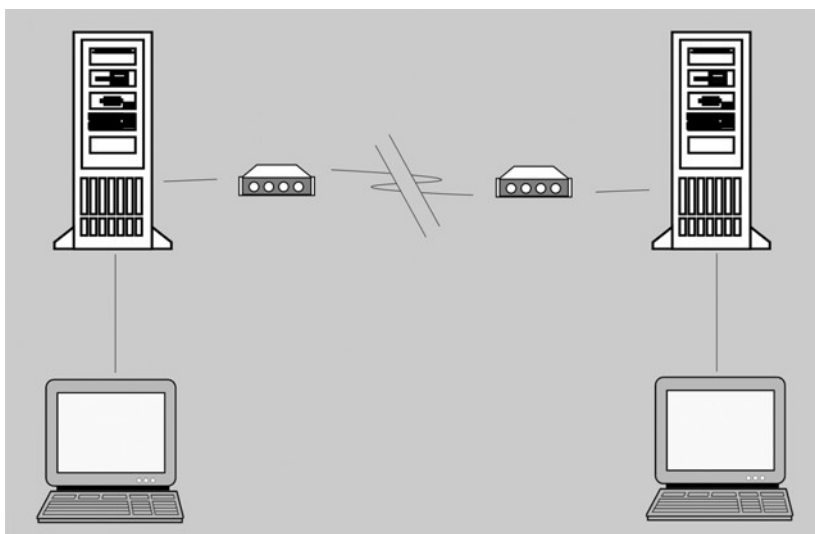


3. En inglés *dumb terminal* ('terminal mudo'). Coloquialmente, estos terminales se llaman *terminales tontos*.

to que adaptara los bits a la red (recordad que la red telefónica sólo deja pasar sonidos entre unos márgenes de frecuencia). Estos aparatos son los módems⁴.

Los primeros módems eran de 300 bps y generaban dos tonos diferentes: uno para el 1 lógico y otro para el 0. Los de mayor velocidad van a 56.000 bps, que es el máximo que permite la red telefónica convencional actual.

Los módems no sólo servían para poder alejar los terminales pasivos de los ordenadores centrales, también permitían interconectar ordenadores entre sí, de manera que desde los terminales de uno se podía acceder al otro, y viceversa.



La tecnología de conmutación de circuitos se desarrolló en un origen para las comunicaciones telefónicas y una de sus características fundamentales era la ocupación en exclusiva de los recursos mientras duraba la conexión, lo que (como ya hemos visto) justificaba la tarificación por tiempo. Sin embargo, las comunicaciones informáticas no son cortas, intensas y esporádicas como las de voz. Al conectar un terminal a un ordenador central por medio de dos módems, no están pasando datos todo el tiempo que dura la conexión: puede haber largos periodos de tiempo en los que no pase ningún bit y momentos en los que haya un intercambio de datos intenso, aunque a una velocidad de transmisión mucho más baja

4. Módem es un acrónimo de *modulator-demodulator*, que se refiere a su función: modular (generar señales audibles según los valores de los bits) y demodular (generar bits a partir de las señales que recibe de la red telefónica).

que la que se puede mantener entre el terminal y el ordenador conectados directamente. Las facturas telefónicas empezaron a ser astronómicas y desproporcionadas respecto del uso real de la red.

1.2.2. Las redes de datos

Pronto las grandes empresas presionaron a las compañías telefónicas del momento para que desarrollaran redes pensadas para transportar datos, cuyo sistema de tarificación se ajustara al tráfico de datos real y permitiera más velocidad que los escasos 300 o 1.200 bps de la época, que se lograban utilizando la red telefónica. La respuesta fueron las redes de conmutación de paquetes.

El envío de datos no necesariamente debe llevarse a cabo en tiempo real (las transmisiones de voz, sí). Por tanto, no es preciso establecer el camino entre los dos puntos antes de empezar la transmisión y mantenerlo mientras dura el intercambio de datos. En lugar de ello, se empaquetan los bits que deben transmitirse y se entregan a la central más próxima para que los envíe cuando pueda a la siguiente, y así sucesivamente hasta que lleguen al destino. Si cuando un paquete llega a una central todos los enlaces con la siguiente están ocupados, no pasa nada, lo hace esperar poniéndolo en una cola para enviarlo cuando haya un enlace disponible.

La transmisión por paquetes tiene la ventaja de que sólo ocupa los recursos cuando en realidad se utilizan, no siempre. Sin embargo, como contrapartida, es preciso soportar el retraso que pueda producirse entre que los paquetes salen del origen y llegan a su destino. Retraso que a su vez es variable, puesto que las esperas en las colas son aleatorias, al depender del estado de la red. Sin embargo, como hemos dicho, ello, en comunicación de datos, es hasta cierto punto tolerable. Por lo que respecta a la cuestión económica, no tiene sentido que se cobre por tiempo de conexión: en las redes de datos se paga por bits transmitidos.⁵

Existe otro peligro: los paquetes pueden perderse. Conviene tener presente que las colas son limitadas y, si llega un paquete cuando una ya está llena, no se podrá guardar y se perderá. Es preciso prever mecanismos que eviten dichas pérdidas y regulen el flujo de información entre los nodos de conmutación.

5. En España, esta red de datos se llamaba Iberpac. En la actualidad, para comunicaciones de datos se utiliza el Frame Relay, la evolución natural del X.25, y cada vez más, ATM.

Las compañías telefónicas desarrollaron redes de este tipo, y el CCITT emitió un estándar, el X.25, que es el que se ha adoptado hasta hace poco.

1.2.3. Las redes de área local

Cuando empezó a ser habitual disponer de más de un ordenador en la misma instalación, apareció la necesidad de interconectarlos para poder compartir los diferentes recursos: dispositivos caros, tales como impresoras de calidad, un disco duro que almacenara los datos de la empresa, un equipo de cinta para realizar copias de seguridad, etc.

El diseño de las redes de área local⁶ siguió caminos completamente diferentes de los que se siguieron para las redes de gran alcance. En las redes de área local se necesita, habitualmente, establecer comunicaciones “muchos a uno” y “uno a muchos”, lo que es difícil de conseguir con las redes de conmutación, pensadas para interconectar dos estaciones. Para este tipo de redes es más adecuada la difusión con medio compartido, donde los paquetes que salen de una estación llegan a todo el resto simultáneamente. En la recepción, las estaciones los aceptan o ignoran dependiendo de si son destinatarias de los mismos o no.

Se habla de *difusión* porque los paquetes se difunden por todos lados, y de *medio compartido* porque esta difusión se lleva a cabo sobre un medio común que las estaciones comparten.

1.3. Arquitecturas de protocolos

De la década de los sesenta datan también los primeros estándares de arquitecturas de protocolos. Conviene tener presente que el intercambio de información entre ordenadores tiene toda una serie de implicaciones, entre las que se encuentran las siguientes:

- Aspectos eléctricos: los cables, los conectores, las señales, etc.

6. Con frecuencia se utiliza la sigla inglesa LAN (*local area network*) para identificar las redes de área local, y la sigla WAN (*wide area network*) para identificar las redes de gran alcance.

- La manera de agrupar los bits para formar paquetes y la de controlar que no se produzcan errores de transmisión.
- La identificación de los ordenadores dentro de la red y la manera de conseguir que la información que genera un ordenador llegue a quien se pretende.

Asumir todos estos aspectos de una manera global no es viable: demasiadas cosas y demasiado diferentes entre sí. Por ello, ya desde el principio, se desarrollaron modelos estructurados en niveles: en cada nivel se lleva a cabo una tarea y la cooperación de todos los niveles proporciona la conectividad deseada por los usuarios.

Conviene considerar que, en la época que nos ocupa, la informática estaba en manos de muy pocos fabricantes e imperaba la filosofía del servicio integral: cada fabricante lo proporcionaba todo (ordenadores, cables, periféricos, sistema operativo y software). Por tanto, cuando una empresa se quería informatizar, elegía una marca y quedaba vinculada a la misma para toda la vida.

Hablamos de empresas como IBM (International Business Machines) o DEC (Digital Equipment Corporation). Cuando estas últimas se propusieron ofrecer conectividad entre sus equipos, o bien local o bien remota, también lo hicieron aplicando la filosofía de la separación por niveles: IBM desarrolló la arquitectura SNA (*system network architecture*) y DEC, la DNA (*DEC network architecture*). Eran dos modelos completos, estructurados en niveles, pero incompatibles entre sí, según la filosofía de la informática propietaria.

En la década de los setenta el panorama cambió radicalmente, sobre todo a causa de tres acontecimientos:

- La propuesta del protocolo Ethernet para redes locales.
- La aparición del sistema operativo Unix, que no estaba vinculado a ninguna marca comercial, compatible con todas las plataformas de hardware existentes.
- La invención de los protocolos TCP/IP, embrión de la actual Internet.

Se había allanado el camino para la aparición de los sistemas abiertos: no era preciso vincularse a ninguna marca para tenerlo todo. El hardware podía ser de un proveedor, el sistema operativo de otro, las aplicaciones de otro y los protocolos, públicos.

TCP/IP⁷ nació a partir de un encargo de la DARPA⁸ a la comunidad científica americana para obtener una red mundial que fuera reconfigurable con facilidad y de forma automática en caso de destrucción de algún nodo o de algún enlace.

