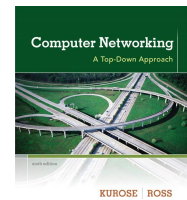


Chapter 4 Network Layer



Computer Networking: A Top-Down Approach
6th edition
Jim Kurose, Keith Ross
Addison-Wesley
March 2012

Nota sobre el uso de estas diapositivas ppt:
Ponemos estas diapositivas a disposición de todos (profesores, estudiantes, lectores). Están en formato PowerPoint para que puedas ver las animaciones; y puedes añadir, modificar y eliminar diapositivas (incluida ésta) y el contenido de las mismas para adaptarlas a tus necesidades. Obviamente, representan mucho trabajo por nuestra parte. A cambio de su uso, ~~si publicas estas diapositivas~~ (por ejemplo, en una clase) que menciones su fuente (después de todo, ¿nos gustaría que la gente utilizara nuestro libro!).
♦ Si publica alguna diapositiva en un sitio www, que haga constar que está adaptada de nuestras diapositivas (o quizás sea idéntica a ellas), y que haga constar nuestros derechos de autor sobre este material.

Gracias y que lo disfruten. JFK/KWR

© Todo el material tiene copyright 1996-2012
J.F. Kurose y K.W. Ross, Todos los derechos reservados

Capa de red 4- 2

Capítulo 4: capa de red

objetivos del capítulo:

- ❖ Comprender los principios en los que se basan los servicios de la capa de red:
 - modelos de servicio de la capa de red
 - reenvío frente a enrutamiento
 - cómo funciona un router
 - enrutamiento (selección de ruta)
 - difusión, multidifusión
- ❖ instanciación, implementación en Internet

Capa de red 4- 3

Capítulo 4: esquema

4.1 introducción

4.2 circuito virtual y redes de datagramas

4.3 qué hay dentro de un router

4.4 IP: Protocolo de Internet

- formato de datagrama
- Direccionamiento IPv4
- ICMP
- IPv6

4.5 algoritmos de enrutamiento

- estado del enlace
- vector de distancia
- enrutamiento jerárquico

4.6 El enrutamiento en Internet

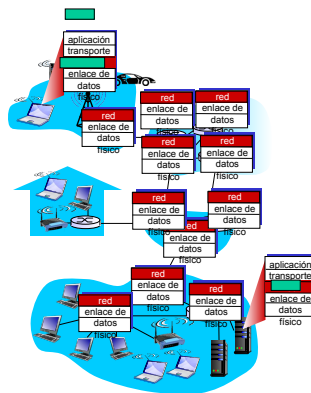
- RIP
- OSPF
- BGP

4.7 enrutamiento de difusión y multidifusión

Capa de red 4- 4

Capa de red

- ❖ segmento de transporte desde el host emisor al receptor
- ❖ en el lado emisor encapsula los segmentos en datagramas
- ❖ en el lado receptor, entrega segmentos a la capa de transporte
- ❖ protocolos de capa de red en *cada* host, router
- ❖ El router examina los campos de cabecera de todos los datagramas IP que pasan por él



Capa de red 4- 5

Dos funciones clave de la capa de red

- ❖ **reenvío:** mover los paquetes desde la entrada del router a la salida del mismo
- ❖ **enrutamiento:** determinar la ruta que siguen los paquetes desde el origen hasta el destino.

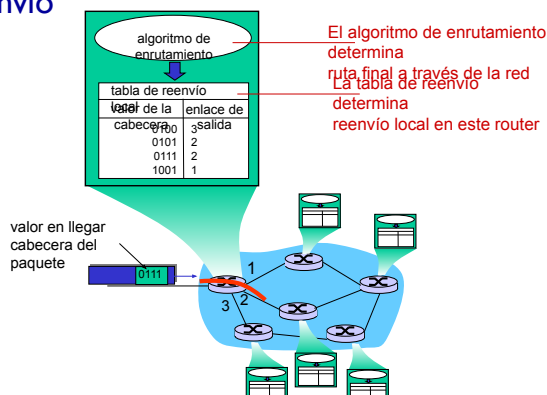
- algoritmos de enrutamiento

la analogía:

- ❖ **enrutamiento:** proceso de planificación del viaje desde el origen hasta el destino
- ❖ **reenvío:** proceso de pasar por un único intercambio

Capa de red 4- 6

Interacción entre el enrutamiento y el reenvío



Capa de red 4- 7

Configuración de la conexión

- ❖ Tercera función importante en *algunas* arquitecturas de red:
 - ATM, Frame Relay, X.25
- ❖ antes de que los datagramas fluyan, dos hosts finales y los routers intermedios establecen una conexión virtual
 - los routers se involucran
- ❖ servicio de conexión de la capa de red frente a la de transporte:
 - **red:** entre dos hosts (también pueden intervenir routers en caso de VC)
 - **transporte:** entre dos procesos

Capa de red 4- 8

Modelo de servicio de red

P: ¿Qué *modelo de servicio* para el "canal" que transporta los datagramas del emisor al receptor?

servicios de ejemplo para los datagramas individuales:

- ❖ entrega garantizada
- ❖ entrega garantizada con menos de 40 ms de retraso

servicios de ejemplo para un flujo de datagramas:

- ❖ entrega de datagramas en orden
- ❖ ancho de banda mínimo garantizado para fluir
- ❖ restricciones a los cambios en el espaciado entre paquetes

Capa de red 4- 9

Modelos de servicio de la capa de red:

| Red Arquitectur | Servicio Modelo | ¿Garantías? | | | | Congestión comentario |
|-----------------|-----------------|------------------|---------|------|--------------|--------------------------------------|
| | | Ancho de banda | Pérdida | Pida | Cronometraje | |
| Internet | mejor esfuerzo | ninguno | no | no | no | no |
| ATM | CBR | constante | sí | sí | sí | (deducido a través de la pérdida) no |
| ATM | VBR | tasa garantizado | sí | sí | sí | congestión no |
| ATM | ABR | tasa garantizado | no | sí | no | congestión sí |
| ATM | UBR | mínimo | ninguno | no | no | no |

Capa de red 4- 10

Capítulo 4: esquema

4.1 introducción

4.2 circuito virtual y redes de datagramas

4.3 qué hay dentro de un router

4.4 IP: Protocolo de Internet

- formato de datagrama
- Direccionamiento IPv4
- ICMP
- IPv6

4.5 algoritmos de enrutamiento

- estado del enlace
- vector de distancia
- enrutamiento jerárquico

4.6 El enrutamiento en Internet

- RIP
- OSPF
- BGP

4.7 enrutamiento de difusión y multidifusión

Capa de red 4- 11

Conexión, servicio sin conexión

- ❖ La red de *datagramas* proporciona un servicio *sin conexión* en la capa de red
- ❖ La red de *circuitos virtuales* proporciona un servicio de *conexión* en la capa de red
- ❖ análoga a los servicios de la capa de transporte orientados a la conexión / sin conexión TCP/UDP, pero:
 - *servicio*: host-to-host
 - *no hay elección*: la red proporciona uno u otro
 - *aplicación*: en el núcleo de la red

Capa de red 4- 12

Circuitos virtuales

"La ruta de origen a destino se comporta como un circuito telefónico"

- rendimiento
- acciones de la red a lo largo de la ruta origen-destino

- ❖ preparación de la llamada, desmontaje de cada llamada *antes de que* los datos puedan fluir
- ❖ cada paquete lleva un identificador de VC (no la dirección del host de destino)
- ❖ *cada router* en la ruta origen-destino mantiene un "estado" para cada conexión que pasa
- ❖ enlace, los recursos del router (ancho de banda, búferes) pueden *asignarse* al VC (recursos dedicados = servicio predecible)

Capa de red 4- 13

Implantación de la CV

un VC se compone de:

1. *ruta* del origen al destino
2. *Números VC*, un número por cada enlace a lo largo de la ruta
3. *entradas en las tablas de reenvío* de los routers a lo largo de la ruta

- ❖ el paquete perteneciente a VC lleva el número de VC (en lugar de la dirección dest)
- ❖ El número de VC se puede cambiar en cada enlace.
 - el nuevo número de VC proviene de la tabla de reenvío

Capa de red 4- 14

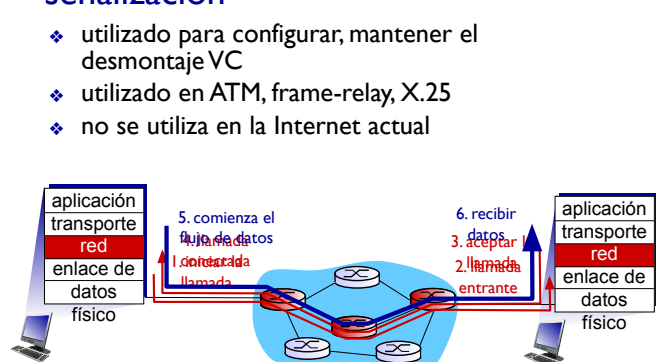
Tabla de reenvío VC

tabla de reenvío en router del noroeste:

| Interfaz entrante VC | entrante # | Interfaz saliente VC | saliente # |
|----------------------|------------|----------------------|------------|
| 1 | 12 | 3 | 22 |
| 2 | 63 | 1 | 18 |
| 3 | 7 | 2 | 17 |
| 1 | 97 | 3 | 87 |
| ... | ... | ... | ... |

Los routers VC mantienen la información del estado de la conexión.

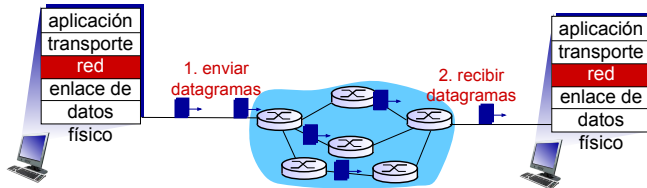
Capa de red 4- 15



Capa de red 4- 16

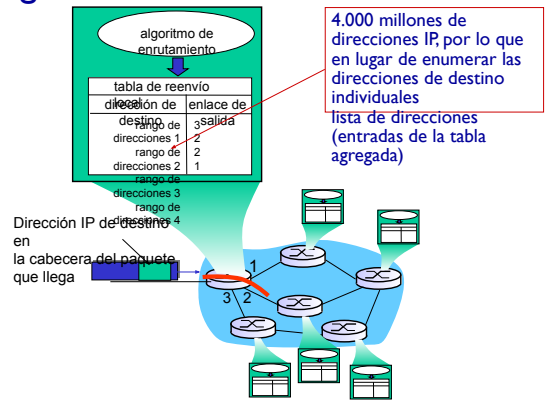
Redes de datagramas

- ❖ no hay establecimiento de llamada en la capa de red
- ❖ routers: no hay estado sobre las conexiones de extremo a extremo
 - no existe el concepto de "conexión" a nivel de red
- ❖ paquetes reenviados utilizando la dirección del host de destino



Capa de red 4- 17

Tabla de reenvío de datagramas



Capa de red 4- 18

Tabla de reenvío de datagramas

| Rango de direcciones de destino | Interfaz de enlace |
|---|--------------------|
| 11001000 00010111 00010000 00000000 a través de 11001000 00010111 00010111 11111111 | 0 |
| 11001000 00010111 00011000 00000000 a través de 11001000 00010111 00011000 11111111 | 1 |
| 11001000 00010111 00011001 00000000 a través de 11001000 00010111 00011111 11111111 | 2 |
| De lo contrario, | 3 |

P: ¿pero qué pasa si los rangos no se dividen tan bien?

Capa de red 4- 19

Coincidencia del prefijo más largo

cuando se busca una entrada en la tabla de reenvío para una dirección de destino determinada, se utiliza el prefijo de dirección **más largo** que coincide con la dirección de destino.

| Rango de direcciones de destino | Interfaz de enlace |
|---------------------------------|--------------------|
| 11001000 00010111 00010*** * | 0 |
| 11001000 00010111 00011000 * | 1 |
| 11001000 00010111 00011*** * | 2 |
| De lo contrario, | 3 |

ejemplos:

DA: 11001000 00010111 00010110 10100001 ¿qué interfaz?

DA: 11001000 00010111 00011000 10101010 ¿qué interfaz?

Capa de red 4- 20

Red de datagramas o VC: ¿por qué?

