UNCUYO
UNIVERSIDAD NACIONAL DE CUYO
FACULTAD DE INGENIERÍA
Licenciatura en Ciencias de la Computación

Redes de Computadoras

Unidad 3

Capa de red

Dr. Ing. Pablo Daniel Godoy (pablo.godoy@ingenieria.uncuyo.edu.ar)

Temario

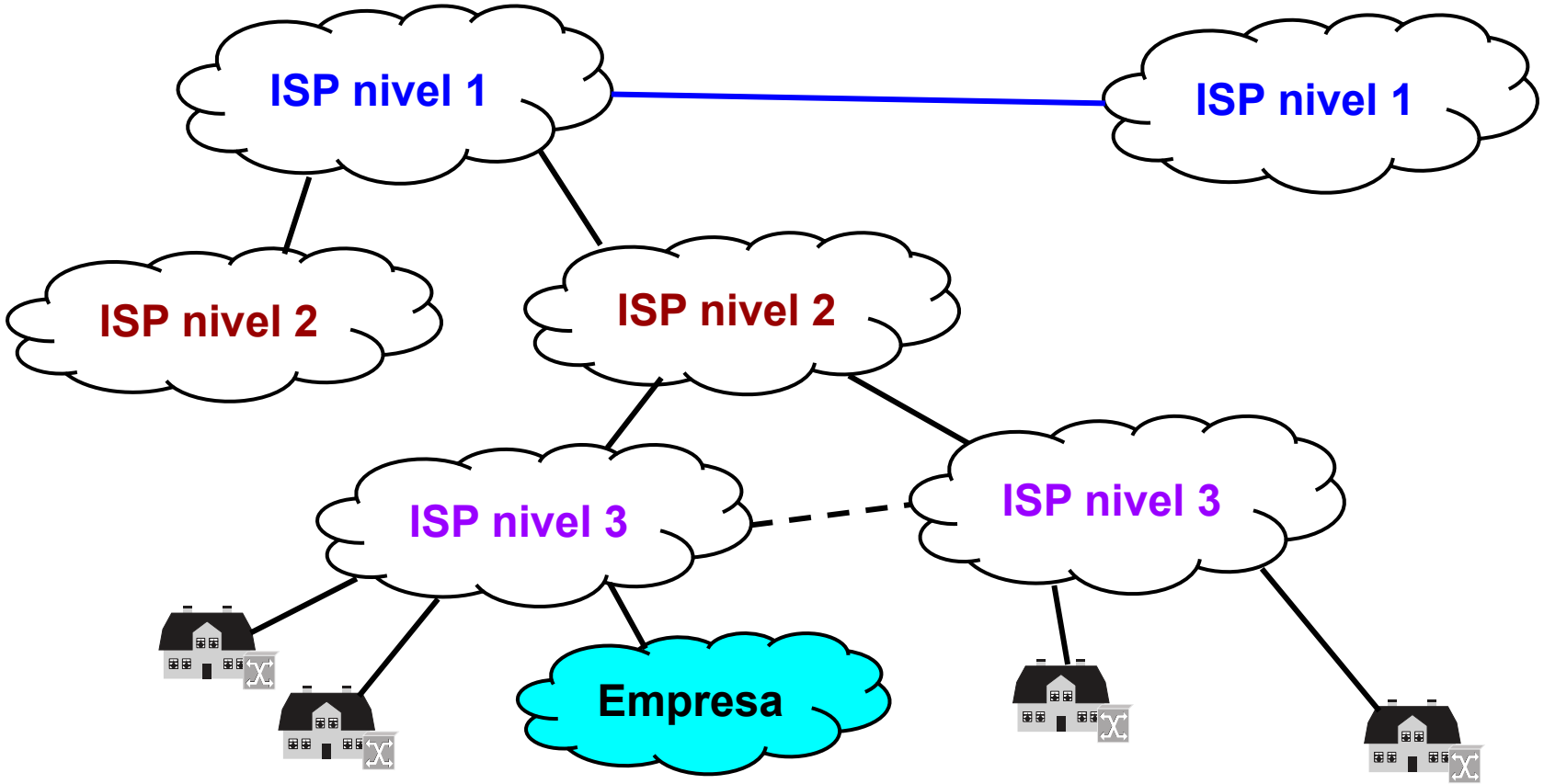
- **Introducción.**
  - **Repaso**
  - **Servicios proporcionados por la capa de red.**
  - **Tipos de servicios.**
  - **Interconexión de redes. Dificultades. Mecanismos**
  - **Descubrimiento del MTU de la ruta y fragmentación de paquetes.**
- Congestión y calidad de servicio.
- IPv4
- IPv6
- Protocolos de control de Internet (ICMP)
- Conmutación basada en etiquetas (MPLS)
- Algoritmos de enrutamiento

Capa de red

- **Llevar (Enrutar)** paquetes desde el origen al destino, pudiendo estar los mismos en **diferentes redes** de **diferentes tecnologías**, y pudiendo pasar por **muchas redes intermedias** de diferentes tecnologías.
- Nuevo componente: **enrutador**

- Requisitos de diseño:
  - Los servicios proporcionados por la capa de red deben ser **independientes** del enrutador.
  - La capa superior (capa de transporte) debe estar **aislada de los detalles de las redes subyacentes** (número y tecnología de routers, topologías de las redes, etc.)
  - Esquema de **direccionamiento uniforme**.

Arquitectura de Internet: niveles de ISPs



Capa de red

Problema a resolver por la capa de red:

¿Cómo llega el paquete de la máquina H1 a la máquina H2?

¿Cómo interconectar dos tipos de redes diferentes (de cualquier tipo)?

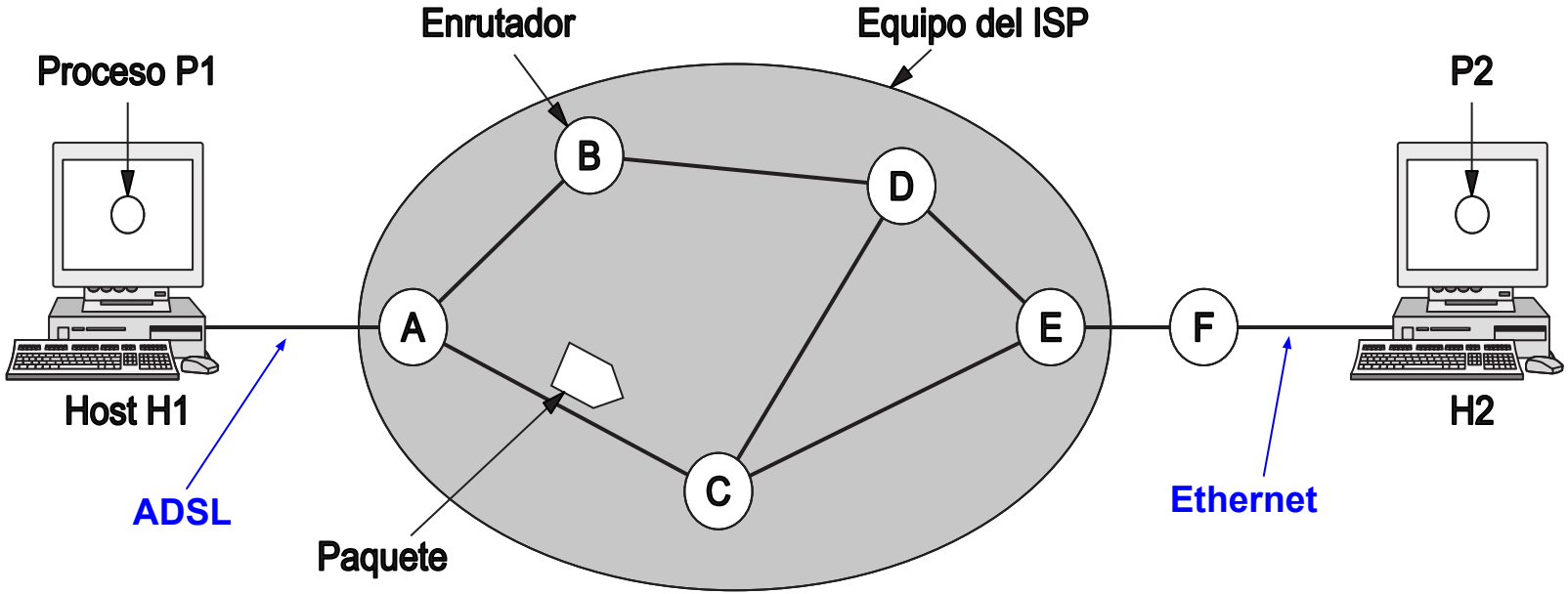


Figura obtenida de: A. Tanenbaum, D. Wetherall, "Redes de computadoras", Quinta edición (2012), pag. 306

Conmutación por circuitos

- Previo al envío de datos, se establece un **circuito físico o lógico** entre el destino y el origen. Esto implica una “negociación” en cada conmutador.
  - Formados por varios enlaces entre conmutadores
- Los conmutadores conectan (física o virtualmente) las entradas con las salidas adecuadas para formar el circuito.
  - Conexión virtual: TDM, FDM, etc.
- Los datos siguen siempre el mismo circuito mientras el conmutador no cambie su configuración.

Conmutación por paquetes

- Los datos se dividen en “paquetes”, y cada paquete se transporta (rutea) por separado a través de la red.
- Los paquetes deben poseer información sobre el destino, para que cada conmutador decida por cuál salida enviarlo.

Conmutación por circuitos y conmutación por paquetes

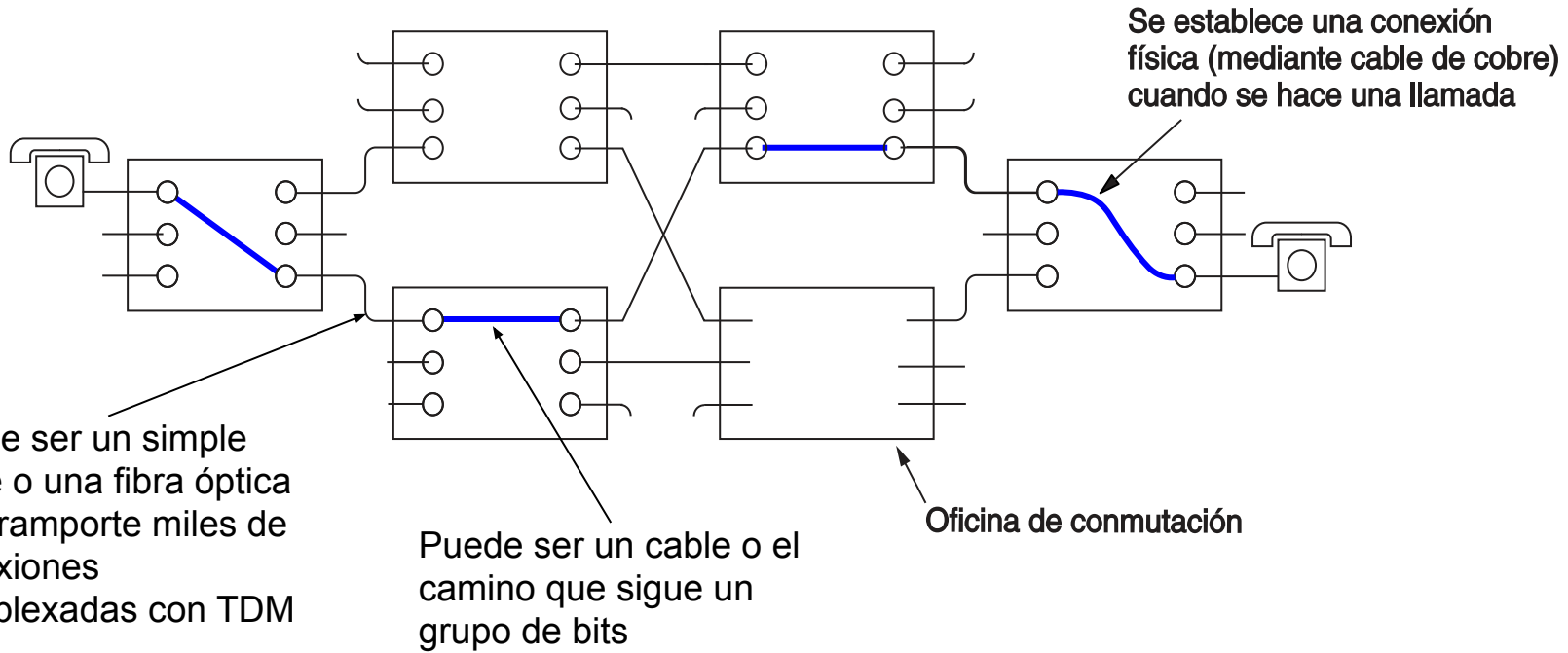


Figura obtenida de: A. Tanenbaum, D. Wetherall, "Redes de computadoras", Quinta edición (2012), pag. 139