La pila TCP/IP era una jerarquía de protocolos que ofrecía conectividad y, a pesar de tener poco que ver con las que ya existían, constituía una opción más en el mercado. Ante una oferta tan grande y dispar de protocolos, la ISO (Organización Internacional de Estandarización, International Organization for Standardization) y el CCITT propusieron un nuevo modelo que intentaba reunir de algún modo todo lo que ya se había propuesto y que pretendía ser completo, racional y muy bien estructurado (la TCP/IP tiene fama de ser una pila de protocolos anárquica), con la intención, por tanto, de que se convirtiera en un modelo de referencia. Es la conocida como pila de protocolos OSI (*open systems interconnection*).

Internet, que nació y creció en las universidades, se empezó a popularizar en la década de los noventa, a medida que quienes conocían la Red la iban “enseñando”, y su eclosión se produjo cuando saltó al mundo de la empresa, en todas sus vertientes: como escaparate de productos o como canalizador de contactos comerciales.

Sin embargo, el origen universitario de la Red ha marcado su evolución en muchos sentidos. Por ejemplo, el modelo cliente/servidor de aplicaciones distribuidas. Es un modelo sencillo y, al mismo tiempo, potente, y casi todas las aplicaciones que se utilizan en Internet lo siguen. El Telnet, o apertura de sesión remota, la transferencia de ficheros (FTP), el correo electrónico y, sobre todo, el WWW (*World Wide Web*) constituyen ejemplos claros de aplicaciones que siguen este modelo. Las dos primeras han caído un poco en desuso, pero tanto el correo como el WWW son las actuales estrellas en Internet. Tímidamente, aparecen nuevas propuestas de aplicaciones; sin embargo, el WWW, que nació como un servicio de páginas estáticas enlazadas con hiperenlaces, se está convirtiendo en la interfaz de usuario de toda la Red, puesto que en la actualidad se utiliza para servir páginas dinámicas (se crean en el momento en que se sirven), e, incluso, código que se ejecuta en el ordenador cliente (*applets*).

7. TCP/IP, siglas de *transmission control protocol/Internet protocol* (protocolo de control de transmisión/protocolo de Internet).

8. DARPA, siglas de Defense Advanced Research Project Agency (Agencia de Proyectos de Investigación Avanzada para la Defensa).

1.4. La digitalización de la red telefónica

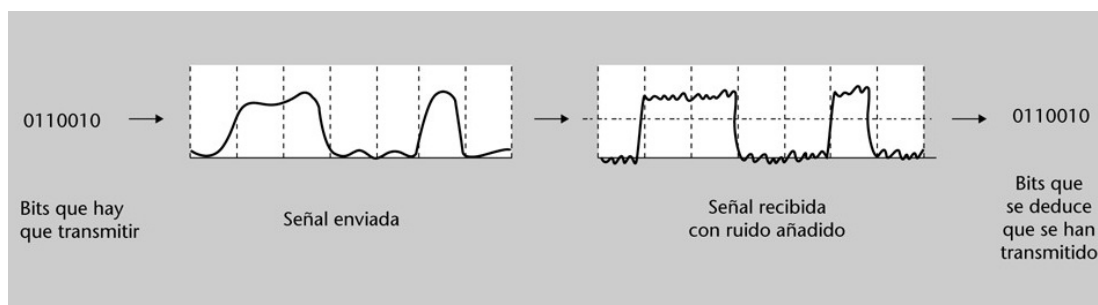
En este momento tenemos dos redes completamente independientes entre sí, pero de alguna manera superpuestas:

- Una red analógica, con conmutación de circuitos, pensada para voz.
- Una red digital, con conmutación de paquetes, pensada para datos.

La red telefónica, tal como la hemos descrito hasta ahora, es completamente analógica: la señal electromagnética que viaja desde un teléfono hasta otro es analógica (varía continuamente y en cualquier momento puede adoptar cualquier valor) y los circuitos electrónicos que componen la red también lo son.

Los enlaces entre centrales de la red telefónica se llevaban a cabo con señales analógicas con muchos canales multiplexados en frecuencia y, en ocasiones, debían recorrer grandes distancias. La atenuación de la señal inherente a la distancia que era preciso recorrer debía corregirse por medio de repetidores que la amplificaban, lo que aumentaba el ruido presente en la línea. A menudo, la señal recibida era de una calidad muy baja porque la transmisión analógica no permitía eliminar el ruido y las interferencias en la recepción. No existía ninguna manera de saber con exactitud qué se había enviado desde el origen y qué era ruido añadido.

En 1972, se hicieron públicos los primeros resultados del tratamiento digital de la señal aplicado a audio, básicamente orientado a su almacenamiento. El CD estaba viendo la luz. Convertir un sonido (una magnitud física que puede adoptar cualquier valor en cualquier momento) en una serie de 0 y 1 (dos únicos valores, conocidos) permitía corregir con facilidad cualquier ruido añadido:



En el caso de la señal analógica, viendo la señal recibida, no se puede deducir cuál ha sido la señal emitida. En cambio, en el caso de la señal digital, como se conocen los valores enviados, se establece un umbral en el punto medio entre los dos valores y se decide que todo lo que esté por encima corresponde a un 1 y todo lo que esté por debajo, a un 0.

Si el ruido que se ha añadido es superior a la diferencia entre el valor original y el umbral, se produce un error de recepción: se decide que se había enviado el valor equivocado. Las técnicas para luchar contra este tipo de errores se verán más adelante.

El descubrimiento del procesamiento digital de la señal, así como sus aplicaciones en los campos del sonido y la imagen, ha constituido un hito capital en el mundo de las comunicaciones. Básicamente, ha permitido reducir drásticamente el efecto del ruido, lo que ha posibilitado, por un lado, incrementar la calidad de recepción de las señales y, por el otro, aumentar la velocidad de transmisión con los mismos medios.

Las compañías telefónicas empezaron a sustituir los enlaces internos (entre centrales) por señales digitales, pero manteniendo el bucle de abonado (línea y terminal) analógico. La digitalización de la señal de sonido se lleva a cabo dentro de la central local, después del filtro de 4 kHz, y se vuelve a pasar a analógica en la central correspondiente al otro extremo de la comunicación.

Ello ha hecho cambiar sustancialmente los procesos de conmutación: ahora debe trabajarse con bits y, por tanto, las centrales electromecánicas deben sustituirse por ordenadores.

Esta digitalización de la parte interna de la red de voz hizo que, de algún modo, las dos redes, la telefónica y la de datos, confluyeran: los enlaces digitales entre centrales se utilizaban indistintamente para paquetes de datos y para transmisiones de voz.

1.4.1. La red digital de servicios integrados

Una vez digitalizada la red telefónica, el paso siguiente debía ser llevar la transmisión de bits hasta las casas. Ello permitía, por un lado, ofrecer a los usuarios en su casa la transmisión de datos además de la tradicional de voz y, por otro, ofrecer a los abonados un abanico de nuevos servicios asociados a una comunicación enteramente digital de punta a punta. Este servicio de transmisión digital por medio de la red telefónica se conoce como red digital de servicios inte-

grados (RDSI⁹). Ofrece dos canales independientes de 64 kbps, que permiten hablar y conectarse a Internet simultáneamente, o, con el hardware adecuado, aprovechar los dos canales juntos para navegar a 128 kbps.

1.5. La banda ancha

El uso de la red telefónica para transmitir datos tiene una limitación importante por lo que respecta al máximo de bits por segundo permitidos y las redes específicas de datos son muy caras para el uso doméstico. Desde la década de los noventa, se han estudiado maneras de llevar hasta las casas o las empresas un buen caudal de bits por segundo (banda ancha) a un precio razonable, de manera que las nuevas aplicaciones multimedia se puedan explotar al máximo.

Para conseguir esta banda ancha, se han seguido dos caminos completamente diferentes. Por lo que respecta al primero, se han promovido cableados nuevos con fibra óptica que permitan este gran caudal, con frecuencia llevados a cabo por empresas con afán competidor contra los monopolios dominantes. Estas redes se aprovechan para proporcionar un servicio integral: televisión, teléfono y datos.

En cuanto al segundo, las compañías telefónicas de toda la vida han querido sacar partido del cableado que ya tienen hecho y, por ello, se han desarrollado las tecnologías ADSL, que permiten la convivencia en el bucle de abonado de la señal telefónica y una señal de datos que puede llegar a los 8 Mbps (o 20 Mbps con tecnología ADSL+).

Banda estrecha o banda ancha

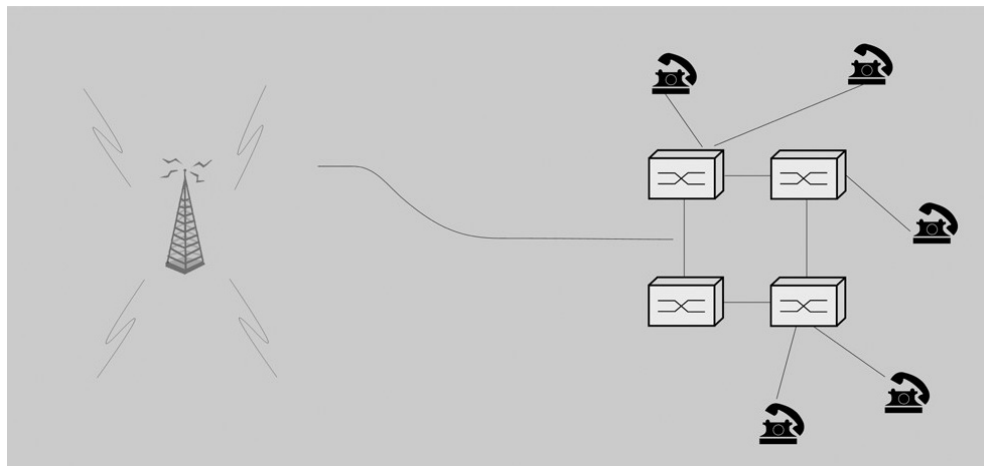
La frontera entre banda estrecha y banda ancha no está muy clara. Los 128 kbps de la RDSI se consideran banda estrecha y había quien calificaba de banda ancha a los 256 kbps de la ADSL en sus inicios.