Internet (datagrama)

- ❖ intercambio de datos entre ordenadores
 - Servicio "elástico", sin necesidad de horarios estrictos.
- ❖ muchos tipos de enlaces
 - diferentes características
 - servicio uniforme difícil
- ❖ sistemas finales "inteligentes" (ordenadores)
 - puede adaptarse, realizar el control, la recuperación de errores
 - **simple dentro de la red, complejidad en el "borde"**

ATM (VC)

- ❖ evolucionó a partir de la telefonía
- ❖ conversación humana:
 - requisitos estrictos de tiempo y fiabilidad
 - necesidad de un servicio garantizado
- ❖ sistemas finales "tontos"
 - teléfonos
 - **complejidad dentro de la red**

Capa de red 4- 21

Capítulo 4: esquema

4.1 introducción

4.2 circuito virtual y redes de datagramas

4.3 qué hay dentro de un router

4.4 IP: Protocolo de Internet

- formato de datagrama
- Direccionamiento IPv4
- ICMP
- IPv6

4.5 algoritmos de enrutamiento

- estado del enlace
- vector de distancia
- enrutamiento jerárquico

4.6 El enrutamiento en Internet

- RIP
- OSPF
- BGP

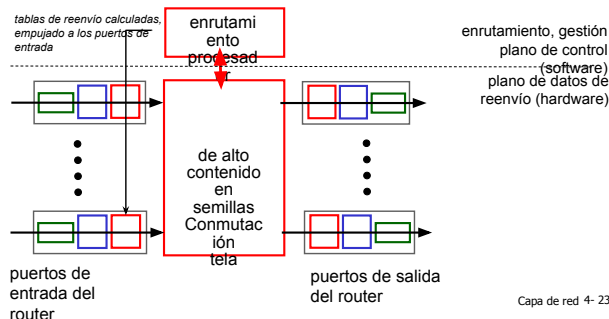
4.7 enrutamiento de difusión y multidifusión

Capa de red 4- 22

Resumen de la arquitectura del router

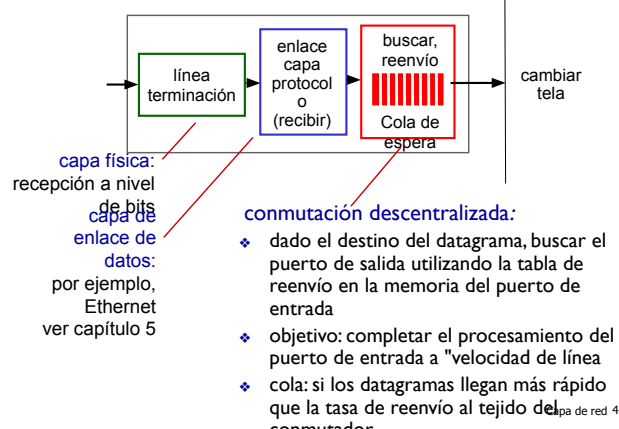
dos funciones clave del router:

- ❖ ejecutar algoritmos/protocolos de enrutamiento (RIP, OSPF, BGP)
- ❖ reenvío de datagramas de enlace entrante a saliente



Capa de red 4- 23

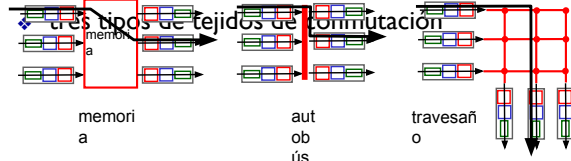
Funciones del puerto de entrada



Capa de red 4- 24

Tejidos de conmutación

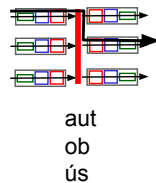
- transferir el paquete del búfer de entrada al búfer de salida correspondiente
- velocidad de conmutación: velocidad a la que se pueden transferir paquetes de las entradas a las salidas
 - a menudo se mide como múltiplo de la tasa de línea de entrada/salida
 - N entradas: velocidad de conmutación N veces la velocidad de línea deseable



Capa de red 4- 25

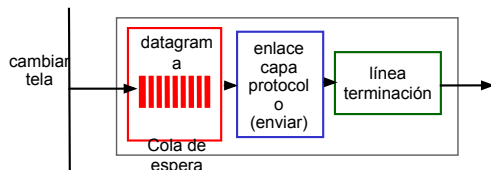
Conmutación a través de un bus

- datagrama de la memoria del puerto de entrada a la memoria del puerto de salida a través de un bus compartido
- contención del bus:** velocidad de conmutación limitada por el ancho de banda del bus
- un paquete cada vez
- Bus de 32 Gbps, Cisco 5600: velocidad suficiente para routers de acceso y empresariales



Capa de red 4- 27

Puertos de salida



- búfer** necesario cuando los datagramas llegan desde el tejido más rápido que la velocidad de transmisión
- La **disciplina de programación** elige entre los datagramas en cola para su transmisión

Capa de red 4- 29

¿Cuánta amortiguación?

- Regla general del RFC 3439: el promedio de almacenamiento en búfer es igual al RTT "típico" (digamos 250 mseg) por la capacidad del enlace C
 - Por ejemplo, C = enlace de 10 Gbps: Buffer de 2,5 Gbit
- recomendación reciente: con N flujos, el buffering es igual a

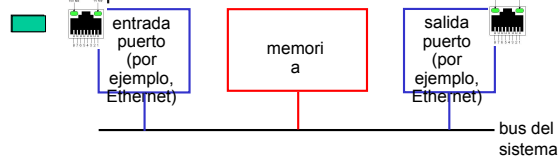
$$\frac{RTT \cdot C}{\sqrt{N}}$$

Capa de red 4- 31

Conmutación a través de la memoria

routers de primera generación:

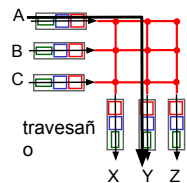
- ordenadores tradicionales con conmutación bajo control directo de la CPU
- paquete copiado en la memoria del sistema
- La CPU extrae la dirección de destino de la cabecera del paquete, busca el puerto de salida en la tabla de reenvío y lo copia en el puerto de salida
- velocidad limitada por el ancho de banda de la memoria (2 cruces de bus por datagrama)
- un paquete a la vez



Capa de red 4- 26

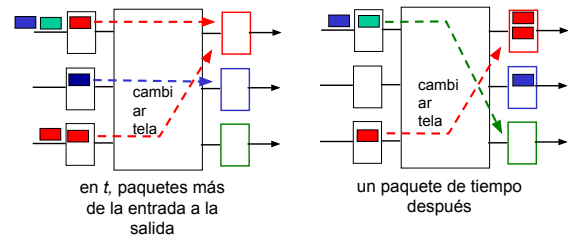
Conmutación a través de la red de interconexión

- reenvía varios paquetes en paralelo
- redes banyan, crossbar, otras redes de interconexión desarrolladas inicialmente para conectar procesadores en multiprocesadores
- Cuando el paquete del puerto A necesita ser reenviado al puerto Y, el controlador cierra el punto de cruce en la intersección de los dos buses
- diseño avanzado: fragmentación del datagrama en celdas de longitud fija, conmutación de celdas a través del tejido.



Capa de red 4- 28

Cola de puertos de salida

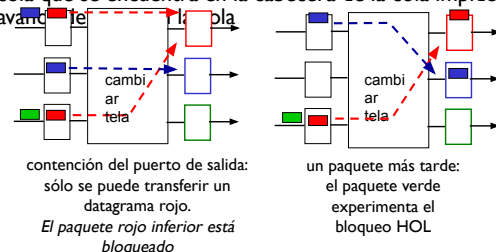


- supongamos que R_{switch} es N veces más rápido que R_{line}
- todavía tiene el búfer de salida cuando varias entradas envían a la misma salida
- colas (retraso) y pérdidas por desbordamiento del búfer del puerto de salida.**

Capa de red 4- 30

Cola de puertos de entrada

- El tejido es más lento que los puertos de entrada. La cola combinada puede producirse en las colas de entrada
 - retardo en la cola y pérdida por desbordamiento del búfer de entrada**
- Bloqueo de la cabecera de la cola (HOL):** el datagrama en cola que se encuentra en la cabecera de la cola impide el avance de los paquetes que están detrás.



Capa de red 4- 32

Capítulo 4: esquema

4.1 introducción

4.2 circuito virtual y redes de datagramas

4.3 qué hay dentro de un router

4.4 IP: Protocolo de Internet

- formato de datagrama
- Direccionamiento IPv4
- ICMP
- IPv6

4.5 algoritmos de enrutamiento

- estado del enlace
- vector de distancia
- enrutamiento jerárquico

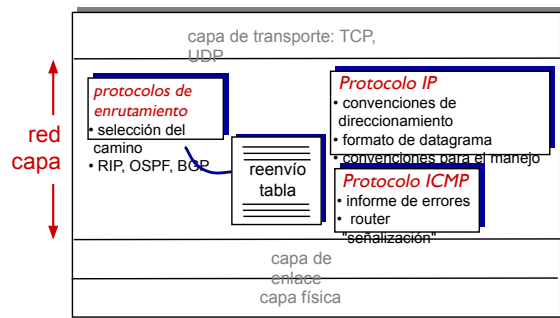
4.6 El enrutamiento en Internet

- RIP
- OSPF
- BGP

4.7 enrutamiento de difusión y multidifusión

La capa de red de Internet

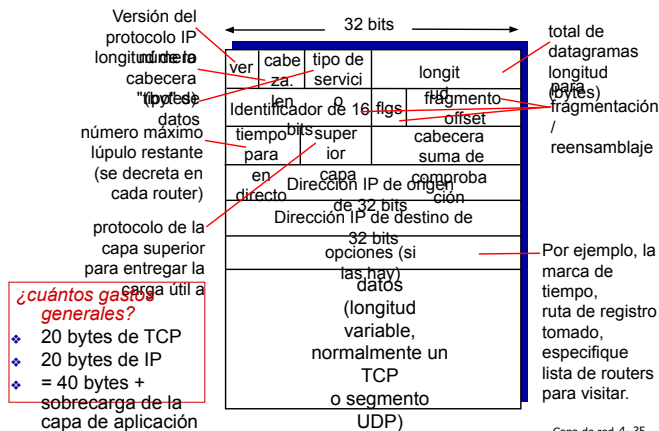
host, funciones de la capa de red del router:



Capa de red 4- 33

Capa de red 4- 34

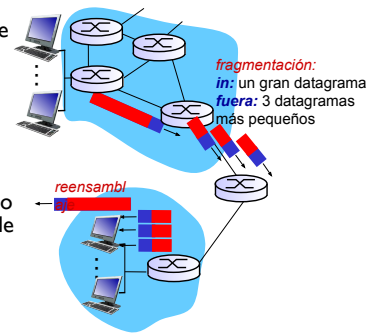
Formato de datagrama IP



Capa de red 4- 35

Fragmentación IP, reensamblaje

- los enlaces de red tienen MTU (tamaño máximo de transferencia) - la mayor trama posible a nivel de enlace
 - diferentes tipos de enlaces, diferentes MTU
- gran datagrama IP dividido ("fragmentado") dentro de la red
 - un datagrama se convierte en varios datagramas
 - "reensamblado" sólo en el destino final

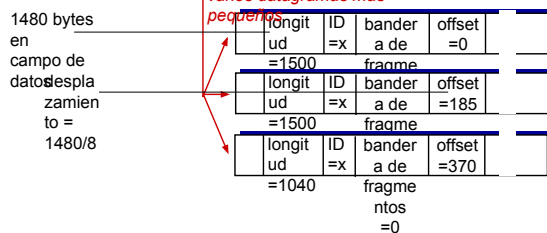


Capa de red 4- 36

Fragmentación IP, reensamblaje

ejemplo:

- datagrama de 4000 bytes
- MTU = 1500 bytes



Capa de red 4- 37

Capítulo 4: esquema

4.1 introducción

4.2 circuito virtual y redes de datagramas

4.3 qué hay dentro de un router

4.4 IP: Protocolo de Internet

- formato de datagrama
- Direccionamiento IPv4
- ICMP
- IPv6

4.5 algoritmos de enrutamiento

- estado del enlace
- vector de distancia
- enrutamiento jerárquico

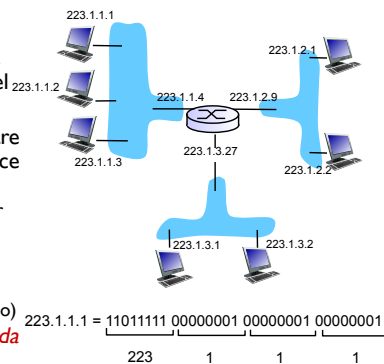
4.6 El enrutamiento en Internet

- RIP
- OSPF
- BGP

4.7 enrutamiento de difusión y multidifusión

Direccionamiento IP: introducción

- Dirección IP:** Identificador de 32 bits para el host, **interfaz** del router
- interfaz:** conexión entre el host/router y el enlace físico
 - los routers suelen tener varias interfaces
 - el host suele tener una interfaz activa (por ejemplo, Ethernet por cable, 802.11 inalámbrico)
- una dirección IP asociada a cada interfaz**



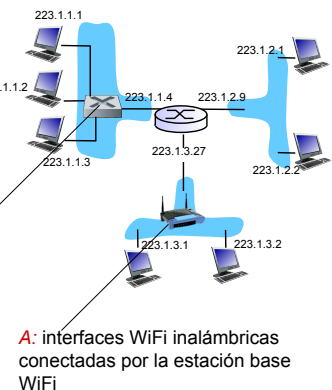
Capa de red 4- 39

Direccionamiento IP: introducción

P: ¿Cómo se conectan realmente las interfaces?
R: lo aprenderemos en el capítulo 5, 6.