Conmutación por circuitos: sistemas jerárquicos

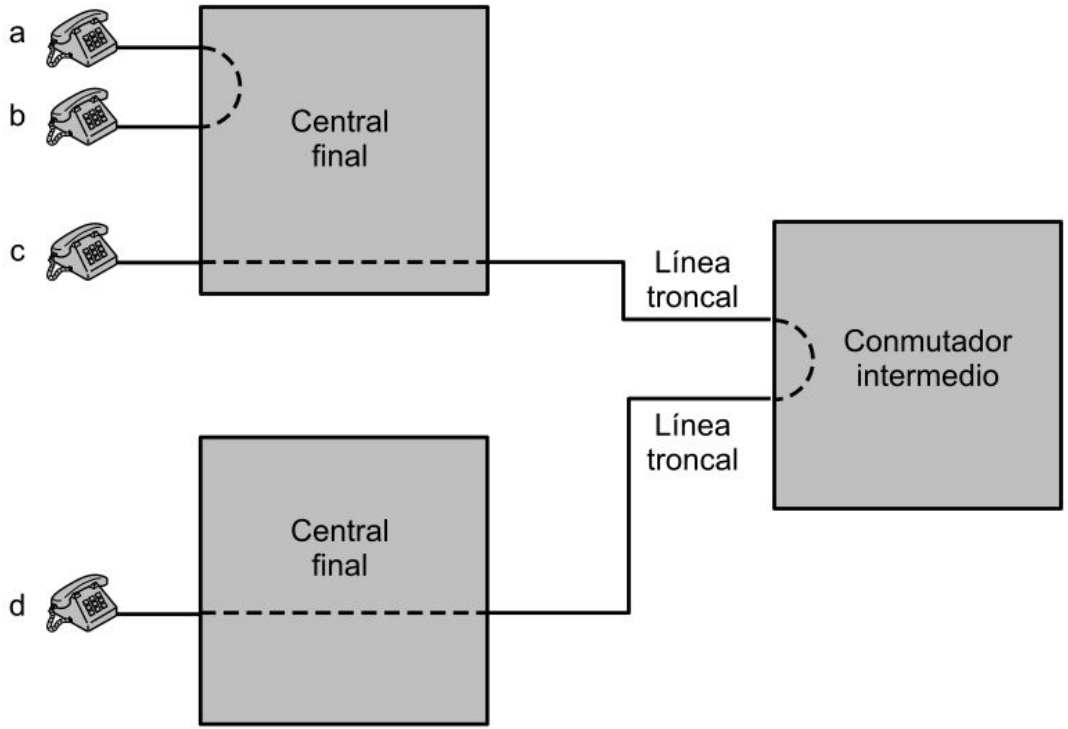


Figura obtenida de: William Stallings, Comunicaciones y Redes de Computadores, 7ma Edición, pag. 315

Conmutación por circuitos y conmutación por paquetes

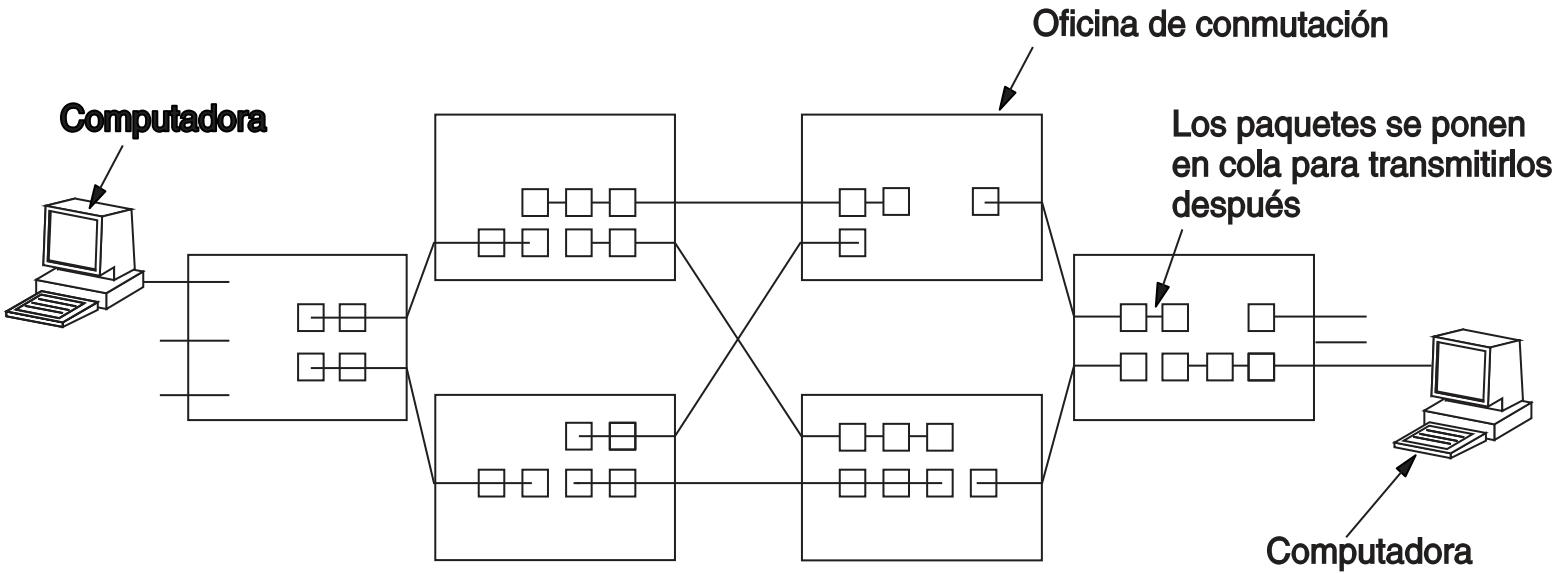


Figura obtenida de: A. Tanenbaum, D. Wetherall, "Redes de computadoras", Quinta edición (2012), pag. 139

Conmutación por circuitos y conmutación por paquetes

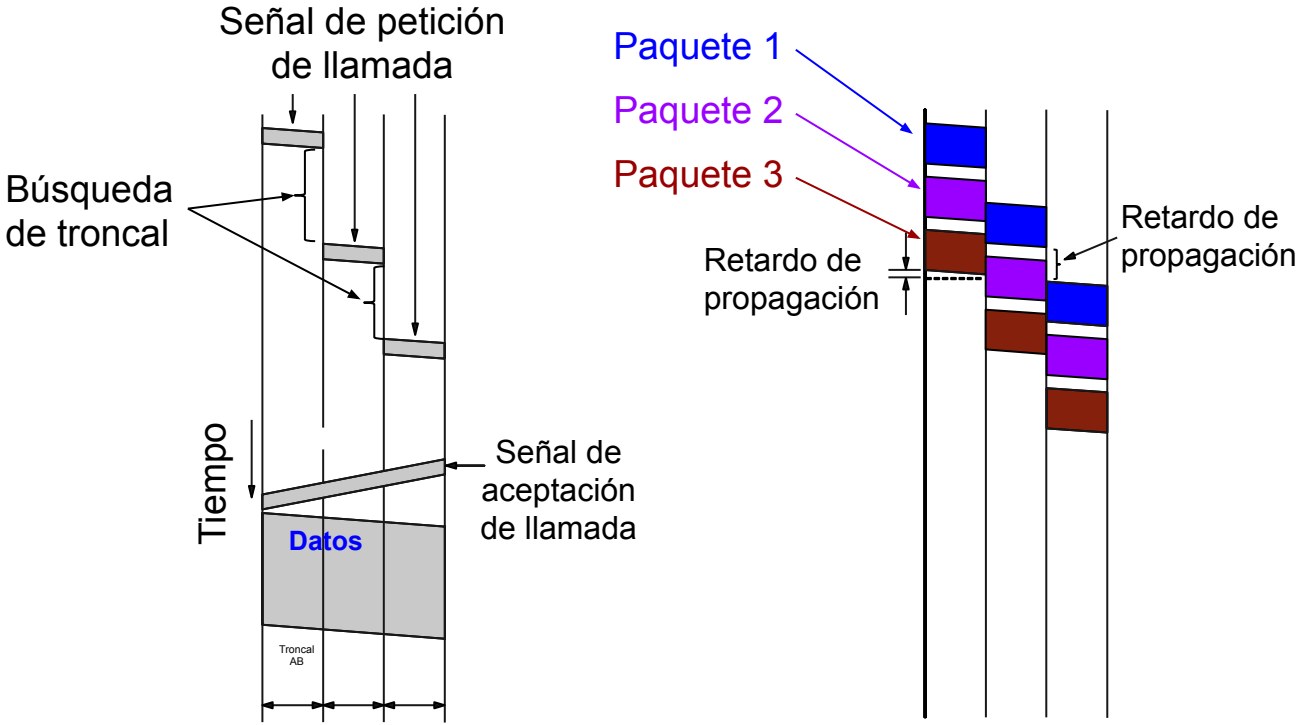


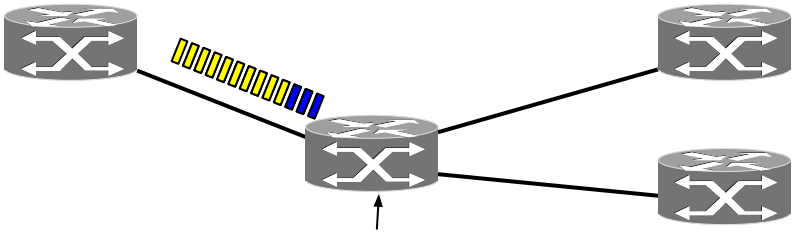
Figura basada en: A. Tanenbaum, D. Wetherall, "Redes de computadoras", Quinta edición (2012), pag. 140

Elemento	Conmutación de circuitos	Conmutación de paquetes
Establecimiento de llamadas.	Requerido	No es necesario.
Trayectoria física dedicada.	Sí	No
Cada paquete sigue la misma trayectoria.	Sí	No
Los paquetes llegan en orden.	Sí	No
Una falla en un conmutador es fatal.	Sí	No
Ancho de banda disponible.	Fijo	Dinámico.
Tiempo de una posible congestión.	Durante el establecimiento de la llamada.	En todos los paquetes.
Ancho de banda potencialmente desperdiciado.	Sí	No
Transmisión de almacenamiento y envío.	No	Sí
Cobro.	Por minuto.	Por paquete.

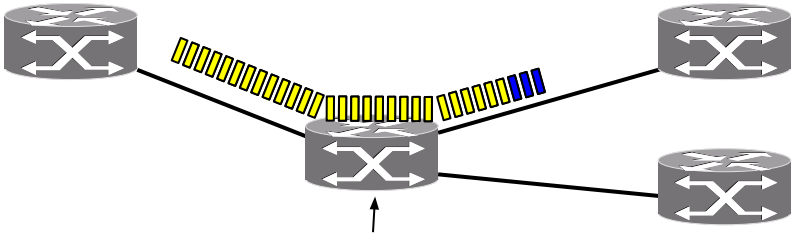
Figura basada en: A. Tanenbaum, D. Wetherall, "Redes de computadoras", Quinta edición (2012), pag. 142

Conmutación por paquetes: con y sin almacenamiento

Sin almacenamiento

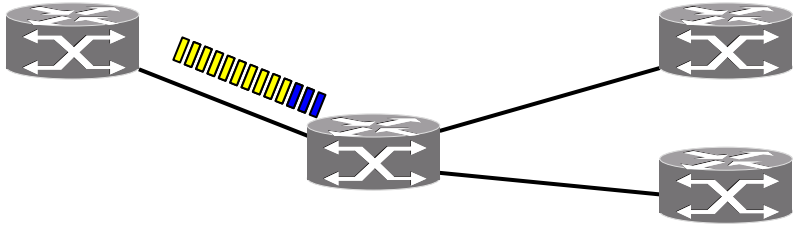


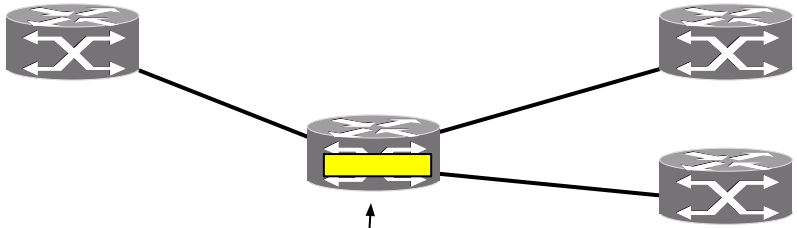
Detecta el destino a partir del encabezado



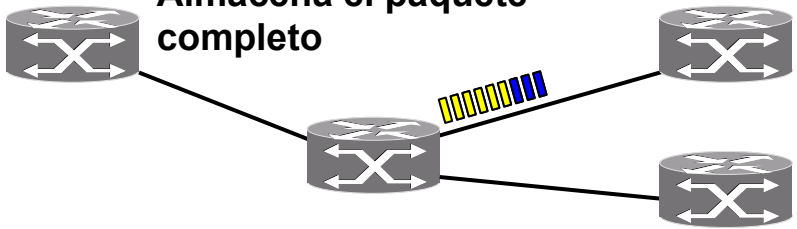
Reenvía los bits a medida que los recibe sin almacenarlos

Con almacenamiento





Almacena el paquete completo



Conmutación por paquetes

- Sin almacenamiento (o al vuelo):
  - Los bits del paquete se van reenviando a medida que llegan.
  - Se lee el encabezado para detectar el destino, y luego el paquete comienza a reenviarse a medida que llega.
  - **Ventajas: Menor latencia y costo (No es necesario almacenar el paquete completo).**
  - Desventaja: No puede verificarse la integridad del paquete .
- Con almacenamiento y reenvío:
  - El paquete se reenvía luego de que se ha recibido completo.
  - Es necesario almacenar los bits a medida que llegan.
  - Desventaja: Mayor latencia y costo en memoria.
  - **Ventaja: Se puede verificar la integridad del paquete (luego puede pedirse reenvío o descartarse).**

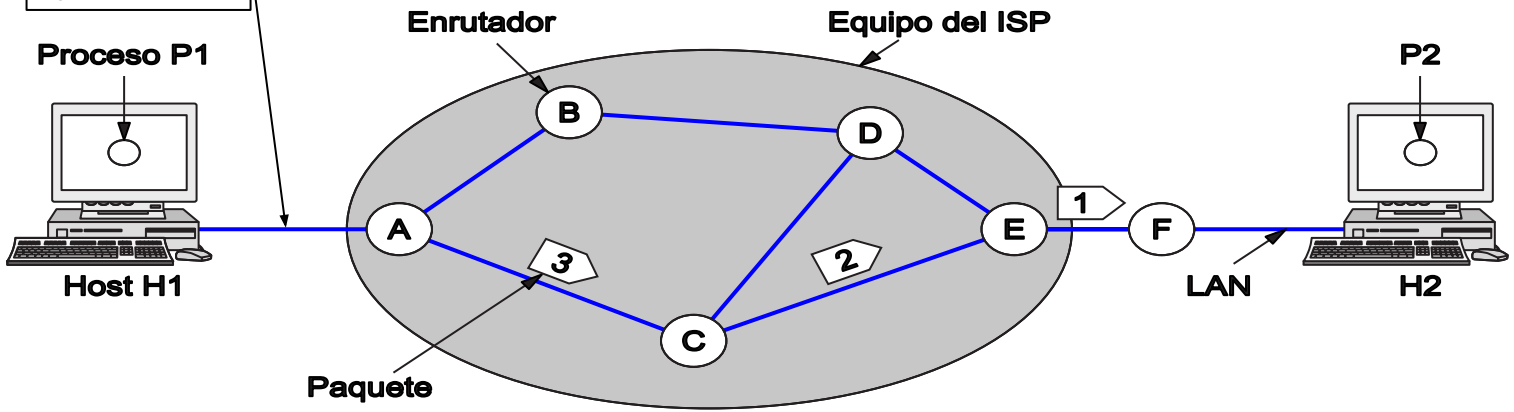
Servicios sin conexión y orientados a conexión

- Servicios sin conexión.
  - No hay conexión: **Sin negociación** previa entre origen y destino.
  - No se establecerse un circuito o ruta previa al envío de datos.
  - Los paquetes de datos se **rutean por separado** y de manera independiente.
  - La información de ruteo de los paquetes es la **dirección de destino**.
  - Las tablas de ruteo asocian el **destino final** con el **siguiente** salto.
  - Basado en el sistema de telegramas.