Realmente, se considera banda ancha a partir de 1 Mbps.

9. RDSI. La red digital de servicios integrados (RDSI) corresponde a las siglas en inglés ISDN (*integrated services digital network*).

1.6. La telefonía móvil

La telefonía móvil, todo un fenómeno sociológico actual, ha vivido una evolución fulgurante: en menos de veinte años, ha pasado de la nada a constituir una tecnología de uso diario para más de un 80% de la población. En el 2006, el número de hogares con móvil en España superó por primera vez a los que tienen fijo.



Desde el punto de vista de sistema de comunicación, debemos ver los móviles como una extensión de la red telefónica convencional.

El sistema GSM, que constituye el actual estándar europeo, permite el acceso a la red de voz, cambiando el bucle de abonado: en lugar de ser un cable, es un enlace radioeléctrico entre una antena y el móvil. Se trata, por tanto, de una red de conmutación de circuitos y se continúa fijando la tarifa por tiempo de conexión.

El estándar GPRS permite el transporte de bits, pagando por tráfico en lugar de por tiempo. Por tanto, es aproximadamente el clónico de las redes de datos con hilos.

El estándar UMTS, también conocido como tercera generación (3G), permite transferencias del orden de megabits por segundo, necesarias para disponer de aplicaciones multimedia en el móvil. Sin embargo, requiere nuevas antenas y terminales.

2. Las redes de gran alcance

Como veíamos en el apartado anterior, las redes de conmutación de paquetes aparecieron para proporcionar transmisión de información a larga distancia sin tener que utilizar la red telefónica. Ahora veremos en este apartado los principios de funcionamiento de las redes de paquetes y cuáles son las principales diferencias con las redes de conmutación de circuitos.

2.1. Conmutación de circuitos

La conmutación de circuitos consiste en establecer un camino físico continuo a través de la red entre las dos estaciones que se quiere comunicar, como si fuera una línea punto a punto.

Este camino estará compuesto por diferentes enlaces entre los nodos, y hay que crearlo antes de iniciar la transmisión de los datos y deshacerlo al acabarla. De este modo, en todas las conexiones podemos distinguir tres fases:

- Establecimiento del circuito. Lo primero que debe hacerse es encontrar un camino a través de la red entre las dos estaciones. La estación de origen lo pide al nodo al que está conectada. Éste traslada la petición a uno de los nodos a los que está conectado; éste, a otro y así sucesivamente hasta llegar a la estación de destino. A medida que la petición va pasando por los nodos, se va componiendo el circuito. Si la estación de destino acepta la conexión, envía una señal a la estación de origen para indicárselo.
- Transferencia de datos. Una vez establecido el circuito, las dos estaciones se comportan como si hubiera un enlace punto a punto entre las mismas. La información se transmite sobre este circuito.
- Desconexión. Acabada la conexión, hay que liberar los recursos que se han utilizado (los enlaces entre nodos y dentro de los nodos) para que puedan ser utilizados en conexiones posteriores.

La figura siguiente representa un diagrama de tiempo. En horizontal tenemos el paso del tiempo, mientras que en vertical tenemos la distancia. Así, las líneas

inclinadas simbolizan el viaje de los datos desde un punto a otro. La inclinación da idea de la velocidad de transmisión: cuanto más vertical es la línea, menos tiempo para el mismo espacio y, por lo tanto, más velocidad de transmisión. Simbolizamos la presencia de nodos intermedios entre origen y destino con las líneas horizontales.

La figura siguiente ilustra estas tres fases:

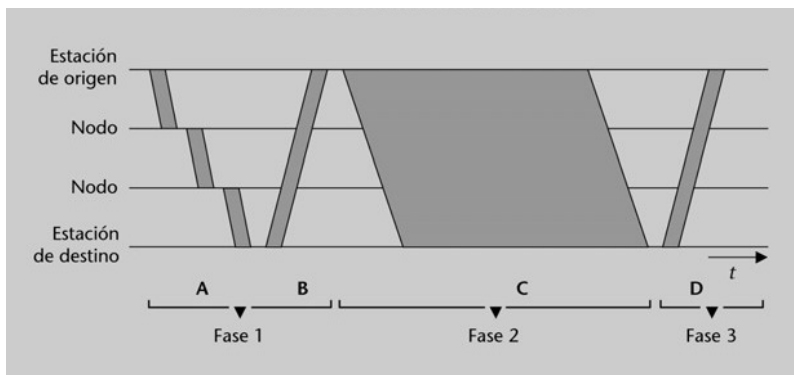


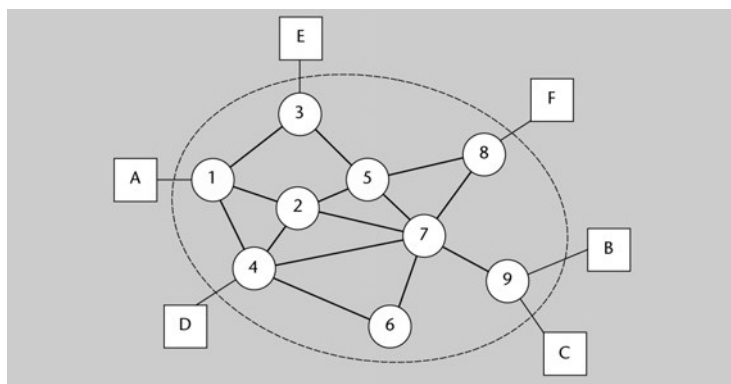
Diagrama de tiempo de una conexión mediante una red de conmutación de circuitos.

Para acabar, presentamos las tres características más importantes de este tipo de redes:

- Una vez establecido el circuito, la red no afecta en nada a la conexión, y la transferencia de datos tiene lugar como si se tratara de una línea punto a punto. Entre las estaciones se establece un circuito de datos, igual que si estuvieran conectadas directamente.
- Una vez establecido el enlace entre las dos estaciones, los recursos que lo forman están ocupados aunque no haya transferencia de datos, hasta que se solicite explícitamente el final de la conexión. Esto puede provocar un uso ineficiente de la red si el porcentaje del tiempo total de conexión durante el cual realmente se transfiere información es bajo.
- Las redes de conmutación de circuitos pueden presentar bloqueo. Esto sucede cuando, en situaciones de carga alta, hay tantos recursos ocupados que dos estaciones no se pueden conectar porque no hay camino posible dentro de la red.

2.1.1. Conmutación de mensajes

Supongamos que dos estaciones, A y B, se quieren intercambiar mensajes y que se dispone de la red que se muestra en la figura siguiente:



Ejemplo de red de conmutación.

Si la red fuera de conmutación de circuitos, habría que buscar un camino entre A y B (por ejemplo, a través de los nodos 1, 2, 7 y 9); y, una vez establecida, las estaciones empezarían a transmitir los datos.

Supongamos ahora que A, en lugar de esperar a que se haya establecido el camino completo entre los dos extremos, envía un mensaje entero al nodo 1. Éste lo almacena y a continuación lo transmite al nodo 2. Una vez la estación A ha enviado el mensaje entero al nodo 1, no hay que mantener ocupado este enlace, se puede liberar y volverlo a ocupar cuando A tenga otro mensaje a punto para B. Lo mismo se puede decir para el enlace entre los nodos 1 y 2: una vez el nodo 2 ha recibido el mensaje, el enlace entre los dos ya se puede liberar. El proceso sigue (de 2 a 7, de 7 a 9) hasta que el nodo 9 envía el mensaje a su destinatario, la estación B.

El procedimiento en el sentido contrario es idéntico: B entrega el mensaje que quiere enviar a A al nodo 9; el 9, al 7; el 7, al 2; el 2, al 1, y finalmente el 1, a la estación A.

Si ahora A quisiera enviar otro mensaje a B, se repetiría todo el proceso.

De esta manera, se consigue lo que se perseguía: los enlaces sólo están ocupados el tiempo que realmente se utilizan y, por lo tanto, la eficiencia es superior.

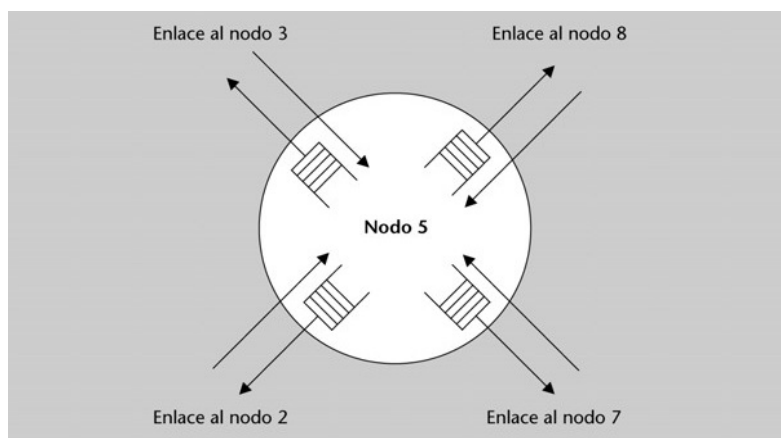
Además, no es necesario que estén disponibles todos los nodos: mientras la estación A transmite el mensaje al nodo 1, el enlace entre el 7 y el 9 puede estar totalmente ocupado por otras conexiones. Cuando el mensaje llegue al nodo 7, éste lo almacenará y esperará a que se libere uno de los canales del enlace hacia el nodo 9 para poder enviarlo.