A: interfaces Ethernet por cable conectadas por conmutadores Ethernet

Por ahora: no hay que preocuparse de cómo se conecta una interfaz con otra (sin router intermedio)



Capa de red 4- 40

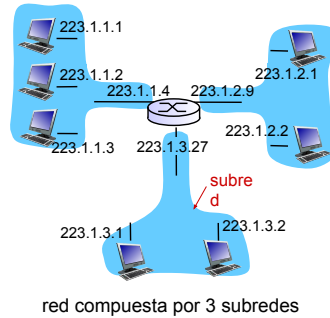
Subredes

❖ Dirección IP:

- parte de la subred - bits de alto orden
- parte de host - bits de bajo orden

❖ ¿qué es una subred?

- interfaces de dispositivos con la misma parte de subred de la dirección IP
- pueden llegar físicamente *sin intervenir el router*

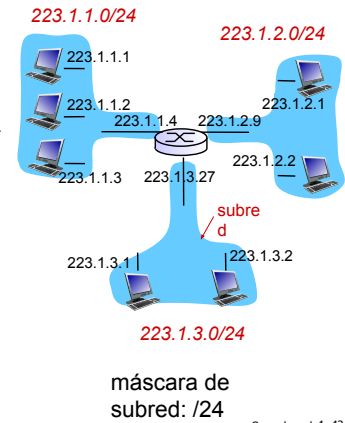


Capa de red 4- 41

Subredes

receta

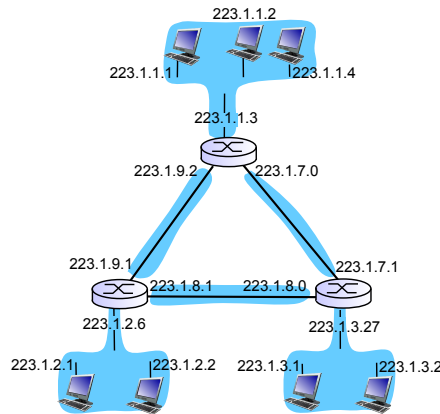
- para determinar las subredes, separar cada interfaz de su host o router, creando islas de redes aisladas
- cada red aislada se denomina *subred*



Capa de red 4- 42

Subredes

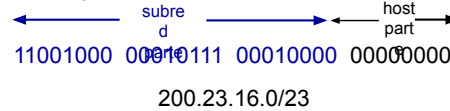
¿cuántos?



Direccionamiento IP: CIDR

CIDR: Enrutamiento entre dominios sin clase

- porción de subred de la dirección de longitud arbitraria
- formato de dirección: **a.b.c.d/x**, donde x es el número de bits de la parte de la dirección correspondiente a la subred



Capa de red 4- 44

Direcciones IP: ¿cómo conseguir una?

P: ¿Cómo obtiene la red la parte de la subred de la dirección IP?

A: obtiene una porción asignada del espacio de direcciones de su proveedor ISP

Bloque del ISP 11001000 00010111 00010000 00000000 200.23.16.0/20

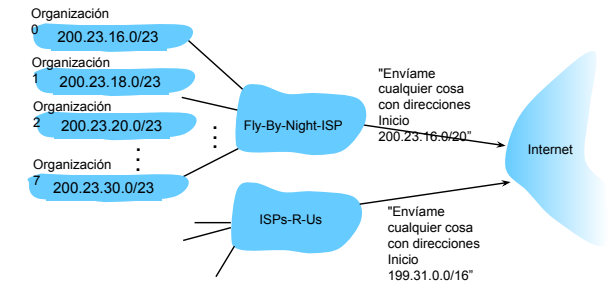
Organización 0 11001000 00010111 00010000 00000000 200.23.16.0/23
Organización 1 11001000 00010111 00010010 00000000 200.23.18.0/23
Organización 2 11001000 00010111 00010100 00000000 200.23.20.0/23
Organización 3 11001000 00010111 00010110 00000000 200.23.22.0/23
Organización 4 11001000 00010111 00011000 00000000 200.23.24.0/23
Organización 5 11001000 00010111 00011010 00000000 200.23.26.0/23
Organización 6 11001000 00010111 00011100 00000000 200.23.28.0/23
Organización 7 11001000 00010111 00011110 00000000 200.23.30.0/23

Capa de red 4- 45

Direccionamiento jerárquico: agregación de rutas

El direccionamiento jerárquico permite una publicidad eficaz del enrutamiento

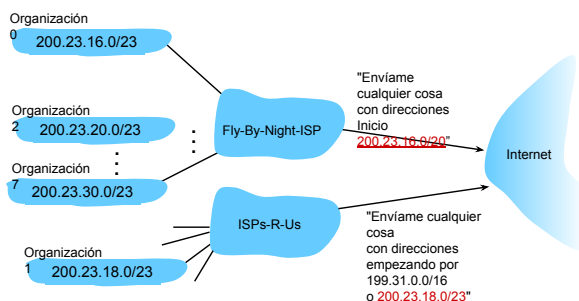
información:



Capa de red 4- 46

Direccionamiento jerárquico: rutas más específicas

ISPs-R-Us tiene una ruta más específica para la Organización 1



Capa de red 4- 47

Direccionamiento IP: ¿cómo conseguir un bloque?

P: ¿Cómo consigue un ISP un bloque de direcciones?

R: ICANN: Corporación de Internet para la Asignación de

Nombres y números <http://www.icann.org/>

- asigna las direcciones
- gestiona el DNS
- asigna los nombres de dominio, resuelve los conflictos

Capa de red 4- 48

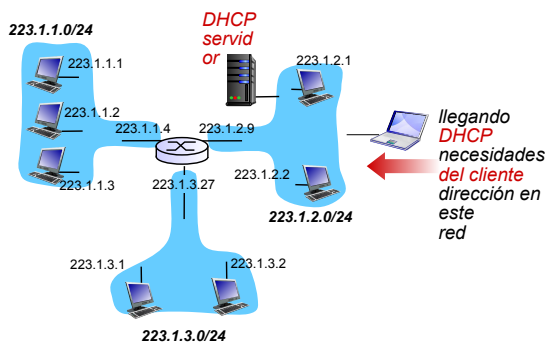
Direcciones IP: ¿cómo conseguir una?

P: ¿Cómo obtiene un *host* la dirección IP?

- ❖ codificado por el administrador del sistema en un archivo
 - Windows: panel de control->red->configuración->tcp/ip->propiedades
 - UNIX: /etc/rc.config
- ❖ **DHCP**: Protocolo de configuración dinámica de host: obtiene dinámicamente la dirección desde un servidor
 - "plug-and-play"

Capa de red 4- 49

Escenario cliente-servidor DHCP



Capa de red 4- 51

DHCP: Protocolo de configuración dinámica de host

objetivo: permitir que el host obtenga *dinámicamente* su dirección IP del servidor de red cuando se une a la red

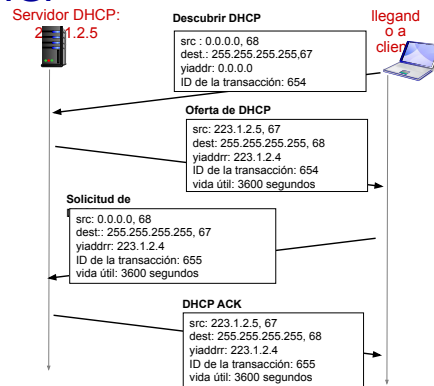
- puede renovar su contrato de arrendamiento en la dirección en uso
- permite la reutilización de direcciones (sólo mantiene la dirección mientras está conectado/"on")
- apoyo a los usuarios de móviles que quieran unirse a la red (más en breve)

Visión general de DHCP:

- el host emite el mensaje "**DHCP discover**" [opcional]
- El servidor DHCP responde con el mensaje "**Oferta DHCP**" [opcional]
- El host solicita una dirección IP: "**Solicitud de DHCP**" msg
- El servidor DHCP envía la dirección: "**DHCP ack**" msg

Capa de red 4- 50

Escenario cliente-servidor DHCP



Capa de red 4- 52

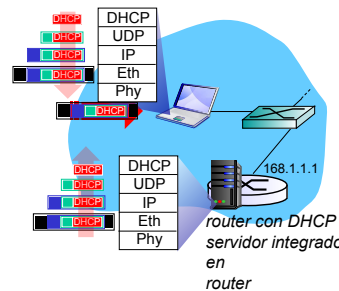
DHCP: más que direcciones IP

Vuelve el DHCP:

- Dirección IP
- dirección del router de primer salto para el cliente
- nombre y dirección IP del servidor DNS
- máscara de red (que indica la parte de red frente a la parte de host de la dirección)

Capa de red 4- 53

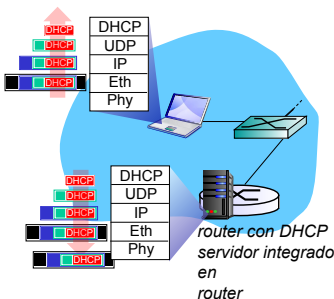
DHCP: ejemplo



- ❖ el portátil que se conecta necesita su dirección IP, la dirección del router de primer salto y la dirección del servidor DNS: utiliza DHCP encapsulada en UDP, encapsulada en IP, encapsulada en Ethernet (dest: FFFFFFFF) en la LAN, recibida en el router que ejecuta el servidor DHCP
- ❖ Ethernet demuxed to IP demuxed, UDP demuxed to DHCP

Capa de red 4- 54

DHCP: ejemplo



- ❖ El servidor DHCP formula un ACK DHCP que contiene la dirección IP del cliente, la dirección IP del router de primer salto para el cliente, el nombre y dirección IP del servidor DNS
- ❖ encapsula la dirección IP del cliente en DHCP, encapsulada en UDP, encapsulada en IP, encapsulada en Ethernet (dest: FFFFFFFF) en la LAN, recibida en el router que ejecuta el servidor DHCP
- ❖ el cliente conoce ahora su dirección IP, el nombre y la dirección IP del servidor DNS, la dirección IP de su router de primer salto

Capa de red 4- 55

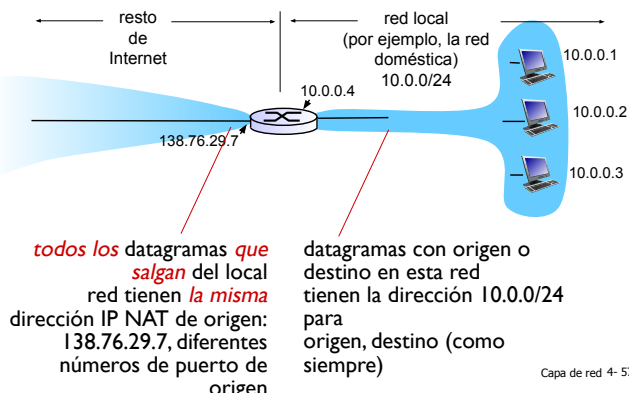
DHCP: salida de Wireshark (LAN doméstica)

Tipo de mensaje: **Solicitud de arranque (1)**
Tipo de hardware: Ethernet
Longitud de la dirección de hardware: 6
Lúculo: 0
ID de la transacción: 0x6b3a11b7
Segundos transcurridos: 0
Bandera Boot: 0x0000 (Unicast)
Su dirección IP (del cliente): 0.0.0.0 (0.0.0.0)
Dirección IP del agente de retransmisión: 0.0.0.0 (0.0.0.0)
Dirección MAC del cliente: Wistron_23:68:8a (00:16:d3:23:68:8a)
Nombre del servidor no indicado
No se indica el nombre del archivo de arranque
Galleta mágica: (OK)
Opción: (t=53,i=1) Tipo de mensaje DHCP = Solicitudes de arranque
Opción: (61) Identificador de cliente
Longitud: 7, Valor: 010016D323688A;
Tipo de hardware: Ethernet
Dirección MAC del cliente: Wistron_23:68:8a (00:16:d3:23:68:8a)
Opción: (t=50,i=4) Dirección IP solicitada = 192.168.1.101
Opción: (t=12,i=5) Nombre del host = "nómadia"
Opción: (55) Lista de solicitud de parámetros
Longitud: 11, Valor: 010F03062C2E2F1F21F92B
1 = Máscara de subred; 15 = Nombre de dominio
3 = Router; 6 = Servidor de nombres de dominio
44 = Servidor de nombres NetBIOS sobre TCP/IP
.....