Un servicio sin conexión puede establecerse sobre una capa de nivel inferior orientada a conexión (por ejemplo, IP sobre ADSL), o sobre una red de redes que incluya ambos tipos de servicios (IP sobre una red de redes que incluya redes Ethernet, ADSL, SONET y PPP).

Servicios sin conexión: ruteo de paquetes

ADSL y PPP (ejemplo)



¿Cómo arman los routers estas tablas?: Algoritmos de ruteo (se verá al final de esta unidad)

Tabla de A

A	–
B	B
C	C
D	B
E	C
F	C

Destino — Línea de salida o próximo salto

Tabla de C

A	A
B	A
C	–
D	E
E	E
F	E

Tabla de E

A	C
B	D
C	C
D	D
E	–
F	F

Figura basada en: A. Tanenbaum, D. Wetherall, "Redes de computadoras", Quinta edición (2012), pag. 308

Servicios sin conexión: ruteo de paquetes

ADSL y PPP (ejemplo)

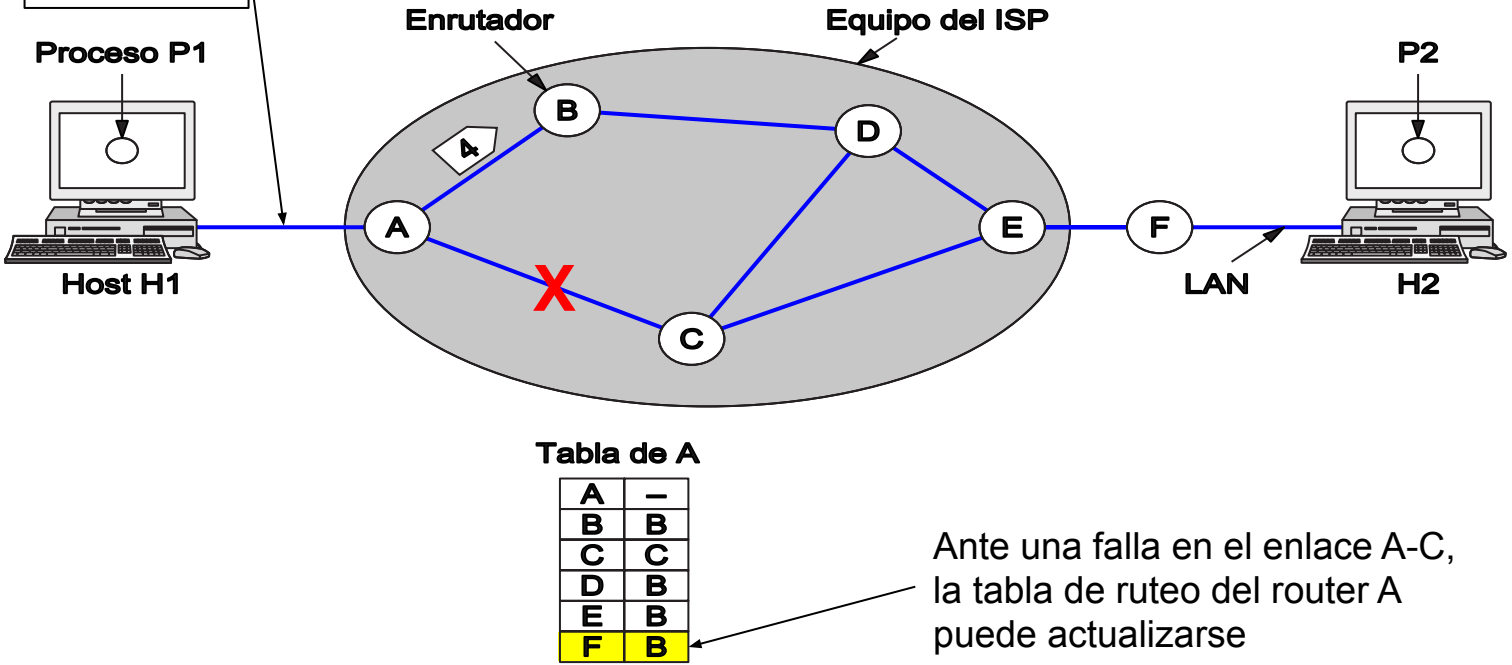


Tabla de A

A	–
B	B
C	C
D	B
E	B
F	B

Ante una falla en el enlace A-C, la tabla de ruteo del router A puede actualizarse

Figura basada en: A. Tanenbaum, D. Wetherall, "Redes de computadoras", Quinta edición (2012), pag. 308

Servicios sin conexión: ruteo de paquetes
(explicación figura anterior)

- El proceso P1 necesita enviarle datos al proceso P2.
- La capa de red puede dividir los datos en paquetes (si la cantidad de datos es grande).
- Cada enrutador tiene una **tabla** con dos al menos dos datos:
  - **Destino final** (puede estar directamente conectado al enrutador o lejano).
  - **Línea de salida** o próximo salto (enrutador directamente conectado al cual enviar el paquete para que llegue al destino final).
- Las **tablas de ruteo son dinámicas**, **pueden cambiar** si se produce un problema en una ruta (fallo en la conexión, fallo en un enrutador, congestión en una ruta).
- **Algoritmo de enrutamiento: componente clave del sistema.** Determina la línea de salida de acuerdo al destino final**. Implementación distribuida.**

Notas sobre ruteo en IP:

- En IP, las tablas de ruteo indican las redes destino, no los host destinos.
  - Solo el último router entregará el paquete al host destino final.
- Las direcciones IP (prefijos de IPs) se asignan a redes (sistemas autónomos).
  - Los routers están conectados a 2 o más redes, por lo tanto tendrán dos o más direcciones IP.

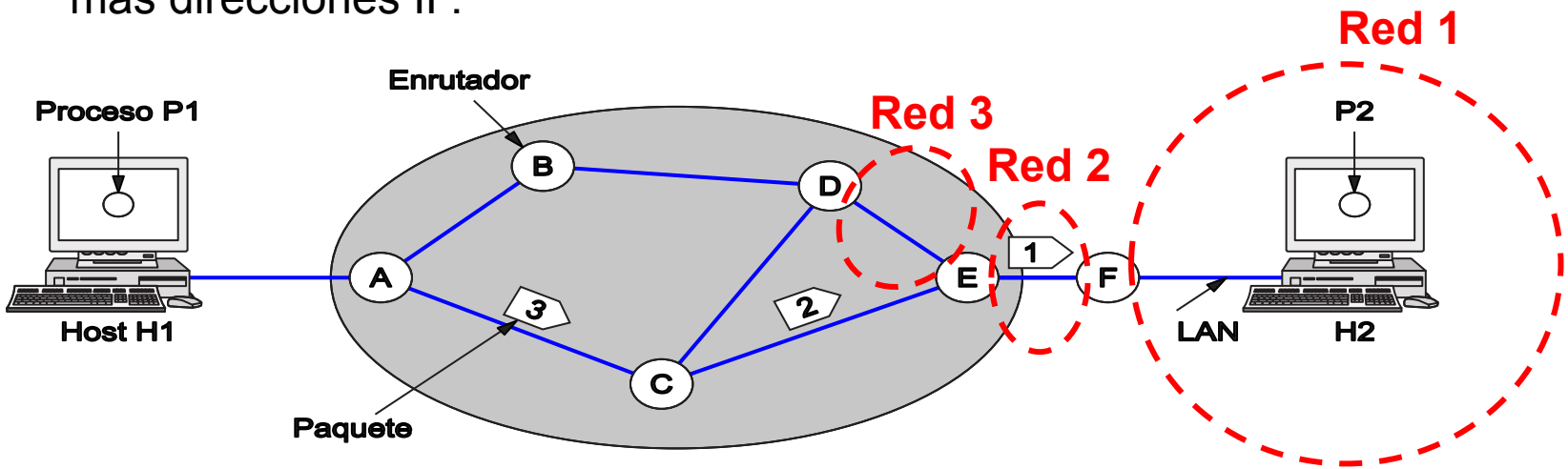


Figura basada en: A. Tanenbaum, D. Wetherall, "Redes de computadoras", Quinta edición (2012), pag. 308

Servicios sin conexión y orientados a conexión

- Servicios orientados a conexión o de circuitos virtuales
  - Se establece una **conexión**: **Con negociación** previa entre origen y destino.
  - Antes de enviar los paquetes, se **establecerse la ruta entre el origen y el destino** o **conexión** (física o virtual).
  - La información de ruteo de los paquetes es un **identificador de conexión** o **circuito virtual**.
  - Las tablas de ruteo asocian un **circuito de salida** con el **circuito de entrada**.
  - Basado en el sistema telefónico.

Un servicio orientado a conexión puede establecerse sobre servicios sin conexión. Ejemplo: TCP (servicio orientado a conexión), trabaja sobre IP (servicio sin conexión)

Servicios orientado a conexión: conmutación de circuitos virtuales

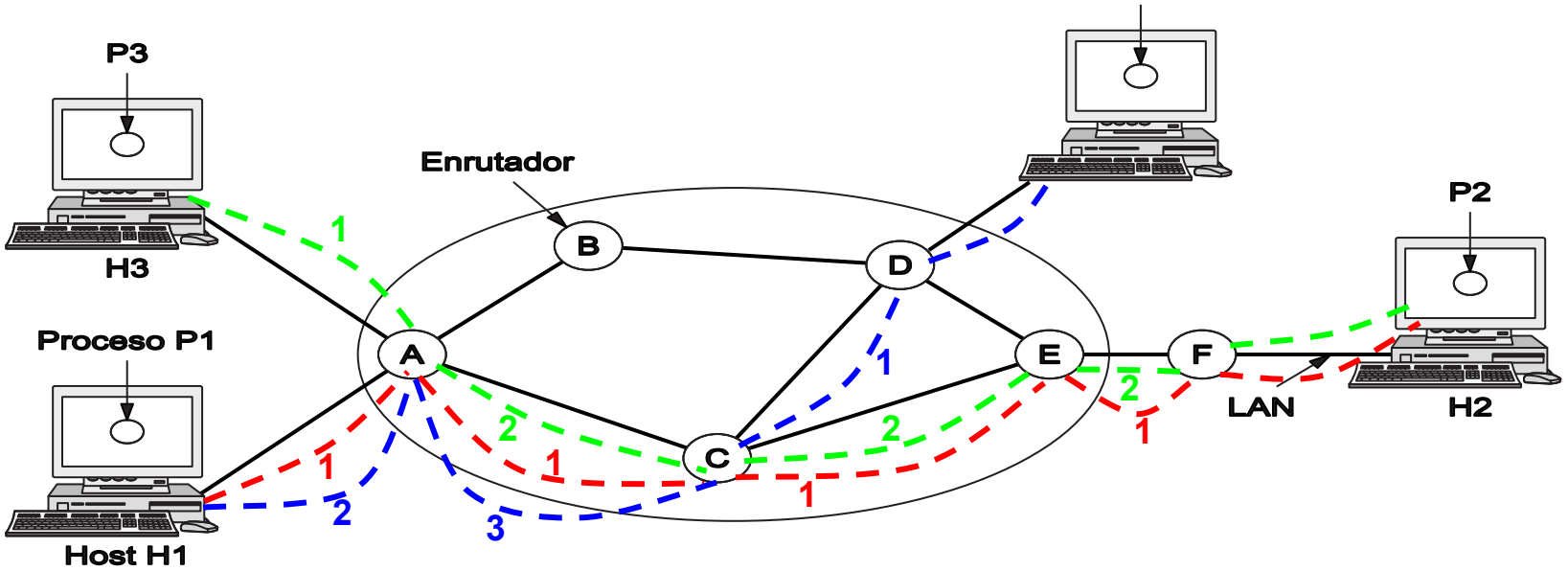


Tabla de A

H1	1
H3	1
H1	2

Entrada

C	1
C	2
C	3

Salida

Tabla de C

A	1
A	2
A	3

E	1
E	2
D	1

Tabla de E

C	1
C	2

F	1
F	2

Figura obtenida de: A. Tanenbaum, D. Wetherall, "Redes de computadoras", Quinta edición (2012), pag. 309

Servicios orientado a conexión: conmutación de circuitos virtuales

- H1 quiere enviar datos a H2
- Cada tabla asocia el identificador de circuito entrante y enrutador inmediato de origen con el identificador de circuito saliente y enrutador inmediato destino.
- Cada identificador de circuito es análogo a un “cable” entre enrutadores.
  - En los sistemas telefónicos antiguos, el identificador de circuito era realmente un cable.
  - Actualmente puede ser una ranura de tiempo o simplemente una etiqueta.
- A no puede utilizar el mismo identificador de circuito de salida hacia C para diferentes conexiones, ya que C no podría diferenciar los circuitos entrantes desde A.
- Protocolo actual importante **MPLS**: MultiProtocol Label Swithching (Conmutación Multiprotocolo Mediante Etiquetas).

Servicios sin conexión y orientados a conexión

- Conmutación de circuitos: servicio orientado a conexión.
- Conmutación de paquetes:
  - Sin conexión (datagramas).
  - Orientada a conexión (circuitos virtuales).