La técnica que acabamos de describir se denomina conmutación de mensajes, como analogía de la conmutación de circuitos que hemos visto antes, porque los nodos envían mensajes de un enlace a otro. En este caso, sin embargo, no se utilizan elementos electromecánicos.

La conmutación de mensajes se basa en el almacenamiento y la retransmisión; por este motivo, en inglés se denomina *Store & Forward*. Esta técnica es la misma que se aplica en el sistema postal. Se lleva la carta a un buzón, en el que queda depositada temporalmente; un funcionario la lleva a un centro de clasificación, de éste se lleva a otro... hasta que el cartero la deja en casa del destinatario.

Los nodos de una red de conmutación de mensajes son ordenadores con capacidad de proceso y con una memoria estructurada en forma de colas, una en cada enlace de salida. Cuando llega un mensaje, el nodo decide por qué enlace tiene que salir y lo deja en la cola correspondiente, en la que espera el turno para ser enviado.

La figura siguiente muestra un esquema de cómo sería uno de los nodos de conmutación de mensajes de la red que acabamos de ver:



Esquema del nodo 5 de la red de conmutación de mensajes.

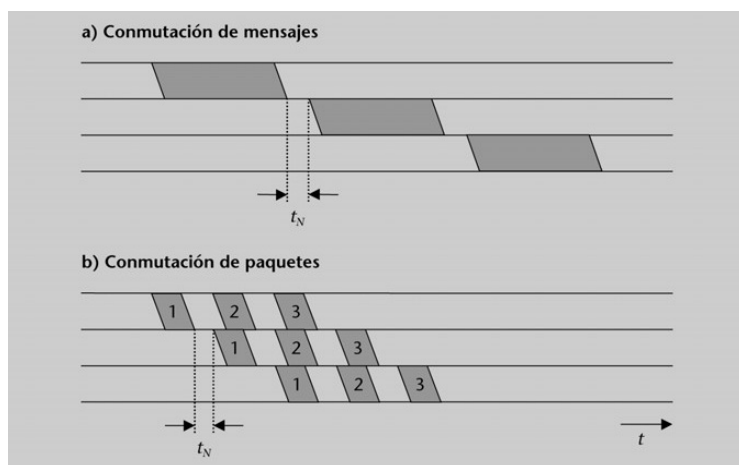
Es evidente que los enlaces que forman un camino trabajan de manera totalmente independiente unos de otros. Las estaciones no están conectadas directamente y, por lo tanto, pueden trabajar con diferentes velocidades de transmisión.

Esta técnica de la conmutación de mensajes, sin embargo, no se utiliza mucho tal y como se ha descrito porque presenta un inconveniente importante: cada nodo involucrado en la conexión tiene que esperar hasta haber recibido todo el mensaje para decidir hacia dónde lo transmite y almacenarlo en la cola de salida correspondiente, en la que el mensaje esperará a que los que tiene delante sean enviados.

Esto tiene una doble implicación:

- a) La cantidad de memoria necesaria en cada nodo puede ser muy grande si los mensajes que las estaciones se intercambian lo son¹⁰. Se necesita memoria de trabajo del ordenador en el que residen los programas en ejecución y los datos que manipulan, y también memoria para las colas de salida.
- b) El tiempo que los mensajes tardan en atravesar la red no es sólo el tiempo de propagación por los enlaces: hay que añadir los tiempos de procesamiento dentro de los nodos y los tiempos de espera dentro de las colas. Esto puede significar un retardo considerable, si consideramos que en conmutación de circuitos sólo cuenta el tiempo de propagación.

2.1.2. Conmutación de paquetes



Comparación entre conmutación de mensajes y de paquetes.

10. No es exagerado pensar en mensajes de 1MB o más.

Con el fin de evitar los inconvenientes de la conmutación de mensajes, en la práctica se dividen los mensajes en trozos de unos pocos bytes denominados paquetes. De esta manera, se reduce drásticamente, por un lado, la memoria necesaria para almacenamiento y, por otro, el tiempo de procesamiento dentro de los nodos, con la consiguiente reducción del retardo acumulado dentro de la red.

- En el esquema a) de la figura podemos ver que el mensaje va pasando por los nodos hasta llegar a su destino. En este caso, cada nodo tiene que esperar a recibir todo el mensaje para enviarlo al siguiente.
- En el esquema b) el mensaje se ha dividido en tres paquetes; de esta manera, los nodos pueden empezar a transmitir cada paquete sin esperar a tener todo el mensaje.

El intervalo de tiempo t_N de los dos esquemas incluye el tiempo de proceso y el tiempo de espera del mensaje o del paquete en la cola correspondiente de salida.

Hay que observar que, si se quiere hacer un diagrama de tiempo de una situación real y se quiere guardar unas proporciones entre las diferentes magnitudes de tiempo, el intervalo t_N normalmente será bastante más largo de lo que muestra la figura.

La conmutación de paquetes es mejor que la conmutación de mensajes en todos los sentidos, pero continúa teniendo un problema que no presenta la conmutación de circuitos. Como hemos visto, los paquetes llegan a su destino con un cierto retardo, a causa del procesamiento que experimentan dentro de los nodos. Además, es muy importante señalar que este retardo es variable, porque las condiciones de la red influyen en todos los paquetes que circulan: los tiempos de espera en las colas de salida de los nodos no tienen por qué ser iguales durante toda la conexión. Por este motivo las redes de conmutación de paquetes no son adecuadas para aplicaciones de tiempo real o para situaciones en las que es necesario un flujo de datos constante.

Por otra parte, las redes de conmutación de paquetes no presentan bloqueo, porque no hay que asegurar la disponibilidad de todos los recursos necesarios antes de empezar la transmisión de datos.

El efecto que produce el incremento de tráfico en estas redes es un aumento del retardo global, porque las esperas en las colas son más elevadas. Si las condiciones empeoran, se puede producir congestión.

2.2. Datagramas y circuitos virtuales

Los nodos tienen que decidir hacia cuál de los otros nodos a los que están conectados envían los paquetes que les llegan. Esta decisión se puede tomar para cada paquete que forma el mensaje, o bien se puede tomar al principio; es decir, se puede decidir una ruta antes de empezar la transmisión, y entonces hacer que todos los paquetes que forman el mensaje o conexión la sigan. Estas dos posibilidades dan lugar a dos tipos diferentes de redes de conmutación de paquetes:

1) La primera posibilidad, decidir para cada paquete, da lugar a las redes de conmutación de paquetes en modo datagrama.

La técnica de conmutación de paquetes en modo datagrama consiste en encaminar cada uno de los paquetes independientemente de los otros.

Esto hace que los paquetes que forman un mensaje puedan seguir caminos diferentes y, si experimentan retardos distintos, puedan llegar al receptor desordenados. Entonces las estaciones deben encargarse de reordenarlos para obtener el mensaje tal y como se envió.

2) La segunda posibilidad, decidir la ruta al principio, da lugar a las redes de conmutación de paquetes en modo circuito virtual.

La técnica de conmutación de paquetes en modo circuito virtual consiste en elegir el camino por el cual pasarán todos los paquetes a través de la red antes de empezar una conexión.

De esta manera, los nodos no tienen que tomar decisiones de encaminamiento para cada paquete, y el receptor los recibirá siempre en el orden en el que fueron enviados. Es como un circuito físico, pero sin establecerlo realmente; por este motivo se habla de conexión lógica o circuito virtual.

En modo circuito virtual también se pueden distinguir las tres fases que hemos visto en conmutación de circuitos: establecimiento del circuito, transmisión de los datos y liberación del circuito, mientras que en modo datagrama no son necesarios ni el establecimiento ni la liberación, porque no hace falta un circuito (real o virtual) prefijado, lo cual los hace particularmente interesantes para transmitir mensajes cortos.

Los enlaces entre nodos están multiplexados con la técnica llamada STDM. Esto permite que por estos enlaces puedan pasar simultáneamente comunicaciones diferentes. En nuestro caso, estas comunicaciones se corresponden con los circuitos virtuales.

Dado que un enlace puede soportar diferentes circuitos virtuales, se tienen que distinguir de alguna manera. Esto se hace con el número del canal que ocupan dentro del enlace.

El circuito virtual entre la estación de origen y la estación de destino está definido por los enlaces que atraviesa y por el canal que ocupa en cada uno de los mismos.

En conmutación de datagramas, si un nodo (o un enlace) deja de funcionar, la red hace que los paquetes circulen por otro tramo y así no se pierde la conexión. En los circuitos virtuales, en cambio, la estación de origen debe restablecer el circuito para poder continuar la comunicación.

Se dice que las redes que trabajan con la técnica de datagramas ofrecen un servicio no orientado a conexión, mientras que las que trabajan con circuitos virtuales ofrecen un servicio orientado a conexión.

Aunque de entrada pueda parecer más conveniente que la red se encargue de todo y ofrezca un servicio orientado a conexión, muchas veces es preferible la flexibilidad y la sencillez de un servicio no orientado a conexión, dejando para niveles superiores al de red, en el caso de que sea necesario, las pesadas tareas del control de errores y de la reordenación. De esta manera, se traspasa trabajo de los nodos a las estaciones y la red puede operar de manera más eficiente. Además, en niveles superiores se dispone de los dos tipos de servicios y se puede elegir el más adecuado para cada aplicación.