Tipo de mensaje: **Respuesta de arranque (2)**
Tipo de hardware: Ethernet
Longitud de la dirección de hardware: 6
Lúculo: 0
ID de la transacción: 0x6b3a11b7
Segundos transcurridos: 0
Bandera Boot: 0x0000 (Unicast)
Dirección IP del cliente: 192.168.1.101 (192.168.1.101)
Su dirección IP (del cliente): 0.0.0.0 (0.0.0.0)
Dirección IP del siguiente servidor: 192.168.1.1 (192.168.1.1)
Dirección IP del agente de retransmisión: 0.0.0.0 (0.0.0.0)
Dirección MAC del cliente: Wistron_23:68:8a (00:16:d3:23:68:8a)
Nombre del servidor no indicado
No se indica el nombre del archivo de arranque
Galleta mágica: (OK)
Opción: (t=53,i=1) Tipo de mensaje DHCP = DHCP ACK
Opción: (t=54,i=4) Identificador del servidor = 192.168.1.1
Opción: (t=1,i=4) Máscara de subred = 255.255.255.0
Opción: (t=3,i=4) Router = 192.168.1.1
Opción: (6) Servidor de nombres de dominio
Longitud: 12, Valor: 445747E2445749F244574092;
Dirección IP: 68.87.71.226;
Dirección IP: 68.87.73.242;
Dirección IP: 68.87.64.146
Opción: (t=15,i=20) Nombre de dominio = "hsd1.ma.comcast.net."

Capa de red 4- 56

NAT: traducción de direcciones de red



NAT: traducción de direcciones de red

motivación: la red local utiliza una sola dirección IP en lo que respecta al mundo exterior:

- no se necesita un rango de direcciones del ISP: sólo una dirección IP para todos los dispositivos
- puede cambiar las direcciones de los dispositivos en la red local sin notificar al mundo exterior
- puede cambiar de ISP sin cambiar las direcciones de los dispositivos en la red local
- dispositivos dentro de la red local no direccionables explícitamente, visibles para el mundo exterior (una ventaja de seguridad)

Capa de red 4- 58

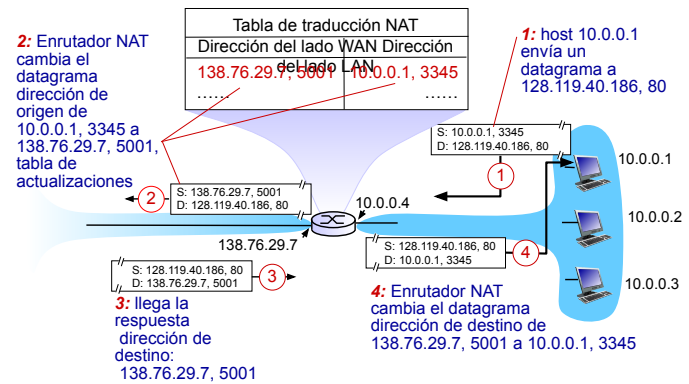
NAT: traducción de direcciones de red

implementación: El router NAT debe:

- datagramas salientes:** *sustituir* (dirección IP de origen, puerto #) de cada datagrama saliente por (dirección IP NAT, nuevo puerto #)
... los clientes/servidores remotos responderán utilizando (dirección IP NAT, nuevo puerto #) como dirección de destino
- recordar (en la tabla de traducción NAT)** cada par de traducción (dirección IP de origen, puerto #) a (dirección IP NAT, nuevo puerto #)
- datagramas entrantes:** *sustituir* (dirección IP NAT, nuevo puerto #) en los campos dest de cada datagrama entrante por los correspondientes (dirección IP de origen, puerto #) almacenados en la tabla NAT

Capa de red 4- 59

NAT: traducción de direcciones de red



NAT: traducción de direcciones de red

- ❖ Campo de número de puerto de 16 bits:
 - 60.000 conexiones simultáneas con una sola dirección del lado de la LAN!
- ❖ La NAT es controvertida:
 - los routers sólo deberían procesar hasta la capa 3
 - viola el argumento de extremo a extremo
 - Los diseñadores de aplicaciones deben tener en cuenta la posibilidad de NAT, por ejemplo, las aplicaciones P2P
 - La escasez de direcciones debería solucionarse con IPv6

Capa de red 4- 61

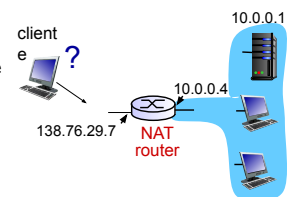
Problema de cruce de NAT

- ❖ el cliente quiere conectarse al servidor con la dirección 10.0.0.1

- dirección del servidor 10.0.0.1 local a la LAN (el cliente no puede utilizarla como dirección de destino)
- sólo una dirección NAT visible externamente: 138.76.29.7

- ❖ **solución 1:** configurar estáticamente el NAT para reenviar al servidor las solicitudes de conexión entrantes en un puerto determinado

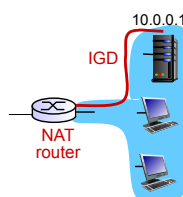
- por ejemplo, (138.76.29.7, puerto 25000) siempre se reenvía a 10.0.0.1 puerto 25000



Problema de cruce de NAT

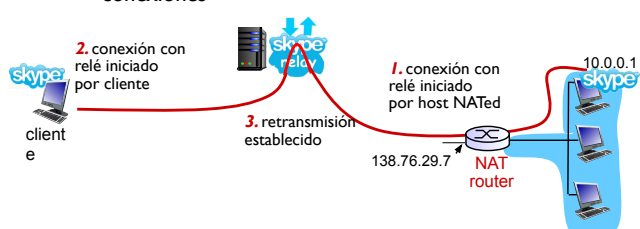
- ❖ **solución 2:** Protocolo de Dispositivo de Pasarela de Internet (IGD) Universal Plug and Play (UPnP). Permite que el host con NAT pueda:
 - aprender la dirección IP pública (138.76.29.7)
 - añadir/eliminar asignaciones de puertos (con tiempos de arrendamiento)

es decir, automatizar la configuración del mapa de puertos NAT estático



Problema de cruce de NAT

- ❖ **solución 3:** retransmisión (utilizada en Skype)
 - El cliente con NAT establece la conexión con el relé
 - el cliente externo se conecta al relé
 - La retransmisión puentea los paquetes entre las conexiones



Capítulo 4: esquema

- 4.1 introducción
- 4.2 circuito virtual y redes de datagramas
- 4.3 qué hay dentro de un router

4.4 IP: Protocolo de Internet

- formato de datagrama
- Direccionamiento IPv4
- ICMP
- IPv6

- 4.5 algoritmos de enrutamiento
 - estado del enlace
 - vector de distancia
 - enrutamiento jerárquico

4.6 El enrutamiento en Internet

- RIP
- OSPF
- BGP

4.7 enrutamiento de difusión y multidifusión

Capa de red 4- 65

ICMP: protocolo de mensajes de control de Internet

- utilizado por hosts y routers para comunicar información a nivel de red
 - informe de errores: host, red, puerto y protocolo inalcanzables
 - eco solicitud/respuesta (utilizado por ping)
- capa de red "por encima" de IP:
 - Mensajes ICMP transportados en datagramas IP
- Mensaje ICMP: tipo, código más los primeros 8 bytes del datagrama IP que causa el error

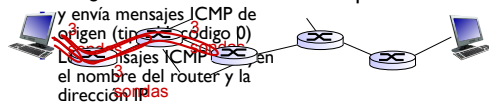
Tipo Descripción del código

- 0 0 eco respuesta (ping)
- 3 0 red de destino inalcanzable
- 3 1 host dest inalcanzable
- 3 2 protocolo dest inalcanzable
- 3 3 puerto dest inalcanzable
- 3 6 red de destino desconocida
- 3 7 dest host desconocido
- 4 0 enfriamiento de la fuente (congestión)
- control - no se utiliza
- 8 0 solicitud de eco (ping)
- 9 0 anuncio de ruta
- 10 0 descubrimiento de enrutadores
- 11 0 TTL expirado
- 12 0 cabecera IP errónea

Capa de red 4- 66

Traceroute e ICMP

- el origen envía una serie de segmentos UDP al destino
 - el primer conjunto tiene TTL=1
 - el segundo conjunto tiene TTL=2, etc.
 - número de puerto improbable
- cuando el *enésimo* conjunto de datagramas llega al *enésimo* router:
 - El router descarta los datagramas
 - y envía mensajes ICMP de origen (tipo de código 0)
 - Los mensajes ICMP llevan en el nombre del router y la dirección IP
- cuando llegan mensajes ICMP, la fuente registra los RTT
- critérios de parada:
 - El segmento UDP llega finalmente al host de destino
 - el destino devuelve el mensaje ICMP "puerto inalcanzable" (tipo 3, código 3)
 - paradas en la fuente



Capa de red 4- 67

IPv6: motivación

- motivación inicial:** Un espacio de direcciones de 32 bits que pronto estará completamente asignado.
- motivación adicional:
 - el formato de la cabecera ayuda a acelerar el procesamiento/reenvío
 - cambios de cabecera para facilitar la QoS

Formato de datagrama IPv6:

- cabecera de longitud fija de 40 bytes
- no se permite la fragmentación

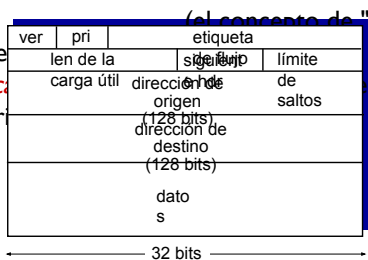
Capa de red 4- 68

Formato de datagrama IPv6

prioridad: identificar la prioridad entre los datagramas en el flujo

flow Label: identifica los datagramas en un mismo "flujo".

no está bien la siguiente capa superior



Capa de red 4- 69

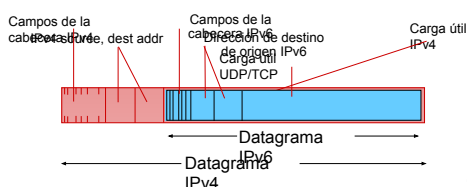
Otros cambios respecto a IPv4

- suma de comprobación:** eliminada por completo para reducir el tiempo de procesamiento en cada salto
- opciones:** permitido, pero fuera de la cabecera, indicado por el campo "Próxima cabecera"
- ICMPv6:** nueva versión de ICMP
 - tipos de mensajes adicionales, por ejemplo, "Paquete demasiado grande"
 - funciones de gestión de grupos de multidifusión