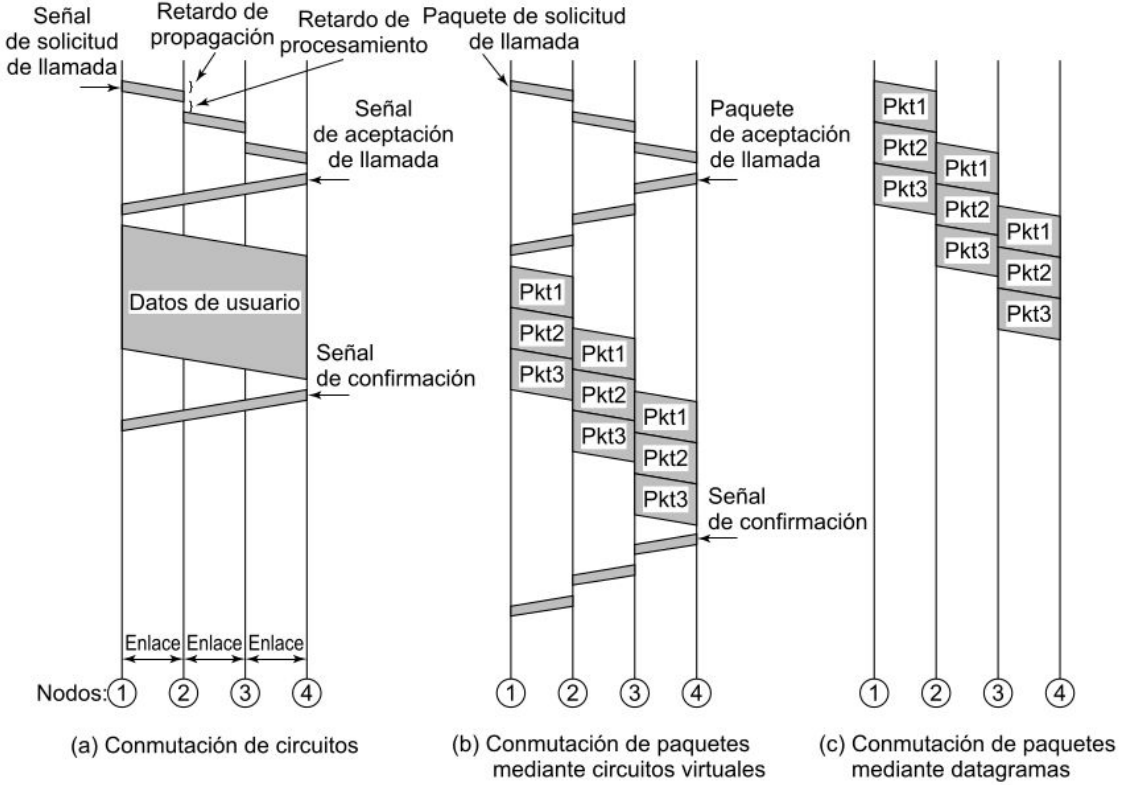
Servicios orientado a conexión vs servicios sin conexión

Asunto	Red sin conexión	Red de circuitos virtuales
Configuración del circuito	No necesaria.	Requerida. Necesidad de tiempo y recursos al comienzo. Más simple el ruteo posterior.
Direccionamiento	Cada paquete contiene la dirección de origen y de destino completas. Más bits. Tablas de ruteo mucho mayor (los destinos finales pueden ser muchos).	Cada paquete contiene un número de CV corto. Menos bits para direccionamiento. Tablas de ruteo menores.
Información de estado de las conexiones	Los enrutadores no contienen información de estado sobre las conexiones.	Cada CV requiere espacio de tabla del enrutador por cada conexión
Enrutamiento	Cada paquete se enruta de manera independiente	La ruta se elige cuando se establece el CV; todos los paquetes siguen esa ruta
Decisiones de ruteo	Todo el tiempo, en cada salto	Solo al principio.

Servicios orientado a conexión vs servicios sin conexión

Asunto	Red sin conexión	Red de circuitos virtuales
Efecto de fallas del enrutador	Ninguno, los paquetes pueden elegir otro camino (excepto para paquetes perdidos durante una caída).	Muy serio, terminan todos los CVs que pasaron por el enrutador defectuoso (aún cuando el router falle solo un segundo).
Calidad del servicio	Difícil (no pueden asegurarse recursos)	Fácil si se pueden asignar suficientes recursos por adelantado para cada CV
Control de congestión	Difícil	Fácil si se pueden asignar suficientes recursos por adelantado para cada CV
Aprovechamiento de recursos	Adaptable. Al no haber recursos asignados, no hay recursos perdidos por baja carga de datos.	Si hay baja carga de datos, los recursos asignados no utilizados se desaprovechan.
Adaptabilidad al nivel de carga	Muy adaptable. Los paquetes pueden enviarse por otros ruteadores si uno está saturado.	Poco adaptable. Si un circuito tiene mucha carga y otros poca, los paquetes seguirán siempre por esos circuitos.

Comparación entre conmutación de circuitos, conmutación de paquetes mediante circuitos virtuales y conmutación de paquetes mediante datagramas.



- Con circuitos virtuales la ruta no está dedicada a la conexión.

Interconexión de Redes
Dificultad: Existen muchos tipos de redes diferentes

Aspecto	Algunas posibilidades
Servicio ofrecido.	Sin conexión *vs.* orientado a conexión.
Direccionamiento.	Distintos tamaños, plano o jerárquico.
Difusión.	Presente o ausente (también multidifusión).
Tamaño de paquete.	Cada red tiene su propio valor máximo.
Ordenamiento.	Entrega ordenada y desordenada.
Calidad del servicio.	Presente o ausente; muchos tipos distintos.
Confiabilidad.	Distintos niveles de pérdida.
Seguridad.	Reglas de privacidad, cifrado, etcétera.
Parámetros.	Distintos tiempos de expiración, especificaciones de flujo, etcétera
Contabilidad.	Por tiempo de conexión, paquete, byte o ninguna.

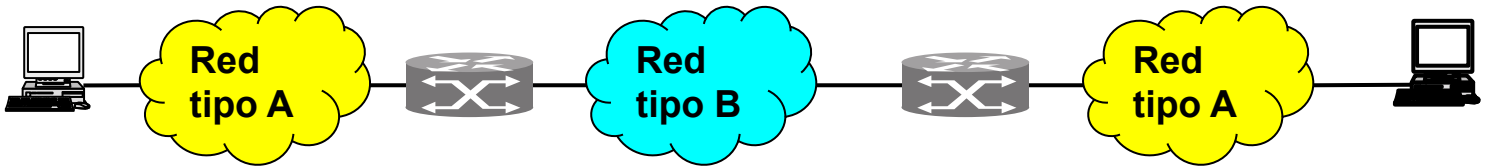
Tabla obtenida de: A. Tanenbaum, D. Wetherall, "Redes de computadoras", Quinta edición (2012), pag. 365

Interconexión de Redes: Posibles mecanismos para interconectar las redes

1. A nivel capa de enlace: mediante **Traductores/adaptadores** que traduzcan tramas y adapten diferentes tipos de redes. Por ejemplo: traductores Ethernet-Wifi, traductores Ethernet-SONET, Ethernet-ASDL, Ethernet10BaseT-Ethernet100BaseT etc.
   a. Se requerirían gran cantidad de traductores (cantidad = (n-1)(n)/2).
   b. Cada vez que se cree una nueva tecnología de capa de enlace o física, se requerirían traductores que permita conectar la nueva tecnología con todas las existentes.
   c. No resuelve el problema del direccionamiento global.
2. **Tunelización**.
3. A nivel capa de red: Construir **otra capa** que permita la interconectividad. Los paquetes pasan a la capa de red y la misma se encarga.
   a. Esta nueva capa se encarga del direccionamiento global.

2° mecanismo de Interconexión de Redes: Tunelización

- Objetivo: Enviar un paquete entre un origen y un destino tal que:
  - El **origen** y el **destino** pertenecen al **mismo tipo de red** (red superpuesta u “overlay”).
  - Entre las redes origen y destino existen **redes de diferentes tipos**.
  - Todas las redes pueden ser del **mismo o diferente nivel**.
  - Se requieren **ruteadores multiprotocolo**.
  - **A nivel de datos, una trama o paquete se encapsula dentro de otro.**
  - Aplicaciones: VPN, MPLS, PPPoE (PPP sobre Ethernet), IPv6 sobre IPv4.



2° mecanismo de Interconexión de Redes: Tunelización

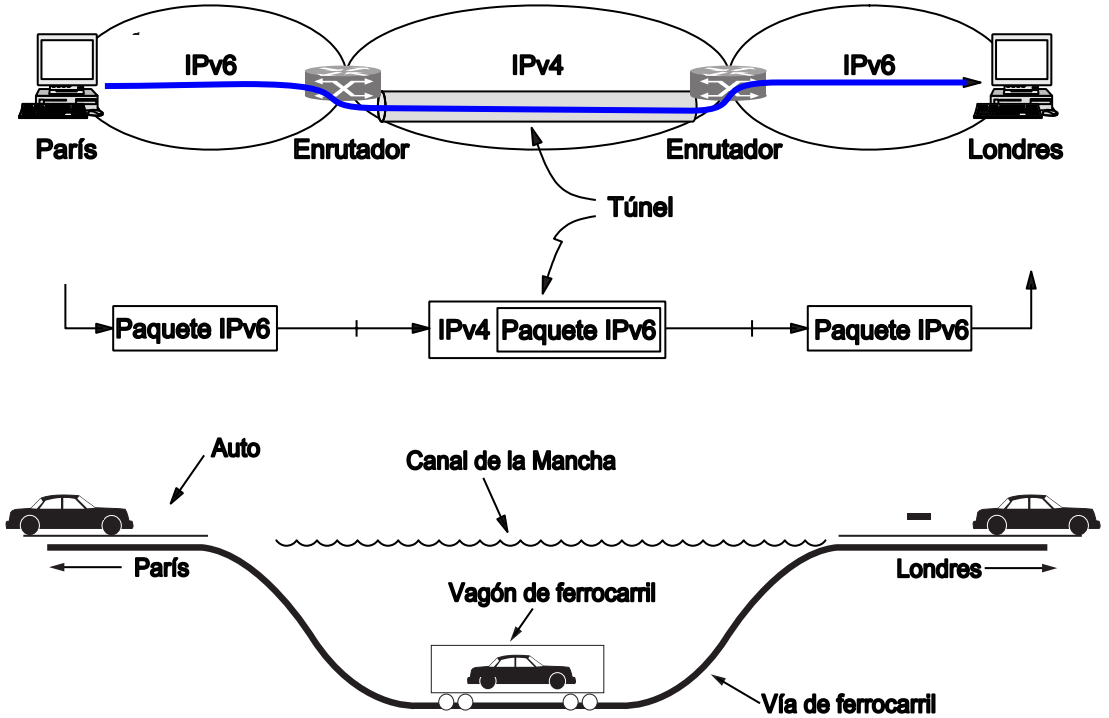
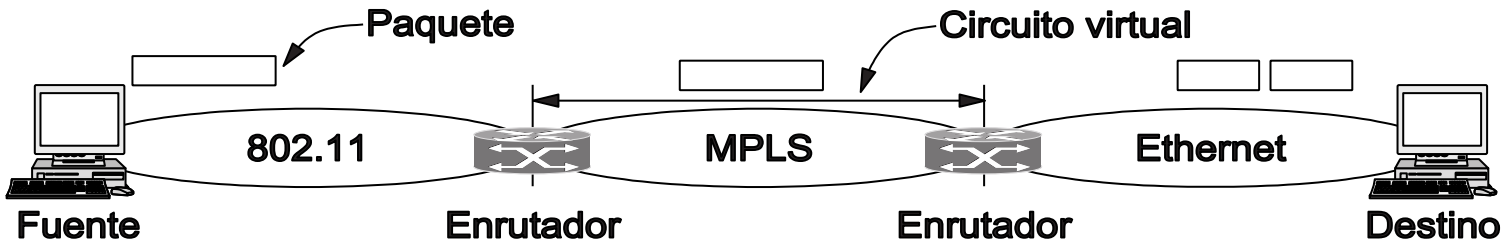


Figura obtenida de: A. Tanenbaum, D. Wetherall, "Redes de computadoras", Quinta edición (2012), pag. 369

3° mecanismo de Interconexión de Redes: Capa de Red



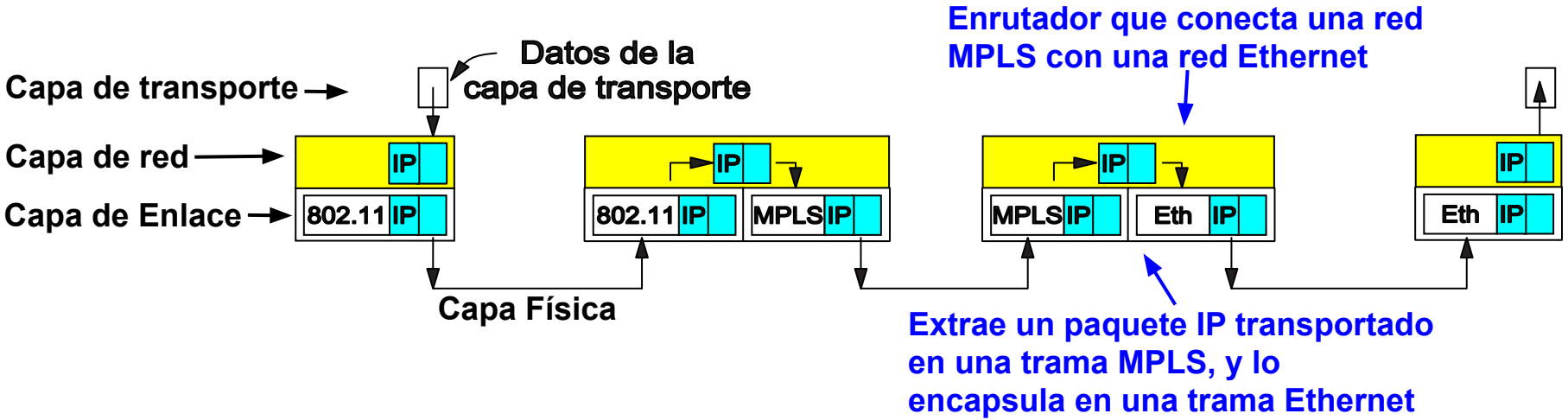


Figura obtenida de: A. Tanenbaum, D. Wetherall, "Redes de computadoras", Quinta edición (2012), pag. 367