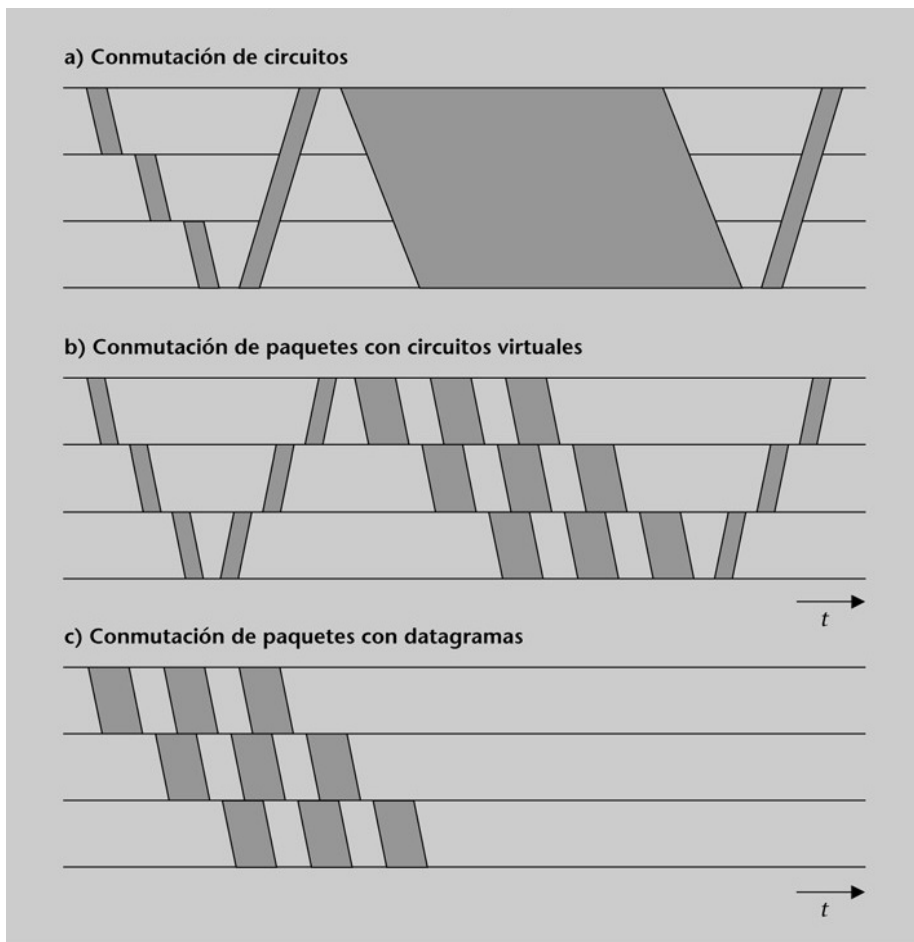
2.3. Comparación entre conmutación de circuitos y conmutación de paquetes

Ahora que hemos visto los principios básicos de funcionamiento de las redes de conmutación de circuitos y de los dos tipos de redes de conmutación de paquetes (datagramas y circuitos virtuales), podemos resumir las características principales. Veámoslas en la tabla y en la figura siguientes:

	Circuitos	Paquetes	
		Circuitos virtuales	Datagramas
Recursos	Dedicados para toda la conexión	No dedicados	No dedicados
Camino	Lo mismo para toda la conexión	Lo mismo para todos los paquetes de la conexión	Puede ser diferente
Transmisión	Continua	En paquetes	En paquetes
Establecimiento del camino previo a la transmisión	Sí	Sí	No
Retardo en la transmisión	No	Sí	Sí
Efectos de una sobrecarga	Bloqueo	Bloqueo y aumento del retardo	Aumento del retardo
Conversión de velocidad	No posible	Posible	Posible
Información de control añadida forzada por la red	No	Sí	Sí

Comparación entre las distintas técnicas de conmutación.





Comparación de los tres tipos de comunicación.

Esta figura pretende poner de manifiesto las diferencias de funcionamiento de las redes de conmutación de circuitos y de paquetes, pero no compara prestaciones. Esto sólo se puede hacer si se tienen en cuenta una serie de factores de la red como la topología, el tamaño, el nivel de carga, etc., que aquí no están reflejados.

- El esquema a) muestra una conexión mediante una red de conmutación de circuitos y las tres fases de las que se compone: establecimiento de llamada, información y liberación.
- El esquema b) muestra el funcionamiento de una red de conmutación de

paquetes con circuitos virtuales. También se pueden distinguir tres fases, pero la transferencia de información se hace con paquetes que sufren un retardo en cada nodo intermedio.

- El esquema c) muestra que la conmutación de datagramas no necesita la fase de establecimiento ni la de liberación.

2.4. Encaminamiento

El camino que seguirán los paquetes para llegar a su destino es fruto de las decisiones que toman los nodos de la red. Hay diferentes posibilidades con respecto a cuándo, dónde y cómo tomar estas decisiones, que se traducen en diferentes estrategias de encaminamiento:

1) La decisión de *cuándo* establece dos posibilidades que ya hemos visto:

- En la técnica de datagramas se decide para cada paquete.
- En la técnica de circuitos virtuales se decide durante el establecimiento del circuito.

2) La decisión de *dónde* establece tres posibilidades:

- En todos los nodos (encaminamiento distribuido).
- En el originador del paquete (encaminamiento de fuente).
- En un nodo especializado de la red (encaminamiento centralizado).

3) La decisión de *cómo*, es decir, qué criterio se aplica para elegir el camino, establece dos posibilidades:

- El camino más corto. En este caso, la ruta que se elige es la que incluye el menor número de saltos entre nodos. Se trata de un criterio bastante fácil de medir y pretende minimizar el número de recursos utilizados.
- El coste más bajo. El criterio anterior no tiene en cuenta las características particulares que pueden tener los enlaces entre nodos. El criterio del coste más bajo asigna a cada enlace un coste proporcional a alguna característica, como la velocidad de transmisión o el retardo medio en la cola de entrada, y busca la ruta que presenta el coste total más bajo. En el primer caso conseguimos maximizar el rendimiento de la red (o *throughput*), y en el segundo, minimizar el retardo total que experimentan los paquetes.

Un aspecto muy importante de las diferentes estrategias de encaminamiento que se han desarrollado es saber si se adaptan o no a cambios de la red, que pueden ser de topología o de carga. Este criterio permite clasificar las estrategias en dos grupos:

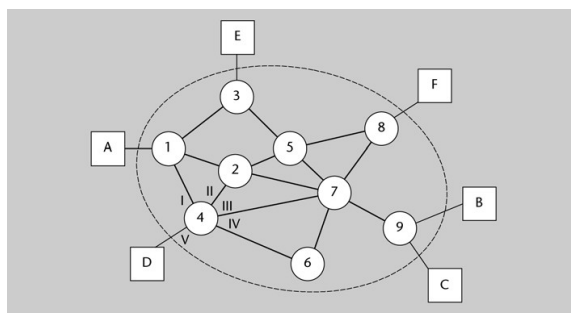
- Estrategias de encaminamiento adaptativas, que varían si hay cambios en la red.
- Estrategias de encaminamiento no adaptativas, que no varían a lo largo del tiempo.

Las segundas son más sencillas de implementar, pero en la práctica, hechos como la caída de un nodo o la sobrecarga de uno o distintos enlaces son bastante habituales, y esto hace que en la mayoría de los casos se utilice alguna estrategia adaptativa por la capacidad que tienen de reaccionar a estos cambios.

2.4.1. Encaminamiento no adaptativo. Encaminamiento estático

La estrategia de encaminamiento estático consiste en decidir los caminos que se utilizarán para todas las conexiones posibles; es decir, para cada par de estaciones, en el momento en el que se crea la red.

Para decidir los caminos que se tienen que seguir, se puede aplicar tanto el criterio del coste mínimo como el del camino más corto. No es necesario guardar la información de los caminos enteros: sólo hay que saber, para cada nodo, cuál es el salto siguiente que deben hacer los paquetes, y cada nodo sólo es preciso que tenga información referente a sí mismo. Como ejemplo, supongamos que tenemos la red de la figura “Ejemplo de red de conmutación”, y planteémonos cómo sería la tabla de encaminamiento del nodo 4:



Red con detalles de los puertos de salida del nodo 4.

Una posible tabla correspondiente a este nodo sería la siguiente:

Destino	Puerto de salida
A	I
B	III
C	III
D	V
E	I
F	III

Tabla del nodo 4.

Por cada paquete que recibe, el nodo consulta la tabla para saber qué tiene que hacer. Si, por ejemplo, recibe un paquete destinado a la estación B, la tabla le dice que debe enviarlo por el puerto III. Si recibe un paquete para la estación D, la tabla le dice que lo envíe por el puerto V, que es el que corresponde al enlace que lo une directamente a la misma.

La ventaja de este algoritmo es que resulta muy fácil de implementar, pero tiene un inconveniente muy grande: su inflexibilidad. No tiene en cuenta posibles caídas de nodos de la red, ni cambios de la topología, ni la evolución del tráfico.

Hay una variante de este algoritmo que pretende mitigar la inflexibilidad de manera que la carga se pueda repartir entre diferentes enlaces, y la red, en general, sea menos vulnerable a la caída de enlaces o de nodos: el *algoritmo de caminos múltiples*. Este algoritmo se caracteriza por el hecho de que las tablas, en lugar de indicar una sola salida posible, presentan diferentes opciones que el nodo elegirá según los criterios siguientes:

- a) Con la filosofía del turno rotatorio o *round-robin* (es decir, rotatoriamente entre las distintas opciones).
- b) De manera aleatoria.
- c) De manera aleatoria, pero asignando a cada opción una probabilidad, para que las opciones más idóneas se elijan más a menudo.