Capa de red 4- 70

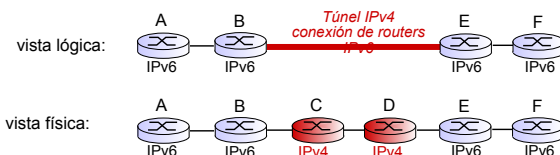
Transición de IPv4 a IPv6

- no todos los routers pueden ser actualizados simultáneamente
 - no hay "días de bandera"
 - ¿Cómo funcionará la red con routers mixtos IPv4 e IPv6?
- túnel:** datagrama IPv6 transportado como carga útil en un datagrama IPv4 entre routers IPv4



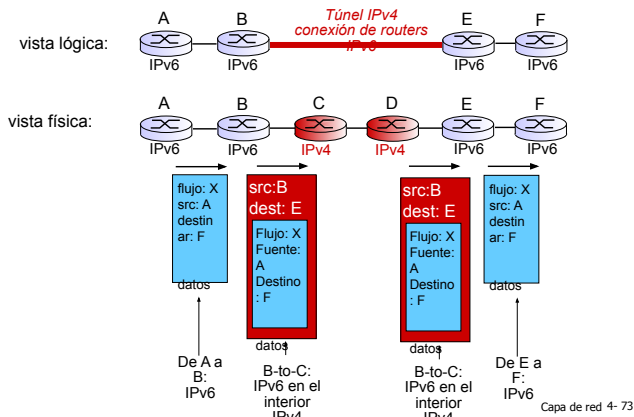
Capa de red 4- 71

Túnel

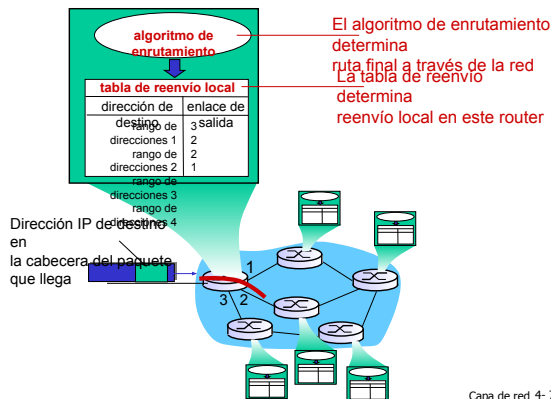


Capa de red 4- 72

Túnel



Interacción entre el enrutamiento, el reenvío



Capítulo 4: esquema

4.1 introducción

4.2 circuito virtual y redes de datagramas

4.3 qué hay dentro de un router

4.4 IP: Protocolo de Internet

- formato de datagrama
- Direccionamiento IPv4
- ICMP
- IPv6

4.5 algoritmos de enrutamiento

- estado del enlace
- vector de distancia
- enrutamiento jerárquico

4.6 El enrutamiento en Internet

- RIP
- OSPF
- BGP

4.7 enrutamiento de difusión y multidifusión

Capa de red 4- 74

Abstracción de gráficos

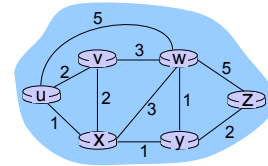


gráfico: $G = (N, E)$

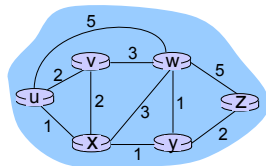
N = conjunto de routers = $\{ u, v, w, x, y, z \}$

E = conjunto de enlaces = $\{ (u,v), (u,x), (v,x), (v,w), (x,w), (x,y), (w,y), (w,z), (y,z) \}$

aparte: la abstracción de grafos es útil en otros contextos de redes, por ejemplo, P2P, donde N es el conjunto de pares y E es el conjunto de conexiones TCP

Capa de red 4- 76

Abstracción gráfica: costes



$c(x, x') =$ coste del enlace (x, x')
por ejemplo, $c(w, z) = 5$

el coste puede ser siempre 1, o inversamente relacionado con el ancho de banda, o inversamente relacionado con la congestión

coste del camino $(x_1, x_2, x_3, \dots, x_p) = c(x_1, x_2) + c(x_2, x_3) + \dots + c(x_{p-1}, x_p)$

pregunta clave: ¿cuál es el camino de menor coste entre u y z ?

algoritmo de enrutamiento: algoritmo que encuentra el camino de menor coste

Capa de red 4- 77

Clasificación de los algoritmos de enrutamiento

P: ¿información global o descentralizada?

global:

- todos los routers tienen la topología completa, la información del coste del enlace

- algoritmos de "estado de enlace"

descentralizado:

- El router conoce a los vecinos físicamente conectados, los costes de los enlaces con los vecinos
- proceso iterativo de cálculo, intercambio de información

P: ¿estática o dinámica?

estática:

- las rutas cambian lentamente con el tiempo

dinámico:

- las rutas cambian más rápidamente
 - actualización periódica
 - en respuesta a los cambios en los costes de los enlaces

Capa de red 4- 78

Capítulo 4: esquema

4.1 introducción

4.2 circuito virtual y redes de datagramas

4.3 qué hay dentro de un router

4.4 IP: Protocolo de Internet

- formato de datagrama
- Direccionamiento IPv4
- ICMP
- IPv6

4.5 algoritmos de enrutamiento

- estado del enlace
- vector de distancia
- enrutamiento jerárquico

4.6 El enrutamiento en Internet

- RIP
- OSPF
- BGP

4.7 enrutamiento de difusión y multidifusión

Un algoritmo de enrutamiento por estado de enlace

Algoritmo de Dijkstra

- topología de la red, costes de enlace conocidos por todos los nodos

- se logra a través de la "transmisión del estado del enlace"

- todos los nodos tienen la misma información

- calcula las rutas de menor coste desde un nodo ("origen") a todos los demás nodos

- da la **tabla de reenvío** para ese nodo

- iterativo: después de k iteraciones, conoce el

notación:

- $c(x, y)$: coste del enlace desde el nodo x al y ; $= \infty$ si no son vecinos directos

- $D(v)$: valor actual del coste del camino desde el origen hasta el destino v

- $p(v)$: nodo predecesor en la ruta del origen a v

- N' : conjunto de nodos cuya trayectoria de menor coste se conoce definitivamente

Capa de red 4- 79

Capa de red 4- 80

Algoritmo de Dijkstra

1 Inicialización:

2 $N' = \{u\}$

3 para todos los nodos v

4 si v es adyacente a u

5 entonces $D(v) = c(u, v)$

6 sino $D(v) = \infty$

7

8 Lazo

9 encontrar w no en N' tal que $D(w)$ sea un mínimo

10 añadir w a N'

11 actualizar $D(v)$ para todos los v adyacentes a w que no estén en N' :

12 $D(v) = \min(D(v), D(w) + c(w, v))$

13 /* el nuevo coste de v es el antiguo coste de v o es conocido

14 coste del camino más corto a w más el coste de w a v */

15 hasta que todos los nodos de N'

Capa de red 4- 81

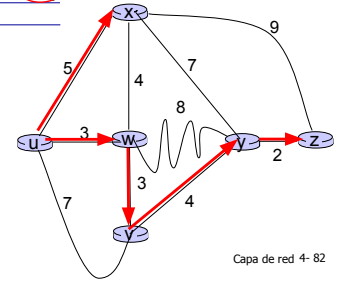
Algoritmo de Dijkstra: ejemplo

| Pas | N' | $D(v)$ $p(v)$ | $D(w)$ $p(w)$ | $D(x)$ $p(x)$ | $D(y)$ $p(y)$ | $D(z)$ $p(z)$ |
|-----|---------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| 0 | $\{u\}$ | 7,u | 3,u | 5,u | ∞ | ∞ |
| 1 | $\{u, w\}$ | 6,w | | 5,u | 11,w | ∞ |
| 2 | $\{u, w, x\}$ | | 6,w | | 11,w | 14,x |
| 3 | $\{u, w, x, y\}$ | | | | 10,y | 14,x |
| 4 | $\{u, w, x, y, z\}$ | | | | | 12,y |
| 5 | $\{u, w, x, y, z\}$ | | | | | |

$$e.g., D(v) = \min(D(v), D(w) + c(w, v)) \\ = \min\{7, 3 + 3\} = 6$$

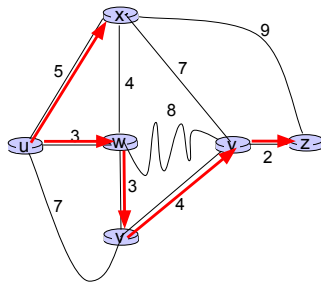
notas:

- construir el árbol del camino más corto rastreando los nodos predecesores
- pueden existir vínculos (pueden romperse arbitrariamente)



Capa de red 4- 82

Algoritmo de Dijkstra: ejemplo



Capa de red 4- 83

reenvío resultante
mesa en u:

| destino | enl |
|---------|-----------|
| v | $c(u, w)$ |
| x | $c(u, x)$ |
| y | $c(u, w)$ |
| w | $c(u, w)$ |
| z | $c(u, w)$ |

Algoritmo de Dijkstra, discusión

complejidad del algoritmo: n nodos

- cada iteración: hay que comprobar todos los nodos, w , que no están en N
- $n(n+1)/2$ comparaciones: $O(n^2)$
- implementaciones más eficientes posibles: $O(n \log n)$

oscilaciones posibles:

- Por ejemplo, el coste del enlace de soporte es igual a la cantidad de tráfico transportado:



Capa de red 4- 84

Capítulo 4: esquema

4.1 introducción

4.2 circuito virtual y redes de datagramas

4.3 qué hay dentro de un router

4.4 IP: Protocolo de Internet

- formato de datagrama
- Direccionamiento IPv4
- ICMP
- IPv6

4.5 algoritmos de enrutamiento

- estado del enlace
- vector de distancia
- enrutamiento jerárquico

4.6 El enrutamiento en Internet

- RIP
- OSPF
- BGP

4.7 enrutamiento de difusión y multidifusión

Capa de red 4- 85

Algoritmo de vectores de distancia

Ecuación de Bellman-Ford (programación dinámica)

dejar

$dx(y) :=$ coste del camino de menor coste desde x hasta y

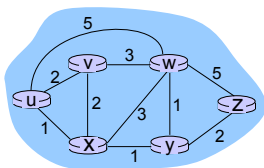
entonces

$$dx(y) = \min \{c(x, v) + dv(y)\}$$

coste del vecino v al destino y
coste para el vecino v
 \min tomado sobre todos los vecinos v de x

Capa de red 4- 86

Ejemplo de Bellman-Ford



claramente, $dv(z) = 5$, $dx(z) = 3$,
 $dw(z) = 3$

La ecuación B-F

$$\text{dice: } (z) = \min \{c(u, v) + dv(z), \\ c(u, x) + dx(z), \\ c(u, w) + dw(z)\}$$

$$= \min \{2 + 5, \\ 1 + 3, \\ 5 + 3\} = 4$$

El nodo que alcanza el mínimo es el siguiente salto en el camino más corto, utilizado en la tabla de reenvío

Capa de red 4- 87

Algoritmo de vectores de distancia

- $Dx(y)$ = estimación del menor coste de x a y

- x mantiene el vector de distancia $Dx = [Dx(y): y \in N]$

- nodo x :

- conoce el coste de cada vecino v : $c(x, v)$
- mantiene los vectores de distancia de sus vecinos. Para cada vecino v , x mantiene $Dv = [Dv(y): y \in N]$

Capa de red 4- 88

Capa de red 4- 96

Enrutamiento

jerárquico

nuestro estudio de rutas hasta ahora - idealización

- ❖ todos los routers son idénticos
- ❖ red "plana"

... *no* es cierto en la práctica

escala: con 600 millones de destinos:

- ❖ no puede almacenar todos los destinos en las tablas de enrutamiento.
- ❖ El intercambio de tablas de enrutamiento inundaría los enlaces.

autonomía administrativa

- ❖ internet = red de redes
- ❖ cada administrador de red puede querer controlar el enrutamiento en su propia red

Capa de red 4- 97

Enrutamiento

jerárquico

- ❖ reunir los routers en regiones, "**sistemas autónomos**" (AS)
- ❖ Cada AS dentro de un ISP
 - El ISP puede estar formado por uno o más ASes

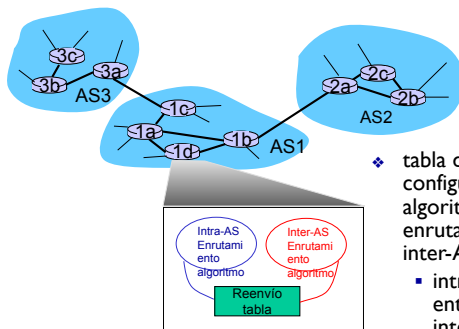
- ❖ los routers del mismo AS ejecutan el mismo protocolo de enrutamiento
 - Protocolo de enrutamiento "**intra-AS**".
 - los routers de diferentes AS pueden ejecutar diferentes protocolos de enrutamiento intra-AS

router de puerta de enlace:

- ❖ en el "borde" de su propio AS
- ❖ tiene enlace con un router

Capa de red 4- 98

ASes interconectados



- ❖ tabla de reenvío configurada por el algoritmo de enrutamiento intra e inter-AS
 - intra-AS establece entradas para dests internos
 - entradas de conjuntos inter-AS e intra-AS para dests externos

Capa de red 4- 99

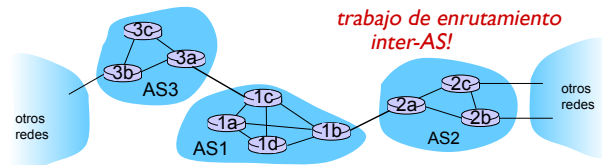
Tareas inter-AS

- ❖ suponga que el router en AS1 recibe un datagrama destinado fuera de AS1:
 - el router debe reenviar el paquete al router puerta de enlace, pero ¿cuál?