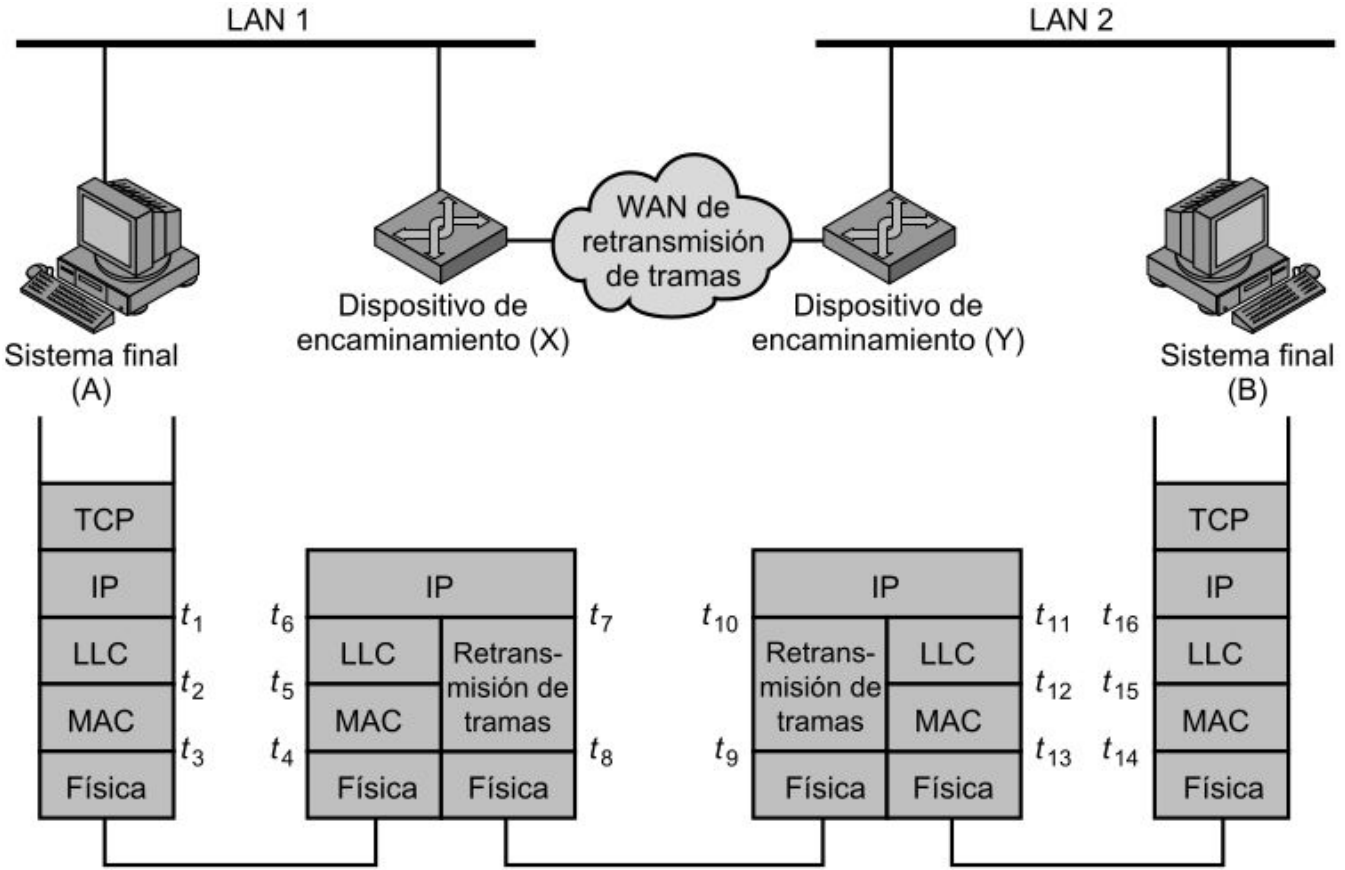


Figura obtenida de: William Stallings, “Comunicaciones y redes de computadores” , Séptima Edición, pag. 602

Interconexión de Redes: Diferentes Tamaño de paquetes

- Los protocolos imponen un **tamaño máximo de paquetes o MTU** (Maximum Transmission Unit o Unidad de Transmisión Máxima).
  - **Ventajas de mayor tamaño: menor sobrecarga.**
  - Ventajas de menor tamaño: menor probabilidad de error.
  - Ejemplo: Ethernet 1500 bytes, IEEE802.11 2272 bytes, IP 65515 bytes.
- Problema: Paquetes de tamaño N que tienen que transitar por una red con tamaño de **paquete menor**.
  - Solución 1: **Descubrimiento de MTU** de la ruta completa.
  - Solución 2: **Fragmentación** (permitir que los enrutadores dividan un paquete en fragmentos y enviar cada uno como un paquete separado).

Interconexión de Redes: Descubrimiento de MTU de la ruta

- Se envían **paquetes de prueba** con banderas indicando que **no se pueden fragmentar**.
- Si el paquete llega a una red con **MTU menor** al tamaño del paquete, el router **lo rechaza** y envía un mensaje de error.
- El origen recibe el mensaje de error y prueba con **paquetes más pequeños**.
- El proceso se repite si otros enrutadores con **MTU menor** reciben el paquete.
- Cuando el paquete **llega al destino**, este responde. El emisor **recibe el ack** y **obtiene el MTU de la ruta**.
- Si la **ruta cambia** y un paquete llega a una red con **MTU menor**, **el proceso se repite** (la MTU se adapta a diferentes rutas).

Interconexión de Redes: Descubrimiento de MTU de la ruta

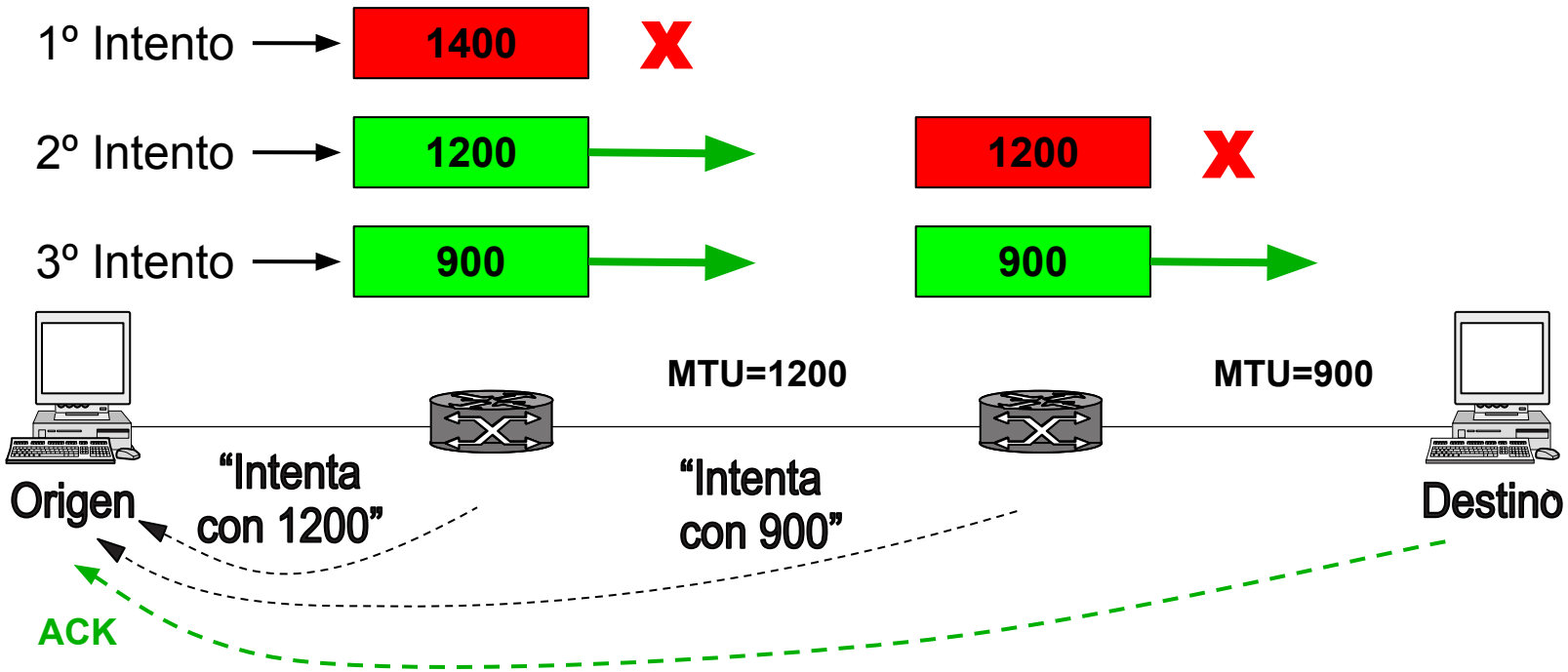


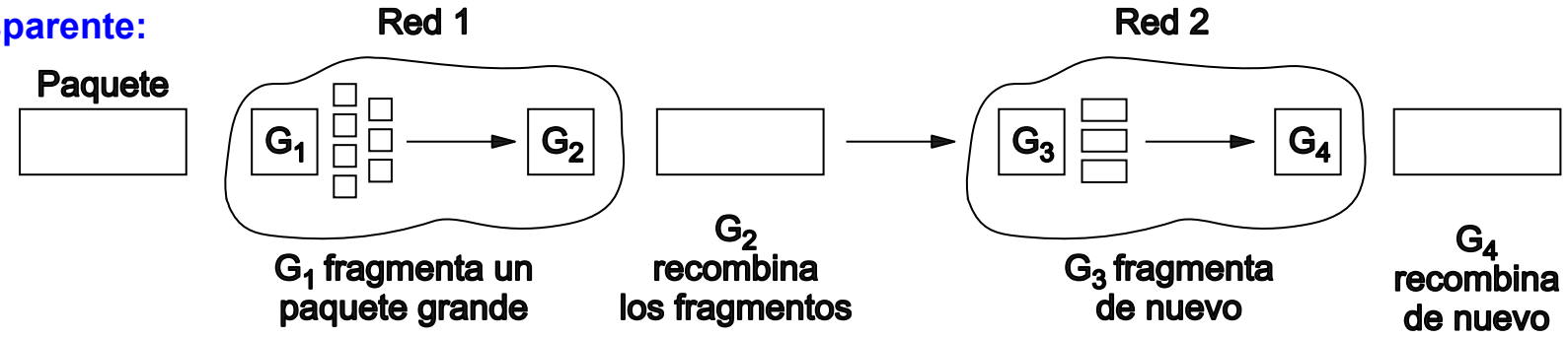
Figura obtenida de: A. Tanenbaum, D. Wetherall, "Redes de computadoras", Quinta edición (2012), pag. 367

Interconexión de Redes: Fragmentación de paquetes

- Los enrutadores **dividen el paquete**.
- Dos enfoques:
  - **Fragmentación transparente**: El router de entrada a la red divide el paquete en fragmentos, y el router de salida los reensambla.
    - Desventajas:
      - Sobrecarga de enrutadores.
      - Uso de gran cantidad de memoria en los enrutadores.
      - Se restringen las rutas al tener que salir todos los paquetes por el mismo enrutador.
  - **Fragmentación no transparente**: una vez divididos, los fragmentos se comportan como paquetes independientes hasta el destino final.
    - **Ventaja: Menos sobrecarga en los enrutadores.**
    - **Usado por protocolo IP**.

Interconexión de Redes: Fragmentación de paquetes

Transparente:



No transparente:

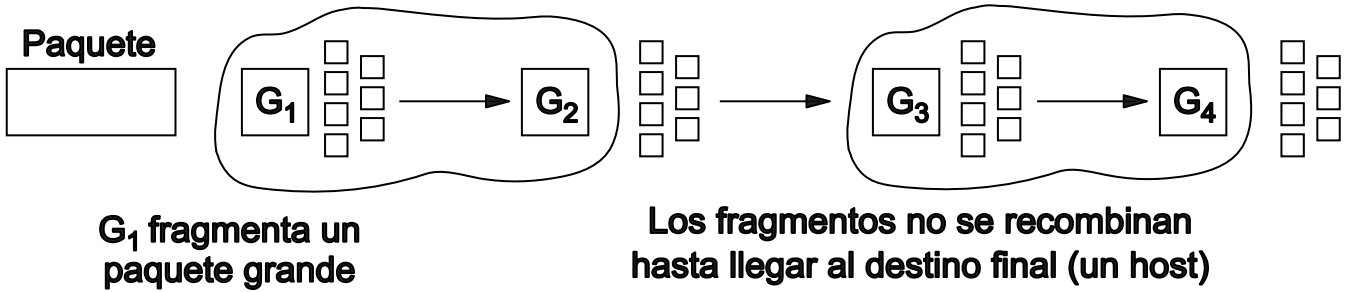
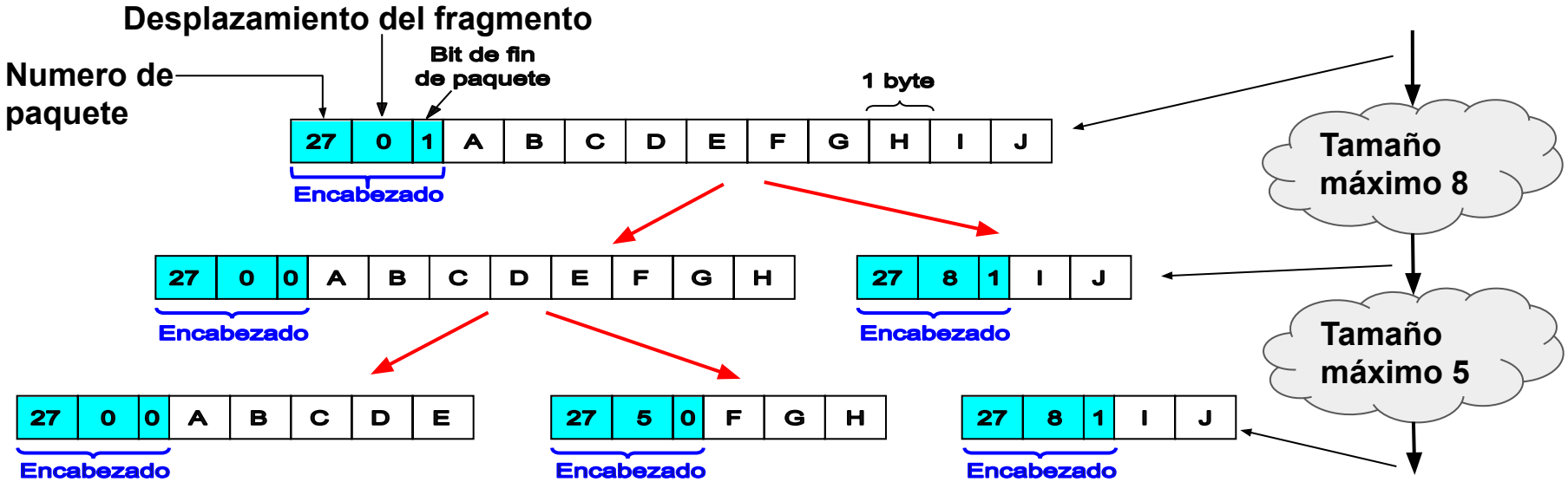


Figura obtenida de: A. Tanenbaum, D. Wetherall, "Redes de computadoras", Quinta edición (2012), pag. 372

Interconexión de Redes: Fragmentación de paquetes

- Fragmentación no transparente. Necesidad de:
  - Número identificador de paquete.
  - Campo que indique el desplazamiento del fragmento dentro del paquete.
  - Agregar un indicador de fin del paquete.