Flooding

El encaminamiento por *flooding* consiste en que cada paquete que llega a un nodo se envía a todos sus vecinos.

Literalmente, cuando se quiere enviar un paquete de un punto a otro de la red, ésta es inundada con réplicas del paquete.

Este algoritmo es muy sencillo. No requiere el uso de tablas y, además, soporta de manera óptima la caída de nodos o los cambios de la topología. El inconveniente principal es que la red se carga mucho porque circulan múltiples copias de todos los paquetes simultáneamente.

Gestión de bucles cerrados

Si la red tiene bucles cerrados, y no se toman medidas, se colapsa enseguida, porque se generan copias de paquetes continuamente. Una manera sencilla de evitarlo es poner un contador de saltos en cada paquete. Se puede inicializar a un valor máximo de la red, como por ejemplo el diámetro (definido como la longitud del camino más largo de entre todos los de mínimo número de saltos), y cada vez que un nodo conmuta un paquete hace que el contador disminuya una unidad. Cuando el contador llega a cero, el nodo lo descarta.

Los receptores pueden recibir muchas copias del mismo paquete. Por lo tanto, se tienen que identificar y en el momento de la recepción hay que descartar todos los que sean iguales a uno que ya se haya recibido. Este identificador debe ser único en toda la red. Lo más sencillo es que cada estación asigne a los paquetes un número a partir de un contador, y que el identificador único sea la concatenación de la dirección del nodo de origen más este número.

El *flooding* es un método muy robusto porque se prueban todas las rutas posibles entre el origen y el destino. Aunque un segmento de la red desaparezca, el resto de los nodos puede seguir en comunicación mientras haya un camino posible. Por ello se puede utilizar en situaciones en las cuales la robustez es importante, como aplicaciones militares o redes cuya topología sea muy cambiante.

Al probarse todos los caminos posibles para cada conexión, es seguro que se encuentra el de mínimo retardo, lo cual confiere a esta estrategia una utilidad interesante: se puede utilizar para establecer un circuito virtual entre dos nodos a través del camino más corto.

Una situación en la que se utiliza el *flooding* porque la topología es muy cambiante es en una red que no es de gran alcance: la interconexión de LAN con puentes (*bridges*).

2.4.2. Encaminamiento adaptativo

Para que los algoritmos se puedan adaptar a las condiciones de trabajo, es necesario que los nodos se intercambien información sobre el estado de la red. Esto se convierte en un compromiso porque, cuanto más información se intercambien y más frecuentemente, mejores serán las decisiones que se tomen, pero también será mayor el tráfico extra que se introduce en la red y, por lo tanto, el rendimiento será peor.

Una buena manera de clasificar las estrategias de encaminamiento adaptativo es en función de dónde se obtiene la información: del mismo nodo, de todos los nodos de la red o de los nodos vecinos. Consideremos cada una de estas estrategias:

1) La primera estrategia casi no se utiliza, porque no tiene en cuenta el estado del resto de los nodos de la red y, por lo tanto, las decisiones que se toman se suelen adaptar a los cambios que se puedan dar fuera del nodo considerado.

2) La segunda estrategia no se suele aplicar en redes de un gran número de nodos porque el tráfico extra de información de encaminamiento a intercambiar puede ser excesivo.

3) En la práctica, la mayor parte de las estrategias de encaminamiento que se utilizan son variantes de la tercera posibilidad. De hecho, aunque la información que reciba un nodo en un instante proceda sólo de sus vecinos inmediatos, de alguna manera también está recibiendo información del resto de los nodos porque su vecino anteriormente la había recibido de sus otros vecinos. La diferencia radica en el tiempo que necesita un nodo para tener información de la totalidad de la red: si este tiempo es largo, puede pasar que la adaptación a los cambios sea muy lenta.

A continuación veremos la estrategia de encaminamiento adaptativo distribuido, basada en esta tercera posibilidad.

Encaminamiento adaptativo distribuido

El encaminamiento adaptativo distribuido se basa en que los nodos elaboran las tablas de encaminamiento a partir de la información que reciben periódicamente de sus vecinos inmediatos. La información se basa en un parámetro de calidad de la red, el que viene definido por el criterio de selección de caminos. Las tablas de encaminamiento se actualizan en cada intercambio de información, para contener siempre los mejores caminos posibles según el parámetro de calidad elegido.

Veamos el funcionamiento de esta estrategia con un ejemplo.

Supongamos que tenemos la red de la figura “Red con detalle de los puertos de salida del nodo 4”. Cada nodo mantiene una tabla en la que figuran, para cada estación posible de destino, el puerto de salida y el parámetro de calidad.

Si se utiliza el número de saltos como parámetro de calidad, se puede suponer que el nodo 4 tendrá, en algún momento, la tabla de encaminamiento siguiente:

Destino	Puerto de salida	Salto
A	I	2
B	III	3
C	III	3
D	V	1
E	II	4
F	III	3

Tabla de encaminamiento del nodo 4.

Esta tabla dice, por ejemplo, que para llegar a la estación E, los paquetes deben salir por el puerto II y que la distancia hasta la estación de destino es 4.

Cada nodo tiene que ser capaz de medir la distancia hasta sus vecinos. En el caso de utilizar el criterio del camino más corto, esta distancia siempre vale 1. En el caso de utilizar el retardo, una forma de medir esta distancia puede ser la ocupación en bits de la cola de salida correspondiente al enlace, dividida por la velocidad de transmisión, v_t .

Para poder adaptarse a posibles cambios que hayan sucedido, cada cierto intervalo fijo de tiempo los nodos intercambian con sus vecinos las tablas con las distancias hasta las estaciones de destino.

Puesto que el nodo 4 conoce la distancia a la que se encuentra de sus vecinos, puede complementar las tablas recibidas añadiéndoles estas distancias. De esta manera, conocerá la distancia que le separa de cada estación. Finalmente, se comparan los valores antiguos con los nuevos y, si se obtiene una ruta mejor, se actualiza la tabla.

Por ejemplo, supongamos que el nodo 4 recibe de su vecino 1 la información siguiente:

Destino	Salto
A	1
B	4
C	4
D	2
E	2
F	4

A partir de esta información, sabe que la distancia hasta la estación E, a través del nodo 1, es de 2 (según la tabla) más 1 (distancia desde 4 hasta 1). Por lo tanto, la distancia total hasta la estación E, calculada a través del nodo 1, es de 3, mientras que la información original era la siguiente: distancia 4 a través del nodo 2. El nodo 4 modifica la entrada de su tabla correspondiente a la estación E.

A partir de este momento, los paquetes que reciba el nodo 4 para la estación E se enviarán al nodo 1, porque es el camino más corto. La nueva tabla de encaminamiento asociada al nodo 4 es la que vemos a continuación:

Destino	Puerto de salida	Salto
A	I	2
B	III	3
C	III	3
D	V	1
E	I	3
F	III	3

Tabla de encaminamiento del nodo 4.

El encaminamiento en Internet

La estrategia de encaminamiento adaptativo distribuido se diseñó para ARPANET, la red de conmutación de paquetes precursora de la actual Internet, y que utilizaba como criterio de selección la estimación de retardos en lugar del número de saltos.

Al cabo de unos cuantos años de experiencia, y al evidenciarse sus inconvenientes, fue sustituida por otra muy diferente. Ésta, sin embargo, hacía empeorar el rendimiento a medida que aumentaba la carga de la red y, por ello, hubo un tercer cambio en el que se varió la función que calcula los retardos previstos.

Por este motivo, se dice que hoy estamos en la tercera generación de Internet, en lo que respecta a estrategias de encaminamiento.

2.4.3. Encaminamiento jerárquico

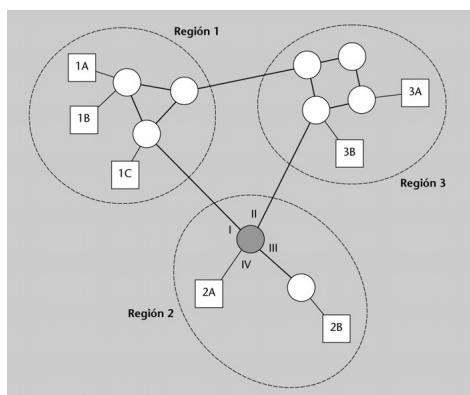
Todas las estrategias que hemos visto hasta ahora tienen un mismo problema: si la red crece, las tablas de cada nodo crecen y el trabajo para mantenerlas actualizadas es cada vez más pesado.

Una posible solución es el encaminamiento jerárquico.

El encaminamiento jerárquico consiste en dividir la red en regiones, que también se denominan *subredes*.

Con esta estrategia, las tablas de cada nodo sólo necesita tener una entrada para todas las estaciones que pertenecen a una región diferente de la propia. Incluir en la dirección de la estación una referencia a la región a la que pertenece hace más rápida la consulta de las tablas y, por lo tanto, el encaminamiento de los paquetes.

Consideremos un ejemplo en el que tenemos una red dividida en subredes, como se ve en la figura siguiente:



Direccionamiento jerárquico.

Ésta sería la tabla correspondiente al nodo marcado, si no se estableciera la subdivisión en regiones:

Destino	Puerto de salida
1A	I
1B	I
1C	I
2A	IV
2B	III
3A	II
3B	II

Ahora bien, si se agrupan las estaciones en regiones, la tabla del mismo nodo quedaría de la manera siguiente:

Destino	Puerto de salida
1	I
2A	IV
2B	III
3	II

En este ejemplo las direcciones se han designado siguiendo el mismo esquema jerárquico (las estaciones de la región 1 se denominan 1A, 1B, etc.).