AS1 debe:

1. aprender qué destinos son accesibles a través de AS2, y cuáles a través de AS3
2. propagar esta información de accesibilidad a todos los routers en AS1

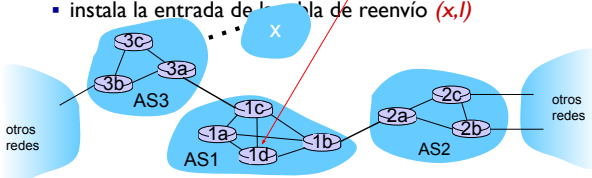
trabajo de enrutamiento inter-AS!



Capa de red 4- 100

Ejemplo: configuración de la tabla de reenvío en el router 1d

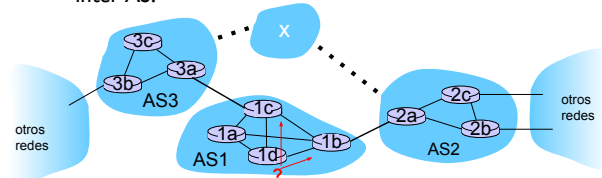
- ❖ Supongamos que AS1 se entera (a través del protocolo inter-AS) de que la subred **x** es accesible a través de AS3 (pasarela 1c), pero no a través de AS2
 - El protocolo inter-AS propaga la información de accesibilidad a todos los routers internos
- ❖ el router 1d determina, a partir de la información de enrutamiento intra-AS, que su interfaz **1** está en la ruta de menor coste hacia 1c
 - instala la entrada de la tabla de reenvío (**x,1**)



Capa de red 4- 101

Ejemplo: elegir entre varios AS

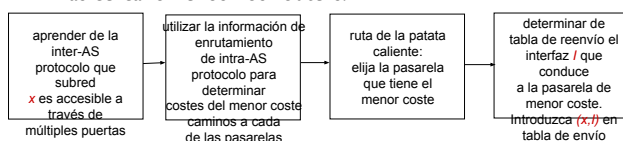
- ❖ Ahora supongamos que AS1 se entera por el protocolo inter-AS que la subred **x** es alcanzable desde AS3 y desde AS2.
- ❖ para configurar la tabla de reenvío, el router 1d debe determinar hacia qué puerta de enlace debe reenviar los paquetes para el destino **x**
 - esto también es tarea del protocolo de enrutamiento inter-AS!



Capa de red 4- 102

Ejemplo: elegir entre varios AS

- ❖ Ahora supongamos que AS1 se entera por el protocolo inter-AS que la subred **x** es alcanzable desde AS3 y desde AS2.
- ❖ para configurar la tabla de reenvío, el router 1d debe determinar hacia qué puerta de enlace debe reenviar los paquetes para el destino **x**
 - esto también es tarea del protocolo de enrutamiento inter-AS!
- ❖ **Enrutamiento de patata caliente:** enviar el paquete hacia el más cercano de los dos routers.



Capa de red 4- 103

Capítulo 4: esquema

- 4.1 introducción
- 4.2 circuito virtual y redes de datagramas
- 4.3 qué hay dentro de un router
- 4.4 IP: Protocolo de Internet
 - formato de datagrama
 - Direccionamiento IPv4
 - ICMP
 - IPv6

- 4.5 algoritmos de enrutamiento
 - estado del enlace
 - vector de distancia
 - enrutamiento jerárquico

- 4.6 El enrutamiento en Internet
 - RIP
 - OSPF
 - BGP

- 4.7 enrutamiento de difusión y multidifusión

Capa de red 4- 104

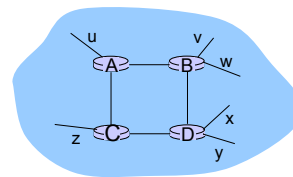
Enrutamiento intra-AS

- ❖ también conocidos como *protocolos de pasarela interior (IGP)*
- ❖ protocolos de enrutamiento intra-AS más comunes:
 - RIP: Protocolo de Información de Enrutamiento
 - OSPF: Open Shortest Path First
 - IGRP: Protocolo de Enrutamiento de Pasarela Interior (propiedad de Cisco)

Capa de red 4- 105

RIP ("Routing Information Protocol")

- ❖ incluido en la distribución BSD-UNIX en 1982
- ❖ algoritmo de vectores de distancia
 - métrica de distancia: # saltos (máximo = 15 saltos), cada enlace tiene un coste de 1
 - Los DVs se intercambian con los vecinos cada 30 segundos en un mensaje de respuesta (también conocido como *anuncio*)
 - cada anuncio: lista de hasta 25 *subredes de destino* (en el sentido de la *direccionamiento IP*)



desde el router A a las *subredes de destino*:

| subred | saltos de |
|--------|-----------|
| u | 1 |
| v | 2 |
| w | 2 |
| x | 3 |
| y | 3 |
| z | 2 |

Capa de red 4- 106

RIP: ejemplo

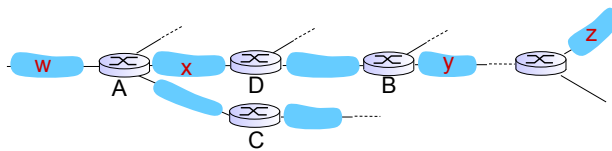


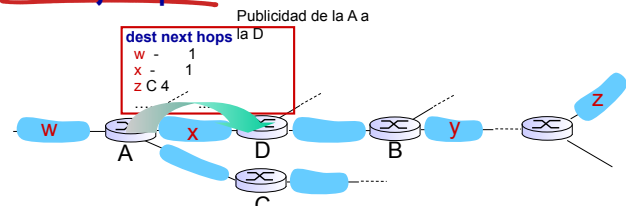
tabla de enrutamiento en el router D

subred de destino siguiente router # saltos al dest

w A 2
y B 2
z B 7
x --1

Capa de red 4- 107

RIP: ejemplo



Publicidad de la A a D

dest next hops
w ~ 1
x ~ 1
z C 4

tabla de enrutamiento en el router D

subred de destino siguiente router # saltos al dest

w A 2
y B 2
z B 7
x --1

A

5

Capa de red 4- 108

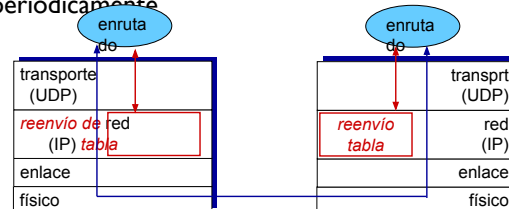
RIP: fallo de enlace, recuperación

- si no se escucha ningún anuncio después de 180 segundos --> el vecino/enlace se declara muerto
- rutas a través de vecinos invalidadas
 - nuevos anuncios enviados a los vecinos
 - los vecinos, a su vez, envían nuevos anuncios (si las tablas han cambiado)
 - la información sobre el fallo del enlace se propaga rápidamente (?) a toda la red
 - *envenenamiento inverso* utilizado para evitar los bucles de ping-pong (distancia infinita = 16 saltos)

Capa de red 4- 109

Procesamiento de la tabla RIP

- ❖ Tablas de enrutamiento RIP gestionadas por un proceso *a nivel de aplicación* llamado route-d (daemon)
- ❖ anuncios enviados en paquetes UDP, repetidos periódicamente



Capa de red 4- 110

OSPF (Open Shortest Path First)

- ❖ "abierto": disponible públicamente
- ❖ utiliza el algoritmo de estado del enlace
 - Difusión de paquetes LS
 - mapa de topología en cada nodo
 - Cálculo de rutas mediante el algoritmo de Dijkstra
- ❖ El anuncio OSPF lleva una entrada por vecino
- ❖ anuncios inundados a *todo el AS*
 - transportados en mensajes OSPF directamente sobre IP (en lugar de TCP o UDP)
- ❖ Protocolo de *enrutamiento IS-IS*: casi idéntico a OSPF

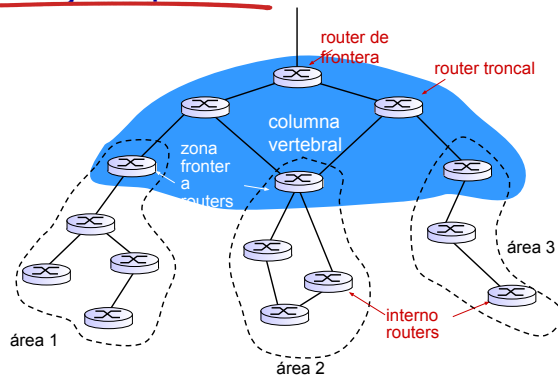
Capa de red 4- 111

Funciones "avanzadas" de OSPF (no en RIP)

- ❖ *seguridad*: todos los mensajes OSPF se autentican (para evitar intrusiones maliciosas)
- ❖ se permiten *múltiples* rutas del mismo coste (sólo una ruta en RIP)
- ❖ para cada enlace, múltiples métricas de coste para diferentes *TOS* (por ejemplo, el coste del enlace por satélite se establece "bajo" para el ToS de mejor esfuerzo; alto para el ToS en tiempo real)
- ❖ soporte integrado de uni y *multicast*:
 - Multicast OSPF (MOSPF) utiliza la misma base de datos de topología que OSPF
- ❖ OSPF *jerárquico* en grandes dominios.

Capa de red 4- 112

OSPF jerárquico



Capa de red 4- 113

OSPF jerárquico

- ❖ **jerarquía de dos niveles:** área local, red troncal.
 - anuncios de estado de enlace sólo en el área
 - Cada nodo tiene una topología de área detallada; sólo conoce la dirección (camino más corto) hacia las redes de otras áreas.
- ❖ **routers de frontera de área:** "resumir" las distancias a las redes de su propia área, anunciarlas a otros routers de frontera de área.
- ❖ **routers backbone:** ejecutar el enrutamiento OSPF limitado al backbone.
- ❖ **routers fronterizos:** conectan con otros AS.