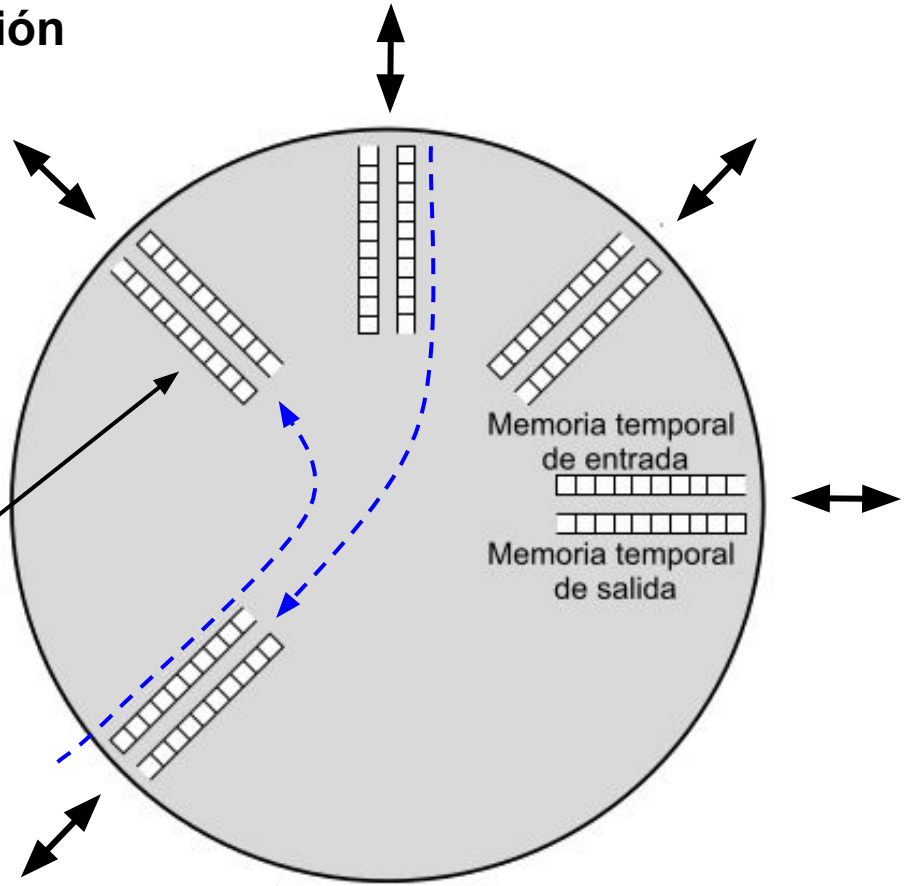
Temario

- Introducción.
- **Congestión y calidad de servicio.**
- IPv4
- IPv6
- Protocolos de control de Internet
- Conmutación basada en etiquetas (MPLS)
- Algoritmos de enrutamiento

Algoritmos Control de Congestión

Congestión: Una red (o parte de ella) **recibe más tráfico del que puede manejar**.

- Comienzan a **llenarse los buffers** de los enrutadores.
- **Incremento de latencia**.
- **Incremento de paquetes perdidos** (por saturación de buffers o latencia muy grande), **duplicados o reenviados**.



Pueden existir varias colas para proporcionar calidad de servicio

Algoritmos Control de Congestión

Métodos de control de congestión en la capa de red (del más lento al más veloz)

- **1) Aprovisionamiento de la red**: mejorar equipamiento por el cual transita carga alta. No es dinámico.
  - Agregar memoria (por experimentos: agregar memoria incrementa la cantidad de paquetes reenviados y duplicados).
- **2) Enrutamiento consciente** del tráfico: Los routers reconocen congestión y desvían el tráfico por otras rutas.
  - Se ponderan los enlaces en función de sus capacidades y carga.
    - Parámetros fijos: Ancho de banda.
    - Parámetros variables: Latencia, carga.
  - Puede congestionar otras redes o producir oscilaciones.

Algoritmos Control de Congestión (continuación...**)**

- **3) Control de admisión**: rechazar nuevas conexiones de circuitos virtuales si la red no los va a poder manejar.
  - Aplicable solo en servicios con conexión.
- **4) Regulación del tráfico**: Los ruteadores **detectan** una congestión inminente o ya se está produciendo y envían **mensajes** a las fuentes de datos para que disminuyan el tráfico que generan cuando una congestión es inminente.
  - **Detección** de congestión: medición de parámetros claves (paquetes en los buffers de los enrutadores, paquetes perdidos, etc.).
  - **Notificación**::
    - Envía **notificaciones de congestión** a los emisores que generan el problema para que reduzcan su velocidad de transmisión. **Genera más paquetes**.
    - **Etiquetar** paquetes: Mecanismo **ECN** (Explicit Congestion Notification) Usado en IP y TCP, RFC 3168 (ver filmina siguiente).

Algoritmos Control de Congestión (continuación...)

Algoritmo ECN (marcado de paquetes)

- Trabaja en **conjunto con TCP**.
- **Etiquetar** los paquetes que **producen la congestión** y dejar que sigan su camino.
- El destinatario recibirá los paquetes etiquetados y enviará sus **acuses de recibo TCP** indicando al emisor el problema.

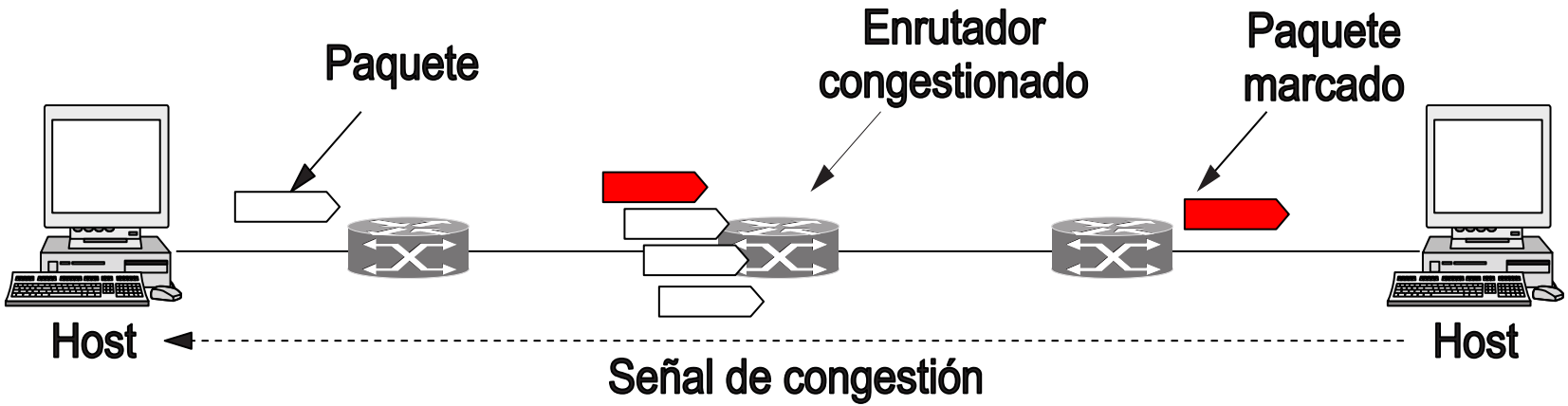


Figura basada en: A. Tanenbaum, D. Wetherall, "Redes de computadoras", Quinta edición (2012), pag. 340

Algoritmos Control de Congestión (continuación...)

- **5) Desprendimiento de carga**
  - **Descartar paquetes**: Si se llenan los buffers de los enrutadores, inevitablemente los paquetes comenzarán a **perderse**.
- **Desprendimiento de carga y calidad de servicio:** Los paquetes a descartar dependen de la aplicación:
  - Transferencia de archivos: se descartan los paquetes más nuevos.
    - Para no obligar al receptor a almacenar en búffers paquetes nuevos hasta que los viejos descartados lleguen.
  - Tiempo real (voz, video): Los más viejos.
    - En tiempo real, un paquete fuera de tiempo no sirve.
- Funciona bien en combinación con TCP.

Calidad de Servicio

- Algunas aplicaciones requieren un **desempeño determinado** de la red para funcionar:
  - Parámetros importantes (cada aplicación requiere mantener uno o varios parámetros dentro de valores límites):
    - Ancho de banda (en bps)
    - Retardo
    - Variación del retardo
    - Pérdida de paquetes
- **Solución más simple**: **sobreaprovisionamiento** (overprovisioning), construir la red de manera que sus prestaciones puedan tolerar la peor situación sin sufrir congestión ni otros tipos de problemas.
  - Problemas:
    - costo elevado
    - La mayor parte del tiempo habría desaprovechamiento de recursos.

Calidad de Servicio requerida según aplicaciones

Aplicación	Ancho de banda	Retardo	Variación del retardo	Pérdida
Correo electrónico.	Bajo	Bajo	Baja	Media
Compartir archivos.	Alto	Bajo	Baja	Media
Acceso a Web.	Medio	Medio	Baja	Media
Inicio de sesión remoto.	Bajo	Medio	Media	Media
Audio bajo demanda.	Bajo	Bajo	Alta	Baja
Video bajo demanda.	Alto	Bajo	Alta	Baja
Telefonía.	Bajo	Alto	Alta	Baja
Videoconferencias.	Alto	Alto	Alta	Baja

Tabla obtenida de: A. Tanenbaum, D. Wetherall, "Redes de computadoras", Quinta edición (2012), pag. 348

Calidad de servicio en la capa de Red

- Dos métodos para ofrecer calidad de servicio:
  - **Calidad de servicio basada en flujo o servicios integrados**
    - Reservar recursos (ancho de banda, espacio en buffers, etc) a lo largo de la ruta.
    - Útil en servicios orientados a conexión.
  - **Calidad de servicio basada en clase o servicios diferenciados**
    - Clasificar los paquetes en diferentes tipos según la aplicación y según los **Acuerdos de Nivel de Servicio** o SLA (acuerdo entre los ISP y los clientes).
    - Útil en servicios sin conexión.

Calidad de Servicio basada en flujo

- El usuario ofrece una **especificación del flujo** (cantidad de paquetes que el enrutador puede almacenar, tasa pico de datos, tamaño mínimo de paquetes, tamaño máximo de paquetes, latencia, etc.)
- **Negociación**: Cada enrutador decide si **acepta**, **rechaza** o hace una **"contra-oferta"** en función de:
  - Si posee capacidad para satisfacer esos requisitos.
  - Los compromisos con otros flujos ya aceptados.
    - Cada enrutador que recibe la especificación puede **reducir algún parámetro** (por ejemplo: el emisor pide 100 Mbps, pero el enrutador dice que puede transmitir 80Mbps).
- Cuando la especificación llega al destino, se establecen los parámetros finales, que el emisor puede aceptar o rechazar.
- Pueden seleccionarse **varios caminos** que sumados brinden la calidad de servicio que un flujo requiere.

Nota: denominado por algunos autores como "control de admisión"

Calidad de Servicio basada en clase

- También llamados “**servicios diferenciados**”.
- A cada paquete se le asigna una “**clase**” mediante un campo en su encabezado.
- Los enrutadores **tratan cada paquete** según la **clase**.
- Los ISPs pueden definir sus propias clases.
- Para permitir **interoperabilidad**, la **IETF define varias clases**.

Calidad de Servicio basada en clase: reenvío expedito

- Clasificación en **Paquetes expeditos** (parámetros temporales con importantes) o **Paquetes regulares**.
- Los enrutadores, para cada línea de salida, **tienen dos colas**, una para paquetes regulares y otra para paquetes expeditos.
  - La cola para paquetes expeditos tienen prioridad.