Para todas las estaciones que pertenecen a la región 1 o a la 3, sólo hay que mirar una entrada, la que corresponde a su región. Si se añaden estaciones a las regiones 1 y 3, las tablas de los nodos de la región 2 no cambian.

Encaminamiento jerárquico de la red telefónica

La red telefónica utiliza un esquema parecido en la numeración de los abonados. Los números de teléfono están compuestos de grupos de cifras que corresponden a diferentes “regiones”: el que corresponde a la provincia (o al grupo “móviles”), a la central local y al abonado.

Más adelante veremos que el protocolo IP también utiliza un encaminamiento jerárquico; las direcciones de los ordenadores están compuestas de dos partes: el identificador de la subred en la que se encuentran y el identificador del ordenador dentro de la subred.

3. Arquitecturas de protocolos: el modelo OSI

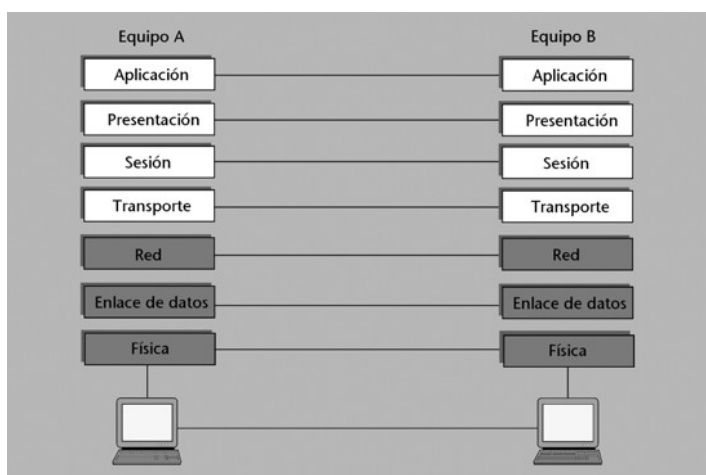
Como ya hemos comentado, cuando el CCITT y la ISO propusieron la torre OSI, en el mercado había muchas arquitecturas de protocolos, unas propietarias, otras abiertas, pero todas diferentes. La torre OSI pretendía ser un modelo básico de referencia, un marco para el desarrollo de estándares que permitieran la interoperabilidad completa. Diferentes razones han hecho que este modelo, así como las normas que del mismo se derivan, no hayan tenido la repercusión que se esperaba, entre las que destacan las siguientes:

- La complejidad del modelo, innecesaria en muchos casos.
- La complejidad de las normas desarrolladas a partir del modelo.
- El impulso del modelo Internet y la simplicidad de sus estándares.

A pesar de que el modelo OSI no se haya impuesto en los desarrollos, es muy útil como referencia para explicar qué debe hacerse y cómo. El hecho de que sea tan completo y cartesiano lo hace muy interesante para la pedagogía de los conceptos básicos de redes, y las arquitecturas que en realidad se utilizan se explican estableciendo una relación constante con el modelo OSI. Por ello, en este apartado explicamos los siete niveles de la torre OSI. A partir del capítulo siguiente, sin embargo, nos centraremos en la arquitectura TCP/IP, la que constituye la red Internet.

3.1. Definición

El modelo básico de referencia OSI, o simplemente modelo OSI, afronta el problema de las comunicaciones de datos y las redes informáticas dividiéndolo en niveles. Cada participante de la comunicación incorpora como mínimo uno de los mismos, y los equipos terminales los incorporan todos.



Los niveles de la torre se comunican en dos direcciones:

- Horizontal. La comunicación horizontal sólo se da entre niveles homónimos. Se podría pensar –y de hecho es así– que todo el nivel constituye un único sistema distribuido que tiene un representante en cada uno de los equipos. Un protocolo de nivel i (en el que i es el identificador del nivel correspondiente) especifica el formato, el significado y la temporización de la información que circula entre los miembros de este sistema distribuido.
- Vertical. La comunicación vertical sólo se da entre niveles adyacentes de un mismo sistema. Este tipo de comunicación posee un carácter totalmente local; es decir, puede materializarse por mecanismos de software (llamadas a liberías, comunicación entre procesos, etc.). De manera genérica, denominaremos estos mecanismos *servicio de nivel i* (en el que i es el identificador del nivel que proporciona el servicio, e $i + 1$, el nivel que lo utiliza).

3.2. Los protocolos

Con los protocolos se pretende la intercomunicación de entidades situadas en máquinas diferentes.

Entendemos por entidad un sistema electrónico y/o informático, ubicado dentro de un nivel del modelo OSI, que, en combinación con las otras entidades del mismo nivel situadas en otros sistemas, forma un todo (un sistema distribuido).

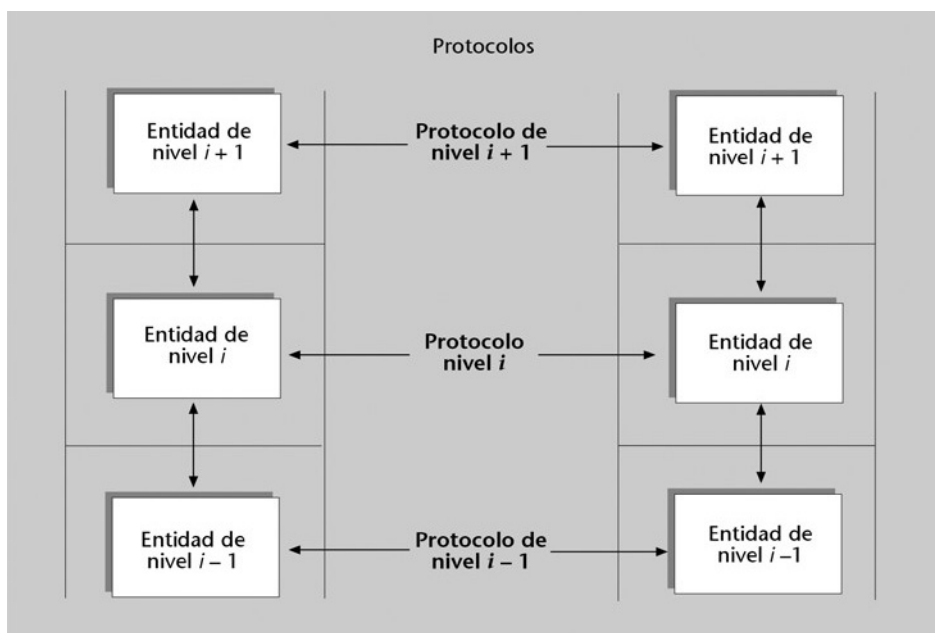
Por tanto, la especificación del protocolo que utilizamos debe llevarse a cabo en un estándar claramente definido que permita a desarrolladores que no trabajan juntos implementarlo de manera totalmente idéntica.

La recepción de una secuencia de bits en un momento inesperado o de una longitud incorrecta, o en una disposición imprevista, puede hacer que la entidad destinataria no reaccione correctamente y deje de inmediato el nivel (las dos entidades que lo forman) en una situación inestable.

Evidentemente, ello no se puede permitir. Por este motivo, la implementación del protocolo debe ser extremadamente esmerada y, por consiguiente, también la especificación del estándar.

En un sistema encontramos tantos protocolos como niveles lo formen.

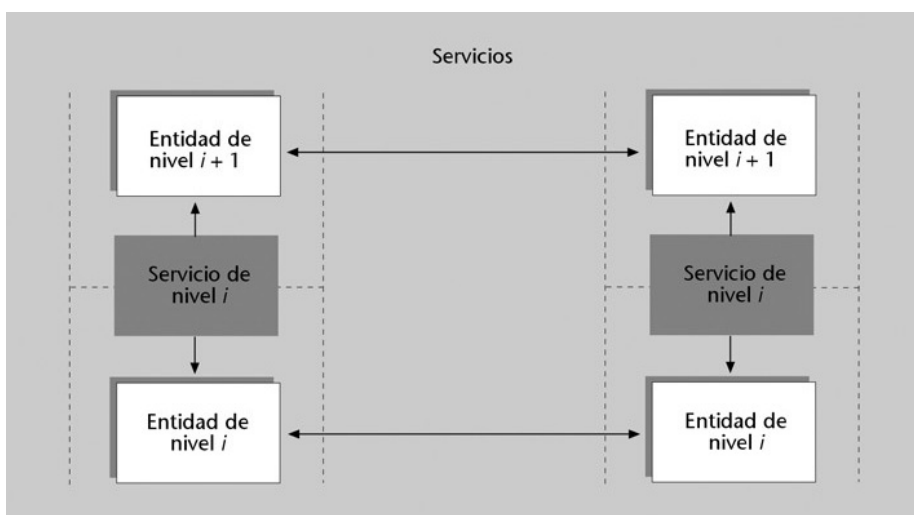
Los sistemas a los que se conecte directamente deberán tener la misma especificación que los estándares para todos los niveles que implemente el protocolo.



3.3. Los servicios

La especificación de un servicio es siempre menos estricta que la de un protocolo. Por *servicio* entendemos la comunicación que se produce dentro de una misma máquina y, por consiguiente, dentro de un único ámbito de responsabilidad. La funcionalidad de las interfaces de cada uno de los niveles (y, por tanto, de las entidades que la implementan), la determinarán los estándares que utilicen; sin embargo, su especificación precisa no es relevante para los estándares involucrados. Cada sistema individual puede materializarlas de una manera u otra según convenga.