Capa de red 4- 114

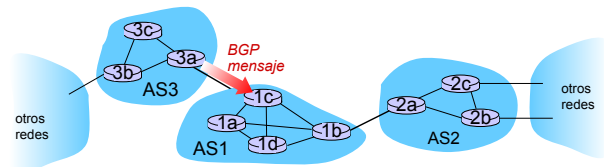
Enrutamiento inter-AS en Internet: BGP

- ❖ **BGP (Border Gateway Protocol):** el protocolo de enrutamiento interdominio de facto
 - "El pegamento que mantiene unido a Internet"
- ❖ BGP proporciona a cada AS un medio para:
 - obtener información de accesibilidad de subredes de los AS vecinos: **eBGP**
 - propagar la información de alcanzabilidad a todos los routers internos del AS: **iBGP**
 - determinar las "buenas" rutas hacia otras redes basándose en la información de alcanzabilidad y la política.
- ❖ permite a la subred anunciar su existencia al resto de Internet: **"Estoy aquí"**

Capa de red 4- 115

Conceptos básicos de BGP

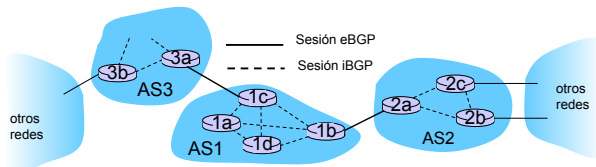
- ❖ **Sesión BGP:** dos routers BGP ("peers") intercambian mensajes BGP:
 - anunciar **rutas** a diferentes prefijos de red de destino (protocolo "path vector")
 - intercambiados a través de conexiones TCP semipermanentes
- ❖ cuando AS3 anuncia un prefijo a AS1:
 - AS3 **promete** que reenviará los datagramas hacia ese prefijo
 - El AS3 puede agregar prefijos en su anuncio



Capa de red 4- 116

Conceptos básicos de BGP: distribución de la información de la ruta

- ❖ utilizando la sesión eBGP entre 3a y 1c, AS3 envía información de alcanzabilidad del prefijo a AS1.
 - 1c puede entonces utilizar iBGP para distribuir la información del nuevo prefijo a todos los routers del AS1
 - 1b puede entonces volver a anunciar la nueva información de alcanzabilidad a AS2 a través de la sesión eBGP de 1b a 2a
- ❖ cuando el router conoce un nuevo prefijo, crea una entrada para el prefijo en su tabla de reenvío.



Capa de red 4- 117

Atributos de ruta y rutas BGP

- ❖ el prefijo anunciado incluye atributos BGP
 - prefijo + atributos = "ruta"
- ❖ dos atributos importantes:
 - **AS-PATH:** contiene los ASs por los que ha pasado el anuncio del prefijo; por ejemplo, AS 67, AS 17
 - **NEXT-HOP:** la dirección IP de la interfaz del router que inicia el AS PATH.
- ❖ El router de la puerta de enlace que recibe el anuncio de la ruta utiliza la **política de importación** para aceptar/rechazar
 - por ejemplo, no enrutamiento nunca a través del AS x
 - enrutamiento **basado en políticas**

Capa de red 4- 118

Selección de rutas BGP

- ❖ El router puede conocer más de una ruta hacia el AS de destino, selecciona la ruta basándose en:
 1. atributo de valor de preferencia local: decisión política
 2. AS-PATH más corto
 3. router NEXT-HOP más cercano: enrutamiento hot potato
 4. criterios adicionales

Capa de red 4- 119

Mensajes BGP

- ❖ Mensajes BGP intercambiados entre pares a través de una conexión TCP
- ❖ Mensajes BGP:
 - **OPEN:** abre la conexión TCP con el par y autentifica el remitente
 - **ACTUALIZACIÓN:** anuncia la nueva ruta (o retira la antigua)
 - **KEEPALIVE:** mantiene viva la conexión en ausencia de UPDATES; también ACKs a la petición de OPEN
 - **NOTIFICACIÓN:** informa de los errores en el mensaje anterior; también se utiliza para cerrar la conexión

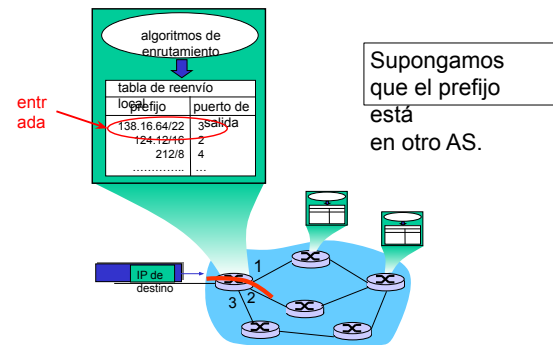
Capa de red 4- 120

Cómo se puede llegar a la tabla de reenvío de un router:

¿Cómo llega una entrada a la tabla de reenvío de un router?

- ❖ La respuesta es complicada.
- ❖ Une el enrutamiento jerárquico (sección 4.5.3) con BGP (4.6.3) y OSPF (4.6.2).
- ❖ Proporciona una buena visión general de BGP.

¿Cómo se introduce la entrada en la tabla de reenvío?

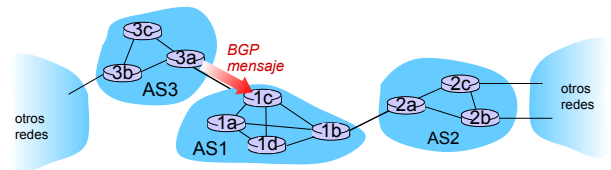


¿Cómo se introduce la entrada en la tabla de reenvío?

Resumen de alto nivel

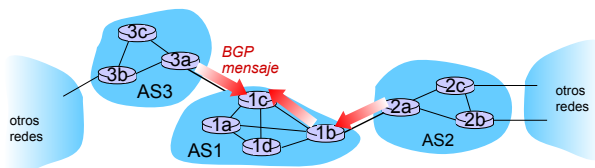
1. El router conoce el prefijo
2. El router determina el puerto de salida para el prefijo
3. El router introduce el prefijo-puerto en la tabla de reenvío

El router conoce el prefijo



- ❖ El mensaje BGP contiene "rutas"
- ❖ "ruta" es un prefijo y atributos: AS-PATH, NEXT-HOP,...
- ❖ Ejemplo: ruta:
 - ❖ Prefijo: 138.16.64/22 ; AS-PATH: AS3 AS131 ; NEXT-HOP: 201.44.13.125

El router puede recibir varias rutas



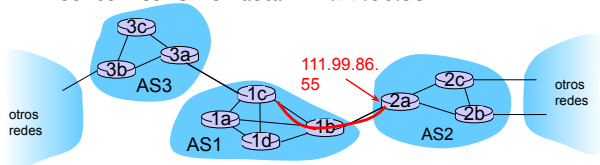
- ❖ El router puede recibir varias rutas para el mismo prefijo
- ❖ Tiene que seleccionar una ruta

Seleccionar la mejor ruta BGP al prefijo

- ❖ El router selecciona la ruta basada en el AS-PATH más corto
- ❖ Ejemplo:
 - ❖ AS2 AS17 a 138.16.64/22 (selección)
 - ❖ AS3 AS131 AS201 a 138.16.64/22
- ❖ ¿Y si hay un empate? Ya volveremos a hablar de ello.

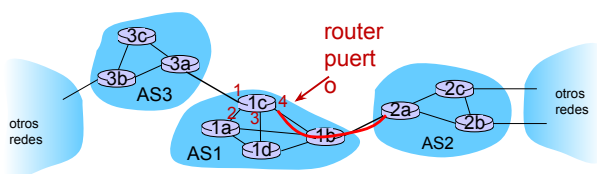
Encontrar la mejor ruta interna a la ruta BGP

- ❖ Utilizar el atributo NEXT-HOP de la ruta seleccionada
 - El atributo NEXT-HOP de la ruta es la dirección IP de la interfaz del router que inicia el AS PATH.
- ❖ Ejemplo:
 - ❖ AS-PATH: AS2 AS17 ; NEXT-HOP: 111.99.86.55
- ❖ El router utiliza OSPF para encontrar el camino más corto desde 1c hasta 111.99.86.55



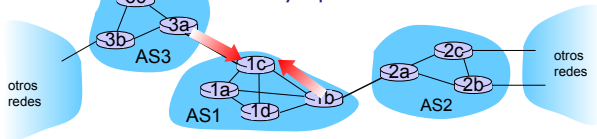
El router identifica el puerto para la ruta

- ❖ Identifica el puerto en la ruta más corta de OSPF
- ❖ Añade una entrada de prefijo-puerto a su tabla de reenvío:
 - (138.16.64/22 , puerto 4)



Ruta de la patata caliente

- ❖ Supongamos que hay dos o más rutas intermedias óptimas.
- ❖ A continuación, elija la ruta con el NEXT-HOP más cercano
 - Utilizar OSPF para determinar qué puerta de enlace es la más cercana
 - P: De 1c, ¿elegir AS3 AS131 o AS2 AS17?
 - A: AS3 AS201 ya que está más cerca

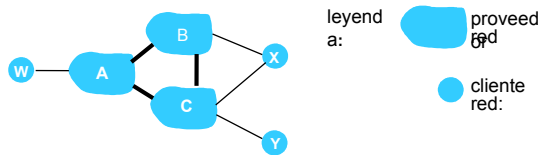


¿Cómo se introduce la entrada en la tabla de reenvío?

Resumen

1. El router conoce el prefijo
 - a través de anuncios de ruta BGP de otros routers
2. Determinar el puerto de salida del router para el prefijo
 - Utilizar la selección de rutas BGP para encontrar la mejor ruta inter-AS
 - Utilizar OSPF para encontrar la mejor ruta intra-AS que lleve a la mejor ruta inter-AS
 - El router identifica el puerto del router para esa mejor ruta
3. Introducir una entrada de prefijo-puerto en la tabla de reenvío

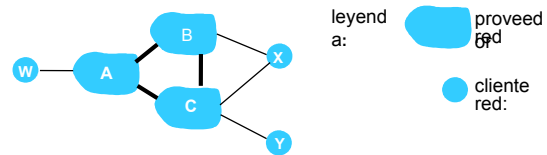
Política de enrutamiento BGP



- ❖ A,B,C son **redes de proveedores**
- ❖ X,W,Y son clientes (de redes de proveedores)
- ❖ X es **dual-homed**: está conectado a dos redes
 - X no quiere pasar de B a C a través de A
 - ..por lo que X no anunciará a B una ruta hacia C

Capa de red 4- 131

Política de enrutamiento BGP (2)



- ❖ A anuncia la ruta AW a B
- ❖ B anuncia el camino BAW a X
- ❖ ¿Debe B anunciar la ruta BAW a C?
 - De ninguna manera. B no obtiene "ingresos" por enrutar CBAW ya que ni W ni C son clientes de B
 - B quiere obligar a C a dirigirse a W a través de A
 - B **sólo quiere** hacer rutas hacia/desde sus clientes.

Capa de red 4- 132

¿Por qué un enrutamiento diferente Intra , Inter-AS?

política:

- ❖ inter-AS: el administrador quiere controlar cómo se enruta su tráfico, quién se enruta a través de su red.
- ❖ intra-AS: administración única, por lo que no se necesitan decisiones políticas

escala:

- ❖ el enrutamiento jerárquico ahorra el tamaño de la tabla, reduce el tráfico de actualización

rendimiento:

- ❖ intra-AS: puede centrarse en el rendimiento
- ❖ inter-AS: la política puede dominar sobre el rendimiento

Capa de red 4- 133

Capítulo 4: esquema

4.1 introducción

4.2 circuito virtual y redes de datagramas

4.3 qué hay dentro de un router

4.4 IP: Protocolo de Internet

- formato de datagrama
- Direccionamiento IPv4
- ICMP
- IPv6

4.5 algoritmos de enrutamiento

- estado del enlace
- vector de distancia
- enrutamiento jerárquico

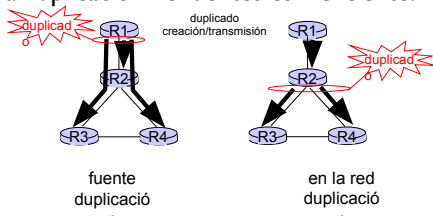
4.6 El enrutamiento en Internet

- RIP
- OSPF
- BGP

4.7 enrutamiento de difusión y multidifusión

Enrutamiento de difusión

- ❖ entregar paquetes desde el origen a todos los demás nodos
- ❖ La duplicación de fuentes es ineficiente:



- ❖ duplicación de la fuente: ¿cómo determina la fuente las direcciones del destinatario?