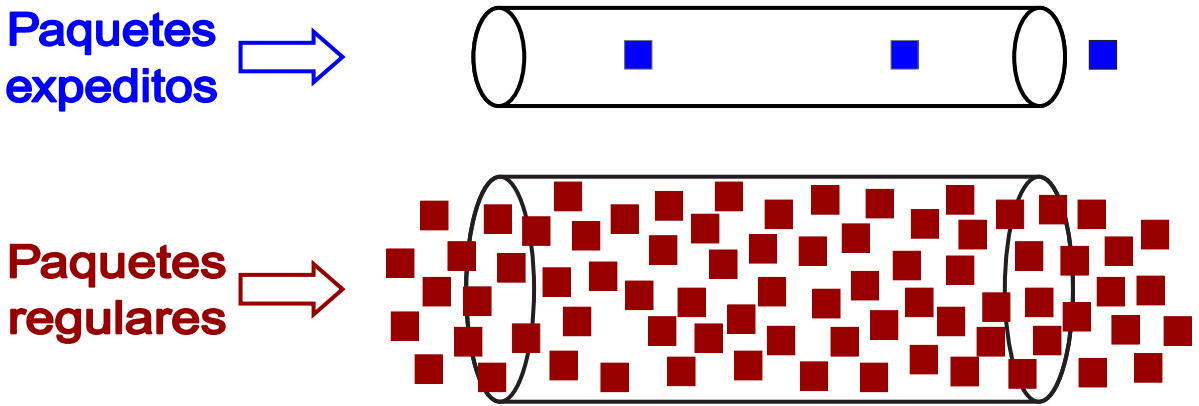


Figura obtenida de: A. Tanenbaum, D. Wetherall, "Redes de computadoras", Quinta edición (2012), pag. 363

Calidad de Servicio basada en clase: reenvío asegurado

- Se definen cuatro clases de prioridades para los paquetes: **oro**, **plata**, **bronce** y **regular** (RFC 2597).
- Las clases definen:
  - Que paquetes tendrán **mayor prioridad** para ser reenviados en un **enrutador justo ponderado**.
  - En caso de **congestión, qué paquetes eliminar** según la **clase del paquete** y el **tipo de tráfico**.
- Los paquetes son marcados por el emisor o el enrutador de entrada.

Nota: los algoritmos que deciden que paquetes descartar son complejos. Toman decisiones en función de la clase de los paquetes, el tipo de tráfico (expedito o regular), los patrones de tráfico (ráfagas pequeñas, ráfagas extensas, etc).

Calidad de Servicio basada en clase: reenvío asegurado

- En conjunto se tienen 12 clases de servicios.
- El enrutador de entrada puede limitar los paquetes con prioridades altas.

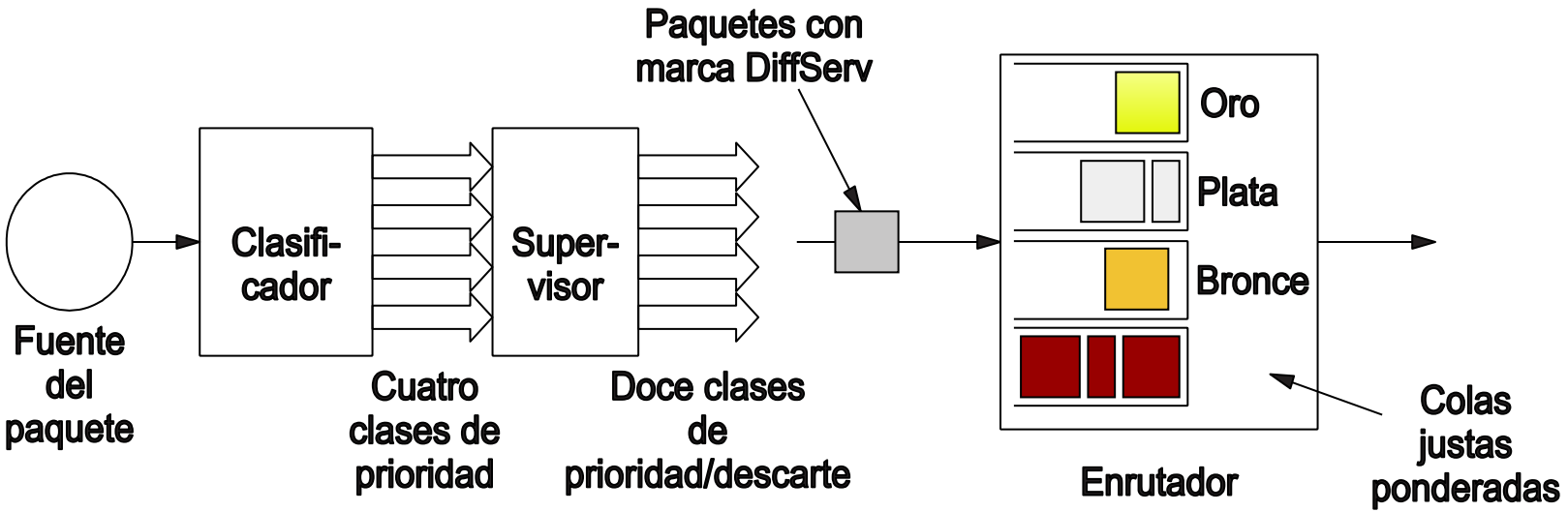


Figura obtenida de: A. Tanenbaum, D. Wetherall, "Redes de computadoras", Quinta edición (2012), pag. 363

Temario

- Introducción.
- Congestión y calidad de servicio.
- **IPv4**
  - **Direcciones IP. Encabezado IPv4.**
  - **Subredes.**
  - **Direccionamiento basado en clases y sin clases. Superredes.**
  - **Agotamiento de direcciones IPv4. Soluciones. NAT**
  - **Multidifución**
- IPv6
- Protocolos de control de Internet
- Conmutación basada en etiquetas (MPLS)
- Algoritmos de enrutamiento

Interconexión de Redes: IP (Internet Protocol)

- Diseñado para **interconectar redes**.
- Protocolo de **mejor esfuerzo**: **hace todo lo posible** para entregar un paquete, pero **no garantiza** la entrega.
- Tamaño máximo de paquetes: **65 KBytes**.
- **Rutea** paquetes entre diferentes redes:
  - Los paquetes pueden pasar entre diferentes niveles de ISPs.
  - Pueden pasar por ISPs y puntos de interconexión (IXP).
  - Pueden pasar por diferentes tecnologías de red.
- Protocolo **sin conexión**.

Interconexión de Redes: encabezado IPv4 (IP versión 4)

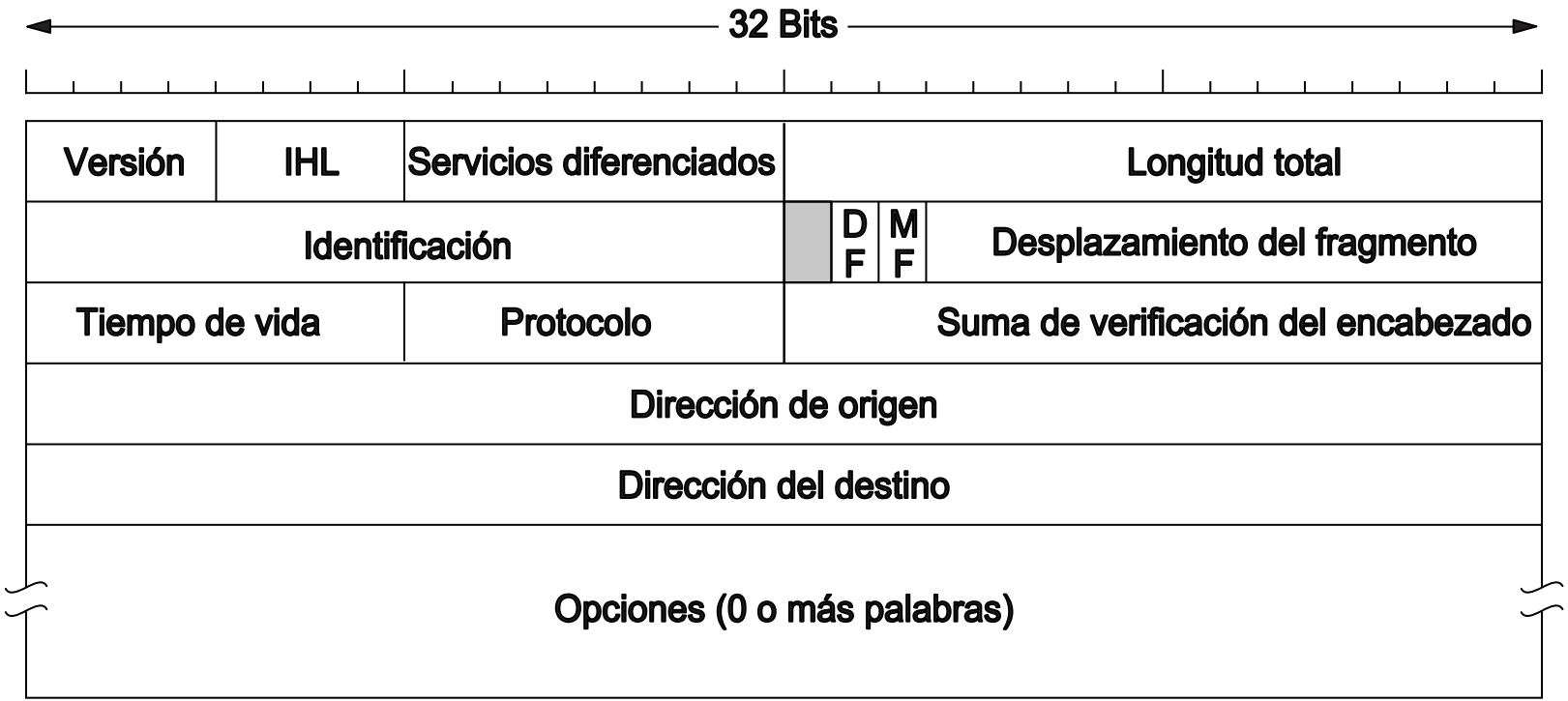


Figura obtenida de: A. Tanenbaum, D. Wetherall, "Redes de computadoras", Quinta edición (2012), pag. 376

Interconexión de Redes: encabezado IP

- Versión: versión del protocolo IP (IPv4, IPv5, IPv6, etc.).
- IHL (Internet Header Length): Longitud del encabezado en palabras de 32 bits. El encabezado es de longitud variable.
- Servicios diferenciados: Calidad de servicio[1]
  - Servicio expedito, servicio asegurado.
  - Notificación explícita de congestión.
  - Indicación de ocurrencia de congestión.
- Longitud total: Longitud de todo el paquete (en bytes).
- Identificación: Número o identificación de paquete al cual pertenece un fragmento.
- Bit sin uso: ¿?

[1] Anteriormente indicaba parámetros de fiabilidad, prioridad, retardo y rendimiento que raramente se usaban. Se sustituyó a “Servicios diferenciados”..

Interconexión de Redes: encabezado IP

- DF (Don't Fragment): Si se marca, el paquete no debe fragmentarse.
  - El paquete llegará sin fragmentarse o generará un mensaje de error.
  - Útil para encontrar la MTU de una ruta.
- MF (More Fragments): Para indicar si deben esperarse más fragmentos.
- Desplazamiento del fragmento: múltiplo de 8 bytes (el fragmento más pequeño puede tener 8 bytes). Pueden haber 8192 fragmentos.
- Tiempo de vida: Se decrementa en cada salto. Si llega a cero el paquete se descarta.
- Protocolo: identificación del protocolo de la capa de transporte (TCP, UDP, etc.). Listados en www.iana.org. (Internet Assigned Numbers Authority)
- Suma de verificación **del encabezado**: Se debe recalcular en cada salto
  - El campo tiempo de vida cambia en cada salto
  - Se evita que enrutadores posteriores ruteen paquetes dañados.

Interconexión de Redes: encabezado IP

- Dirección IP origen y dirección IP destino: 32 bits para IPv4.
- Opciones: Posibilita ampliaciones futuras del protocolo. Algunas opciones son:
  - Seguridad: Especifica que tan secreto que es el datagrama (actualmente no usado, permite a espías identificar paquetes importantes).
  - Enrutamiento estricto desde el origen: Proporciona la ruta completa a seguir como secuencia de direcciones IP. Sirve para hacer mediciones o recuperar tablas de ruteo.
  - Enrutamiento libre desde el origen: Proporciona una lista de enrutadores que no se deben omitir. Los paquetes deben pasar si o si por esos enrutadores (cuestiones políticas o económicas pueden imponer esos enrutadores).

Interconexión de Redes: encabezado IP

- Opciones + relleno (continuación):
  - Registrar ruta: Hace que cada enrutador adjunte su dirección IP al paquete. Sirve para analizar fallas de ruteo o tareas de investigación.
  - Estampa de tiempo: Hace que cada enrutador adjunte una estampa de tiempo al paquete (se usa en conjunto con “Registrar ruta” para tareas de medición o investigación).
  - Relleno: Se utiliza para asegurar que el encabezado posee una longitud múltiplo de 8 bits.
- **No todos los enrutadores procesan los campos opciones.**

Direcciones IP

- 32 bits (2^{32}=4.29*10^9).
- **Cada interfaz de red tiene su dirección IP**.
  - Una computadora conectada a dos redes necesita dos interfaces de red y dos direcciones IP.
  - Un enrutador tiene varias direcciones IP (al menos dos).
- Direcciones jerárquicas
  - **Primeros bits: Identifican la red (prefijo).**
  - **Últimos bits: Identificación del host (cada interfaz) dentro de la red.**
  - **Ventaja: Los ruteadores solo trabajan con la dirección de red, no con la IP completa. Menores longitudes de tablas de ruteo.**
  - Desventajas:
    - **La dirección IP depende de la ubicación de la computadora.**
    - **Desperdicio de direcciones.**

Direcciones IP

- Notación: **32 bits** = 4 bytes, se escriben **como 4 números decimales separados por un punto** (192.168.1.30 = 11000000 10101000 00000001 00011110)
- **Máscara de red** = conjunto de bits tal que al aplicar una AND con una dirección IP, permite obtener el prefijo (dirección de la red).
  - Ejemplo: 24 bits de prefijo (red) y 8 bits de host
  - Dirección IP: 192.168.1.30 = 11000000 10101000 00000001 00011110
  - Máscara de red: 255.255.255.0 = 11111111 11111111 11111111 00000000
  - Prefijo (red) = 192.168.1.0 = 11000000 10101000 00000001 00000000
- Otra notación: 192.168.1.30**/24** (/24 indica 24 bits usados para indicar el prefijo o dirección de red).
- ¿Quién asigna las direcciones IP?: Los 5 **RIR** (Regional Internet Registry), dependientes de IANA[1] e ICANN[2] e, en conjunto con los NIR y LIR.
  - LACNIC[3]: Registro de Direcciones de Internet de América Latina y Caribe (RIR que rije nuestros IPs).