Sea como sea, la cantidad de papel que ocupa la descripción de un servicio siempre será muy inferior al que ocupa la especificación de un protocolo.



3.4. Los siete niveles del modelo OSI

3.4.1. Nivel físico

El nivel físico se encarga de las tareas de transmisión física de las señales eléctricas (o electromagnéticas) entre los diferentes sistemas. Las limitaciones del nivel físico (equipos de transmisión y recepción, medios de transmisión, ampli-

ficadores, etc.) imponen otras al resto del sistema: por un lado, limitan la velocidad de transmisión (en bits por segundo) y, por otro, hacen aparecer una probabilidad de error, el porcentaje de bits erróneos que llegan a destino.

La primera limitación es casi insalvable partiendo de un medio de transmisión dado, puesto que los parámetros físicos de este último imponen un límite superior no superable por medio de una mejora tecnológica. Los medios de transmisión poseen una capacidad de transmisión acotada y la electrónica que utilizamos para llevar a cabo las transmisiones en los mismos puede mejorar la velocidad de transmisión, pero no puede superar este límite. Esta limitación viene dada por el ancho de banda, o ancho del espectro eléctrico, que puede atravesar el medio de transmisión (doblar el ancho de banda significa que se puede doblar la velocidad de transmisión) y por la imposibilidad práctica de recibir la señal libre de cualquier interferencia.

La probabilidad de error puede corregirse por medio de algoritmos y protocolos si su valor está contenido. Si las cotas de error son inferiores al 1%, se puede reducir su impacto si se agrupan los bits en pequeños bloques de datos (de este modo, se minimiza la probabilidad de que haya bits erróneos dentro del bloque) y se añade software en el receptor que vigile la corrección de los datos recibidos.

3.4.2. Nivel de enlace

El nivel de enlace proporciona un servicio similar al nivel físico, mejorando las características de fiabilidad de la transmisión. Añade bits adicionales a los que forman el mensaje para poder detectar errores de transmisión en el mismo y poder pedir su retransmisión. Para ello, es preciso conferir una estructura a los bits: se agrupan en bloques denominados tramas, que contienen los bits de mensaje, los bits añadidos para detectar errores y diferentes campos de control, tales como el número de trama.

El transmisor calcula estos bits adicionales a partir del resto por medio de una operación que el receptor conoce y aplica igualmente. Si el receptor detecta una discrepancia entre los bits adicionales (redundantes) y los que ha calculado a partir del resto, detecta que el bloque es erróneo y pedirá una retransmisión del mismo.

La adición de los bits redundantes y su comparación en recepción se denomina *detección de errores*. Los procedimientos de corrección a partir de dicha detección se conocen como *control de errores*.



Además de esta tarea de control de errores, el nivel de enlace lleva a cabo otra importante: el *control de flujo*.

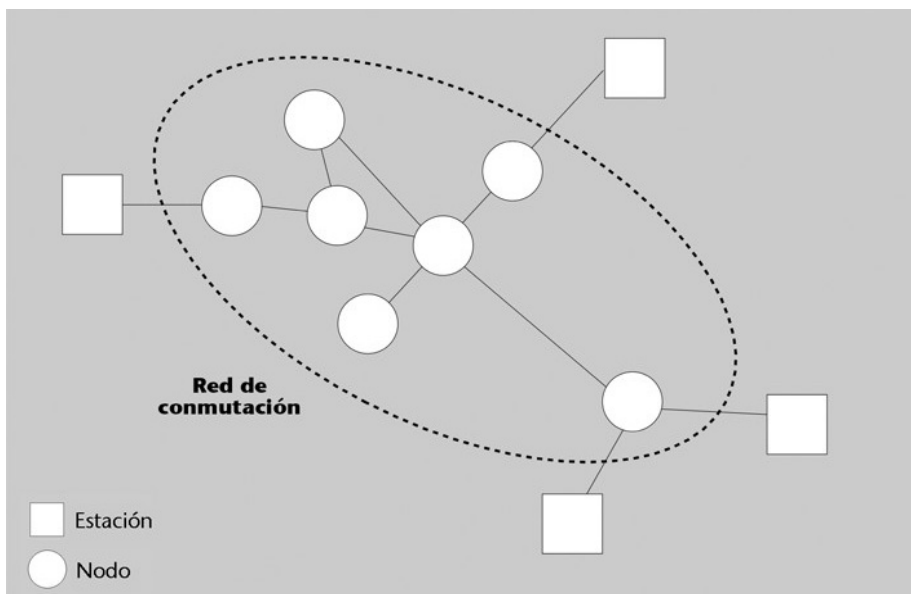
El receptor debe procesar las tramas a medida que las recibe. En algunos casos, este proceso comporta un gasto de tiempo mínimo, teniendo en cuenta la velocidad de transmisión (por ejemplo, guardar los datos en disco); sin embargo, en otros, puede ser costoso. En esta situación, el receptor necesita un mecanismo que notifique al transmisor que momentáneamente detenga la transmisión con el objetivo de disponer del tiempo necesario para llevar a cabo esta tarea.

El nivel de enlace no sólo sirve para controlar líneas punto a punto, sino también para controlar líneas compartidas por diferentes terminales (redes de área local).

3.4.3. Nivel de red

Ya hemos visto que las redes de conmutación de paquetes constituyen el tipo de red más eficiente para transmitir datos desde diferentes puntos de vista: uso de recursos, coste, capacidad de mantener distintas conexiones simultáneas, etc. El modelo OSI, por tanto, sólo habla de redes de conmutación de paquetes.

En el nivel de red se distingue entre estaciones terminales y nodos de conmutación.



Los nodos de conmutación disponen de diferentes enlaces hacia otros nodos o hacia terminales, y son los que permiten que los paquetes viajen por la red desde una estación terminal a otra.

Existen dos tipos de redes de conmutación de paquetes:

- Redes que funcionan en modo datagrama. Podríamos decir que este tipo de redes son las básicas, puesto que incorporan la funcionalidad mínima para que un grupo de nodos y de terminales interconectados puedan hacer pasar información de un punto a otro.

El problema de las redes en modo datagrama radica en la dificultad de garantizar la entrega correcta y completa de la información, puesto que los diferentes paquetes que forman la transmisión no mantienen un vínculo conocido por la red. Los paquetes pueden llegar fuera de orden, duplicados, o incluso se pueden perder sin que la red pueda hacer gran cosa al respecto. Se deja al terminal receptor la responsabilidad de restaurar los posibles daños que haya tenido el paquete durante la transmisión.

- Redes que funcionan en modo circuito virtual. Estas redes pueden garantizar que la entrega de los paquetes sea correcta y completa, y lo hacen aportando el concepto de conexión propio de las redes de conmutación de circuitos. Es el circuito virtual. Este último permite agrupar los paquetes relacionados de manera que el receptor los recibe correctamente sin problemas de orden, pérdida o duplicación.

La asignación de direcciones (*addressing*) es uno de los conceptos básicos del nivel de red. Permite a la red, como sistema distribuido pero único, decidir cuál de los múltiples terminales es el destinatario final.

El encaminamiento (*routing*) constituye el procedimiento que permite a este sistema distribuido conducir la información por los diferentes nodos de origen a destino, minimizando el trayecto y el tiempo de tránsito, optimizando recursos, etc.

3.4.4. Nivel de transporte

El nivel de transporte permite una conexión fiable sobre cualquier tipo de red (fiable o no). En las redes de conmutación de paquetes en modo datagrama es donde este nivel se muestra más importante, puesto que es el responsable de controlar las posibles deficiencias de las transmisiones.

Es importante distinguir una red en modo datagrama con un nivel de transporte de una red en modo circuito virtual sin nivel de transporte (o con un nivel de transporte nulo). En las redes en modo circuito virtual sin nivel de transporte, este nivel y los superiores sólo se implementan en los terminales y no en los nodos. Este punto es capital, puesto que permite que redes “simples” (en modo datagrama) funcionen también como redes más complejas (en modo circuito virtual) simplemente añadiéndole funcionalidad a los extremos. Internet constituye un ejemplo de este razonamiento.

La función principal de este nivel consiste en asegurar la calidad de transmisión entre los terminales que utilizan la red, lo que implica recuperar errores, ordenar correctamente la información, ajustar la velocidad de transmisión de la información (control de flujo), etc.

3.4.5. Niveles de sesión, presentación y aplicación

Estos tres niveles se suelen explicar de manera conjunta, puesto que existen pocos ejemplos prácticos de protocolos de sesión y de presentación y, asimismo, la arquitectura Internet delega todos los trabajos por encima de transporte a la aplicación. No obstante, en el modelo OSI están definidos como tres niveles diferentes e independientes, con atribuciones propias.

El nivel de sesión es, en teoría, el encargado de gestionar las conexiones de larga duración, la recuperación de caídas de red de manera transparente y los protocolos de sincronía entre aplicaciones.

El nivel de presentación se encarga de conseguir que las diferentes plataformas (sistemas operativos, procesadores, etc.) se puedan entender al conectarse por medio de una misma red. Dicho de otra manera, es el encargado de definir una manera universal de codificar la información. Dicha codificación puede poseer propiedades de eficiencia (por medio de la compresión, por ejemplo), propiedades de confidencialidad (por medio de la criptografía), etc.

En el nivel de aplicación residen los programas. En este nivel podemos encontrar servidores, clientes que acceden a estos últimos, aplicaciones que trabajan según un modelo simétrico (*peer-to-peer*), etc.