Capa de red 4- 135

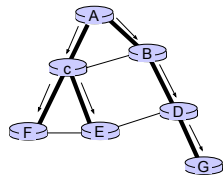
Duplicación en la red

- ❖ **inundación**: cuando un nodo recibe un paquete de difusión, envía una copia a todos los vecinos
 - problemas: ciclos y tormenta de emisión
- ❖ **Inundación controlada**: el nodo sólo emite el paquete si no lo ha emitido antes
 - El nodo mantiene un registro de los ids de los paquetes ya difundidos
 - o reenvío por camino inverso (RPF): sólo reenvía el paquete si llega por el camino más corto entre el nodo y el origen
- ❖ **árbol de expansión**:
 - no hay paquetes redundantes recibidos por ningún nodo

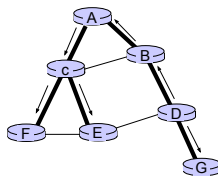
Capa de red 4- 136

Árbol de expansión

- ❖ construir primero un árbol de expansión
- ❖ los nodos reenvían/realizan copias sólo a lo largo del árbol de expansión



(a) emisión iniciada en A

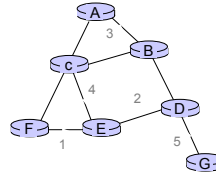


(b) emisión iniciada en D

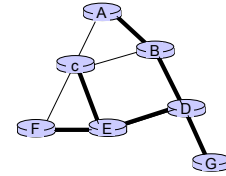
Capa de red 4- 137

Árbol de expansión: creación

- ❖ nodo central
- ❖ cada nodo envía un mensaje de unión unicast al nodo central
 - mensaje reenviado hasta que llega a un nodo que ya pertenece al árbol de expansión



(a) construcción por etapas del árbol de expansión (centro: E)



(b) árbol de expansión construido

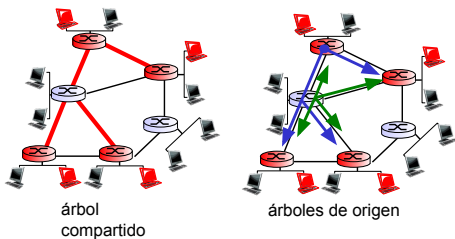
Capa de red 4- 138

Enrutamiento multidifusión:

planteamiento del problema

objetivo: encontrar un árbol (o árboles) que conecte los routers que tengan miembros locales de mcast

- ❖ **árbol:** no se utilizan todos los caminos entre routers
- ❖ **árbol compartido:** los miembros de un grupo utilizan un único árbol



Capa de red 4- 139

Enfoques para la construcción de árboles mcast

enfoques:

- ❖ **árbol basado en la fuente:** un árbol por fuente
 - árboles del camino más corto
 - reenvío de ruta inversa
- ❖ **grupo-árbol compartido:** el grupo utiliza un árbol
 - mínimo de extensión (Steiner)
 - árboles en el centro

...primero se examinan los enfoques básicos y luego los protocolos específicos que adoptan estos enfoques

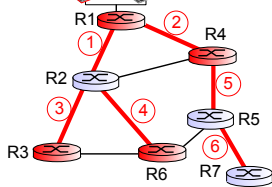
Capa de red 4- 140

Árbol del camino más corto

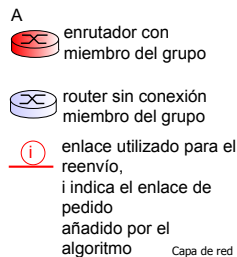
- ❖ árbol de reenvío de mcast: árbol de rutas de camino más corto desde el origen a todos los receptores

▪ Algoritmo de Dijkstra

s: fuente



LEYEND



Capa de red 4- 141

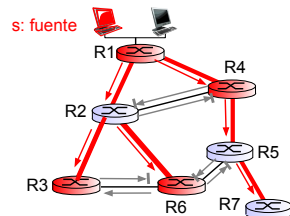
Reenvío de ruta inversa

- ❖ se basan en el conocimiento del enrutador de la ruta más corta de unidifusión desde él hasta el remitente

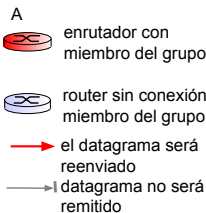
- ❖ **cada router tiene un comportamiento de reenvío simple:**
 - si programa mcast recibido en el enlace entrante en el camino más corto de vuelta al centro) **luego** inundar el datagrama en todos los enlaces salientes
 - **si no**, ignorar el datagrama

Capa de red 4- 142

Reenvío de ruta inversa: ejemplo



LEYEND

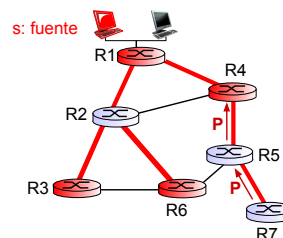


- ❖ el resultado es un SPT *inverso* específico de la fuente
 - puede ser una mala elección con enlaces asimétricos

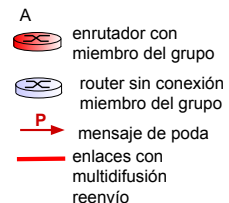
Capa de red 4- 143

Reenvío de la ruta inversa: poda

- ❖ el árbol de reenvío contiene subárboles sin miembros del grupo mcast
 - no es necesario reenviar los datagramas hacia el subárbol
 - "prune" msgs enviados en sentido ascendente por el router sin miembros del grupo en sentido descendente



LEYEND



Capa de red 4- 144

Árbol compartido: árbol steiner

- ❖ **árbol de steiner**: árbol de coste mínimo que conecta todos los routers con los miembros del grupo adjuntos
- ❖ el problema es NP-completo
- ❖ existe una excelente heurística
- ❖ no se utiliza en la práctica:
 - complejidad computacional
 - se necesita información sobre toda la red
 - monolítico: se ejecuta de nuevo cada vez que un enrutador tiene que entrar/salir

Capa de red 4- 145

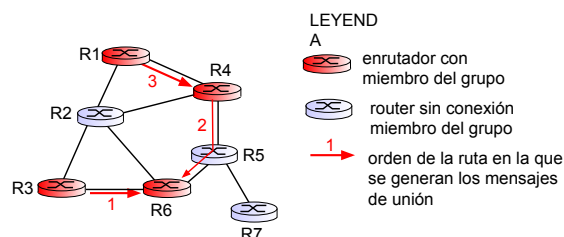
Árboles basados en el centro

- ❖ árbol de reparto único compartido por todos
- ❖ un router identificado como "**centro**" del árbol
- ❖ para unirse:
 - el router de borde envía un *mensaje de unión* unicast dirigido al router central
 - *join-msg* "procesado" por los routers intermedios y reenviado hacia el centro
 - *join-msg* o bien llega a la rama del árbol existente para este centro, o bien llega al centro
 - la ruta tomada por *join-msg* se convierte en una nueva rama del árbol para este router

Capa de red 4- 146

Árboles basados en el centro: ejemplo

Supongamos que R6 se elige como centro:



Capa de red 4- 147

Enrutamiento de multidifusión en Internet: DVMRP

- ❖ **DVMRP**: protocolo de enrutamiento de multidifusión por vector de distancia, RFC1075
- ❖ **inundación y poda**: reenvío de ruta inversa, árbol basado en la fuente
 - Árbol RPF basado en las tablas de enrutamiento propias del DVMRP construidas por los routers DVMRP en comunicación
 - no hay suposiciones sobre el unicast subyacente
 - datagrama inicial al grupo mcast inundado en todas partes a través de RPF
 - routers que no quieren el grupo: envían msgs de prune upstream

Capa de red 4- 148

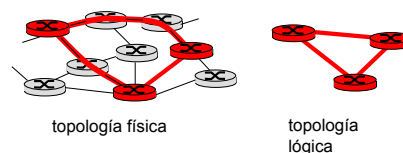
DVMRP: continuación...

- ❖ **estado blando**: El router DVMRP "olvida" periódicamente (1 min.) las ramas podadas:
 - Los datos de mcast vuelven a fluir por la rama no podada
 - router de bajada: reprune o sigue recibiendo datos
- ❖ Los enrutadores pueden volver a pasar rápidamente al árbol
 - siguiente IGMP join en la hoja
- ❖ chismes
 - comúnmente implementado en el router comercial

Capa de red 4- 149

Túnel

P: ¿Cómo conectar "islas" de routers multicast en un "mar" de routers unicast?



- ❖ datagrama mcast encapsulado dentro de un datagrama "normal" (sin dirección multidestino)
- ❖ el datagrama IP normal se envía a través del "túnel" por medio de la unidifusión IP normal al enrutador mcast receptor (recuerde la tunelización IPv6 dentro de IPv4)
- ❖ el router mcast receptor desencapsula para obtener el datagrama mcast

Capa de red 4- 150

PIM: Protocolo de multidifusión independiente

- ❖ no depende de ningún algoritmo de enrutamiento unicast específico (funciona con todos)
- ❖ dos escenarios diferentes de distribución de multidifusión :

denso:

- ❖ miembros del grupo densamente apiñados, en "estrecha" proximidad.
- ❖ ancho de banda más abundante

escaso:

- ❖ # redes con miembros del grupo pequeños wrt # redes interconectadas
- ❖ miembros del grupo "muy dispersos"
- ❖ el ancho de banda no es abundante

Capa de red 4- 151

Consecuencias de la dicotomía escasa-densa:

denso

- ❖ la pertenencia a un grupo por parte de los routers se *asume* hasta que los routers podan explícitamente
- ❖ construcción *basada en datos* en el árbol de difusión (por ejemplo, RPF)
- ❖ ancho de banda y el procesamiento de no-grupo-router *despilfarro*

escaso:

- ❖ no hay miembros hasta que los routers se unen explícitamente
- ❖ construcción del árbol de emisión en función *del receptor* (por ejemplo, basado en el centro)
- ❖ ancho de banda y el procesamiento de no-grupo *conservador*

Capa de red 4- 152

Modo denso PIM

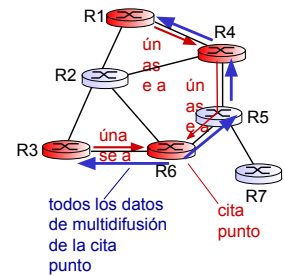
flood-and-prune RPF: similar a DVMRP pero...

- ❖ El protocolo unicast subyacente proporciona información RPF para el datagrama entrante
- ❖ una inundación descendente menos complicada (menos eficiente) que el DVMRP reduce la dependencia del algoritmo de enrutamiento subyacente
- ❖ tiene un mecanismo de protocolo para que el enrutador detecte que es un enrutador de nodo hoja

Capa de red 4- 153

PIM - modo disperso

- ❖ enfoque basado en el centro
- ❖ el router envía un mensaje de *unión* al punto de encuentro (RP)
 - los routers intermedios actualizan el estado y reenvían la *unión*
- ❖ después de unirse a través del RP, el router puede cambiar al árbol específico de la fuente
 - mayor rendimiento: menos concentración, recorridos más cortos

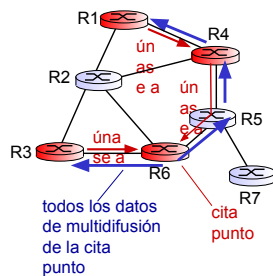


Capa de red 4- 154

PIM - modo disperso

remitente(s):

- ❖ datos unicast al RP, que distribuye por el árbol enraizado en el RP
- ❖ El RP puede extender el árbol de difusión hacia arriba hasta la fuente
- ❖ El RP puede enviar un mensaje de *parada* si no hay receptores adjuntos
 - "nadie está"



Capa de red 4- 155

Capítulo 4: ¡hecho!

- 4.1 introducción
- 4.2 circuito virtual y redes de datagramas
- 4.3 qué hay dentro de un router
- 4.4 IP: Protocolo de Internet
 - formato de datagrama, direccionamiento IPv4, ICMP, Ipv6
- ❖ Comprender los principios en los que se basan los servicios de la capa de red:
 - modelos de servicio de la capa de red, reenvío frente a enrutamiento, funcionamiento de un enrutador, enrutamiento (selección de ruta), difusión, multidifusión
- ❖ instanciación, implementación en Internet
- 4.5 algoritmos de enrutamiento
 - estado del enlace, vector de distancia, enrutamiento jerárquico
- 4.6 El enrutamiento en Internet
 - RIP, OSPF, BGP
- 4.7 enrutamiento de difusión y multidifusión

Capa de red 4- 156