[1]Internet Assigned Numbers Authority [2] Internet Corporation for Assigned Names and Numbers
[3]Latinoamérica y Caribe NIC (Network Information Center)

179.0.132.0/22 = 10110011.00000000.10000100.00000000 (IP de red de UNCuyo)
255.255.252.0 = 11111111.11111111.11111100.00000000 (Máscara)

Dirección de red o prefijo de la UNCuyo. Lo asigna LACNIC a la UNCuyo

Host dentro de la UNCuyo. Los asigna la UNCuyo a sus host (2^{10}=1024 host).

179.0.133.131/22=10110011.00000000.10000101.00000000(Ejemplo de IP de host dentro de UNCuyo)
255.255.252.0 = 11111111.11111111.11111100.00000000 (Máscara)
179.0.132.0 = 10110011.00000000.10000100.00000000

Rango de IPs que pertenecen a la UNCuyo:
Desde 10110011.00000000.10000100.00000000 = 179.0.132.0
Hasta 10110011.00000000.10000111.11111111 = 179.0.135.255
(Ver https://rdap-web.lacnic.net/ip/179.0.132.52)

Direcciones IP: Subredes

- Si una empresa u organización posee una dirección IP de red, puede **dividir internamente su red en subredes**:
  - Hacia el exterior la red se sigue comportando como una sola.
  - Hacia el interior se pueden tener varias redes.
- **Ventaja: Mejor organización**.
- Se utilizan los primeros bits de host para identificar las subredes, junto a una máscara.
- El ruteador de entrada debe conocer las máscaras de red de cada subred.

Direcciones IP: Subred

	Red		Host		
Ciencias de la Computación	10000000	11010000	1|xxxxxxx	xxxxxxxx	**128.208.128.0/17**
Ingeniería Eléctrica	10000000	11010000	00|xxxxxx	xxxxxxxx	**128.208.0.0/18**
Arte:	10000000	11010000	011|xxxxx	xxxxxxxx	**128.208.96.0/19**

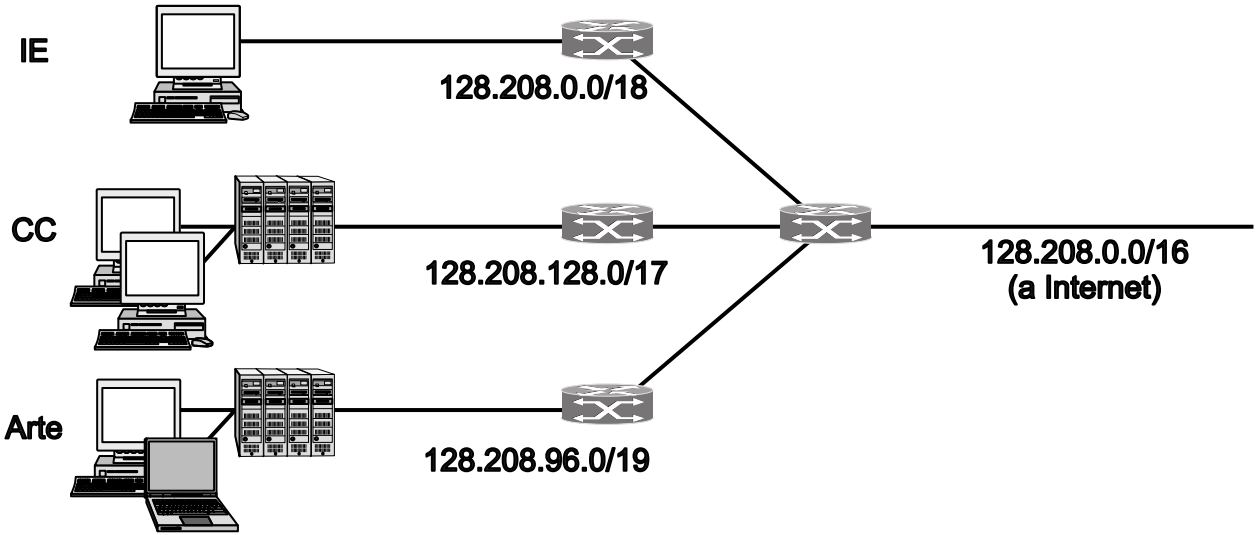
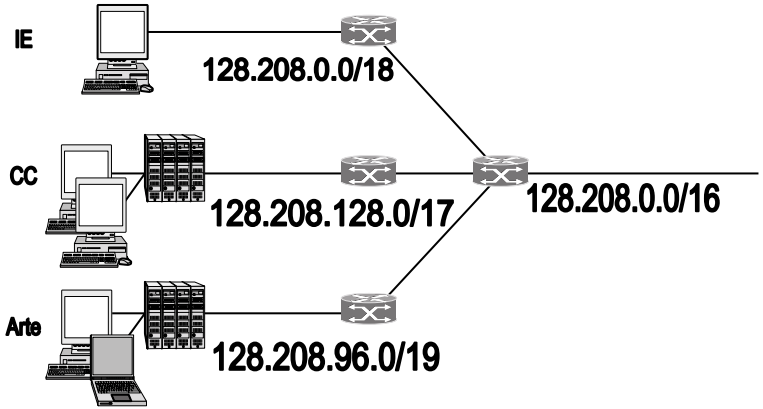


Figura obtenida de: A. Tanenbaum, D. Wetherall, "Redes de computadoras", Quinta edición (2012), pag. 381

Direcciones IP: Subred Ejemplo

Red	Identificador Red	Máscara
IE	128.208.0.0/18	255.255.192.0
CC	128.208.128.0/17	255.255.128.0
Arte	128.208.96.0/19	255.255.224.0



- Llega el paquete 128.208.2.151, ¿A cual red va?
  - ¿Va a CC?: 128.208.2.151 AND 255.255.128.0 = 128.208.0.0, **no** es la dirección de CC.
  - ¿Va a IE?: 128.208.2.151 AND 255.255.192.0 = 128.208.0.0, **SI** es la dirección de IE.

Direcciones IP: Direccionamiento basado en Clases

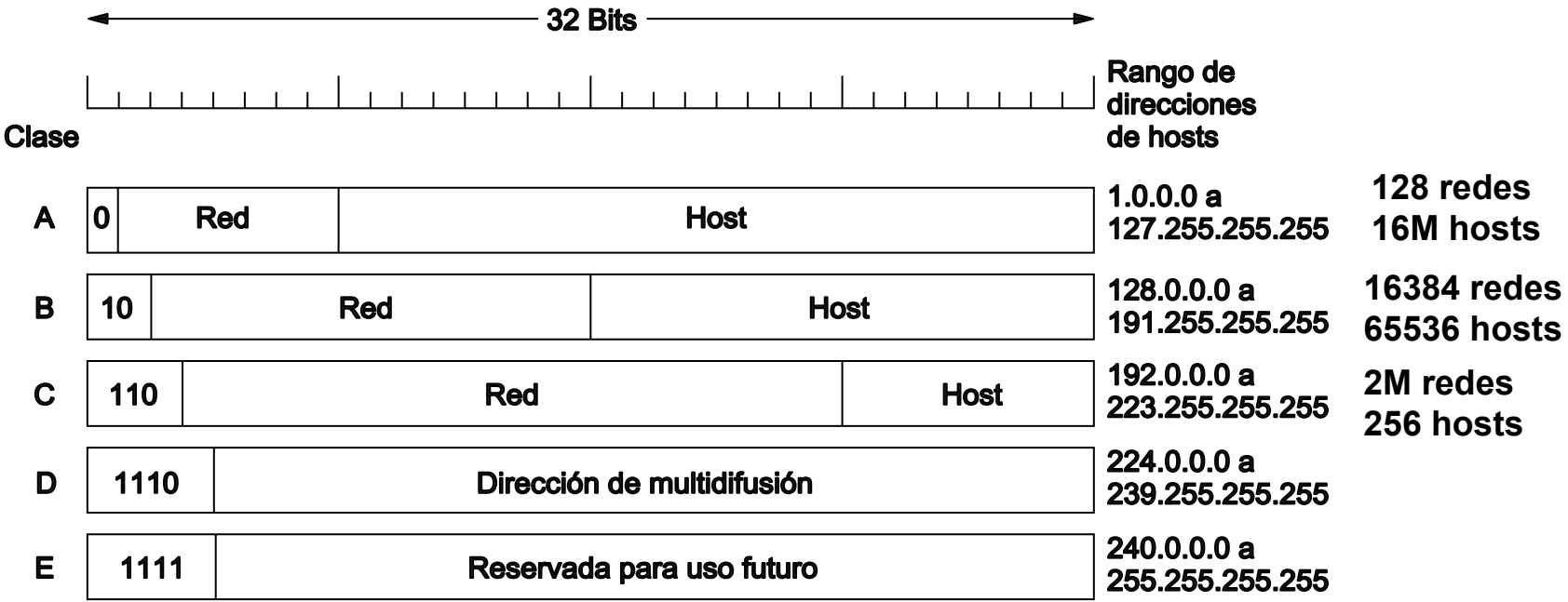


Figura obtenida de: A. Tanenbaum, D. Wetherall, "Redes de computadoras", Quinta edición (2012), pag. 385

Direcciones IP: Direccionamiento basado en Clases

- Ruteo:
  - Se detecta la clase, y luego se busca en tablas de ruteo.
- **Ventaja: Al ser el número a comparar de tamaño fijo, el algoritmo es mucho más simple que si los números fueran variables.**
- **Problema: gran cantidad de direcciones IP desperdiciadas.**
  - Rara vez una empresa que pida una red tipo C tendrá exáctamente 256 hosts, lo mismo una empresa que pide una red tipo B rara vez tendrá exáctamente 65536 hosts.
  - **Agotamiento de direcciones IPv4**
  - Por este motivo **ya no se usa.**

Direcciones IP: Direccionamiento sin Clases
CIDR (Classless InterDomain Routing)

- **Problema: Agotamiento de direcciones IP.**
  - **Causa 1: Asignación ineficiente de direcciones.**
- CIDR (Classless InterDomain Routing o Enrutamiento Inter dominio **sin Clases**). RFC 4632 (1993).
- Se pueden asignar direcciones de red de **cualquier longitud**. Ejemplos: 192.24.0.0/21, 192.24.16.0/20 (el /x es parte de las tablas de ruteo)
- **Agregación de direcciones:** Combinar prefijos de redes en prefijos más grandes llamados **superredes** (mayor números de host).
  - Mayor uso de jerarquías de redes y **reducción de tablas de ruteo**.
- Ventajas:
  - **Hace más eficiente en uso de las direcciones IP disponibles.**
  - **Disminuye la sobrecarga en los enrutadores**

Direcciones IP: Superredes

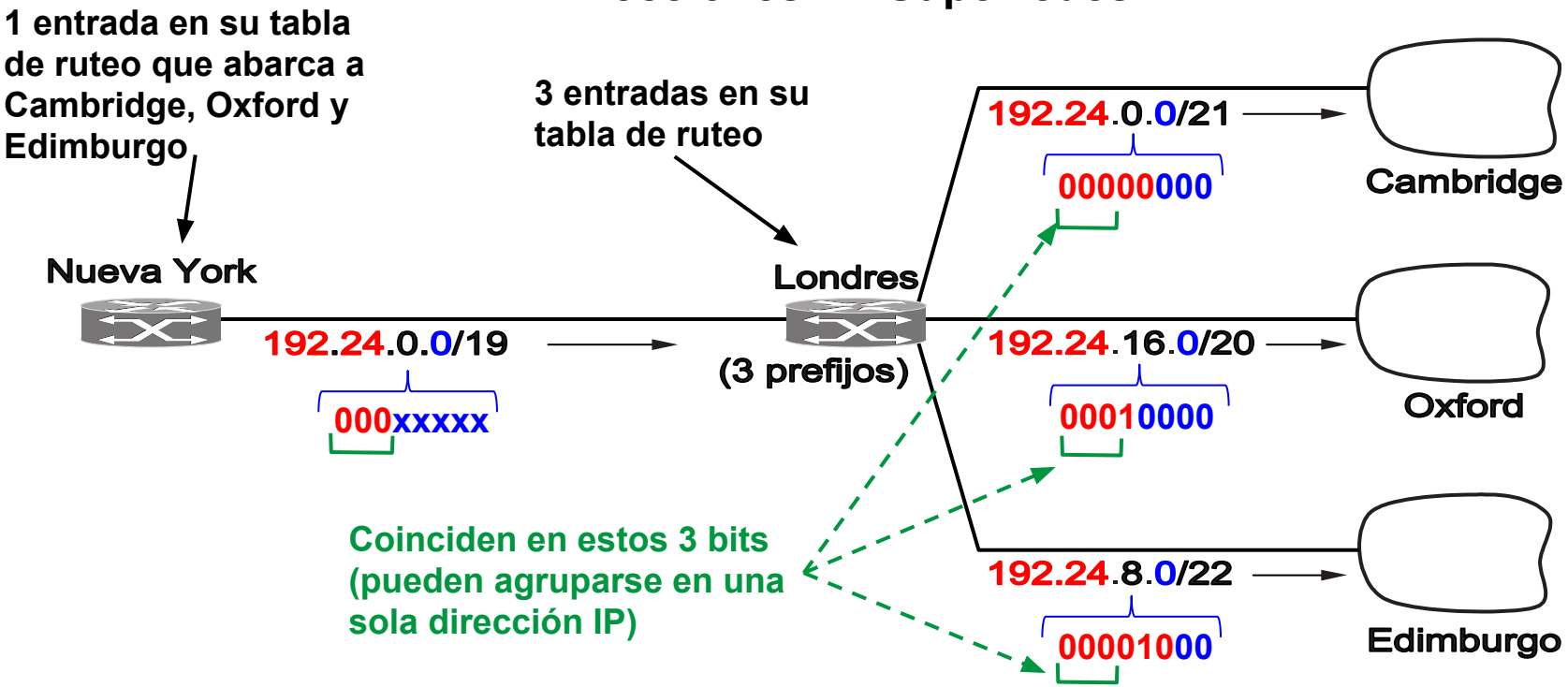


Figura obtenida de: A. Tanenbaum, D. Wetherall, "Redes de computadoras", Quinta edición (2012), pag. 384

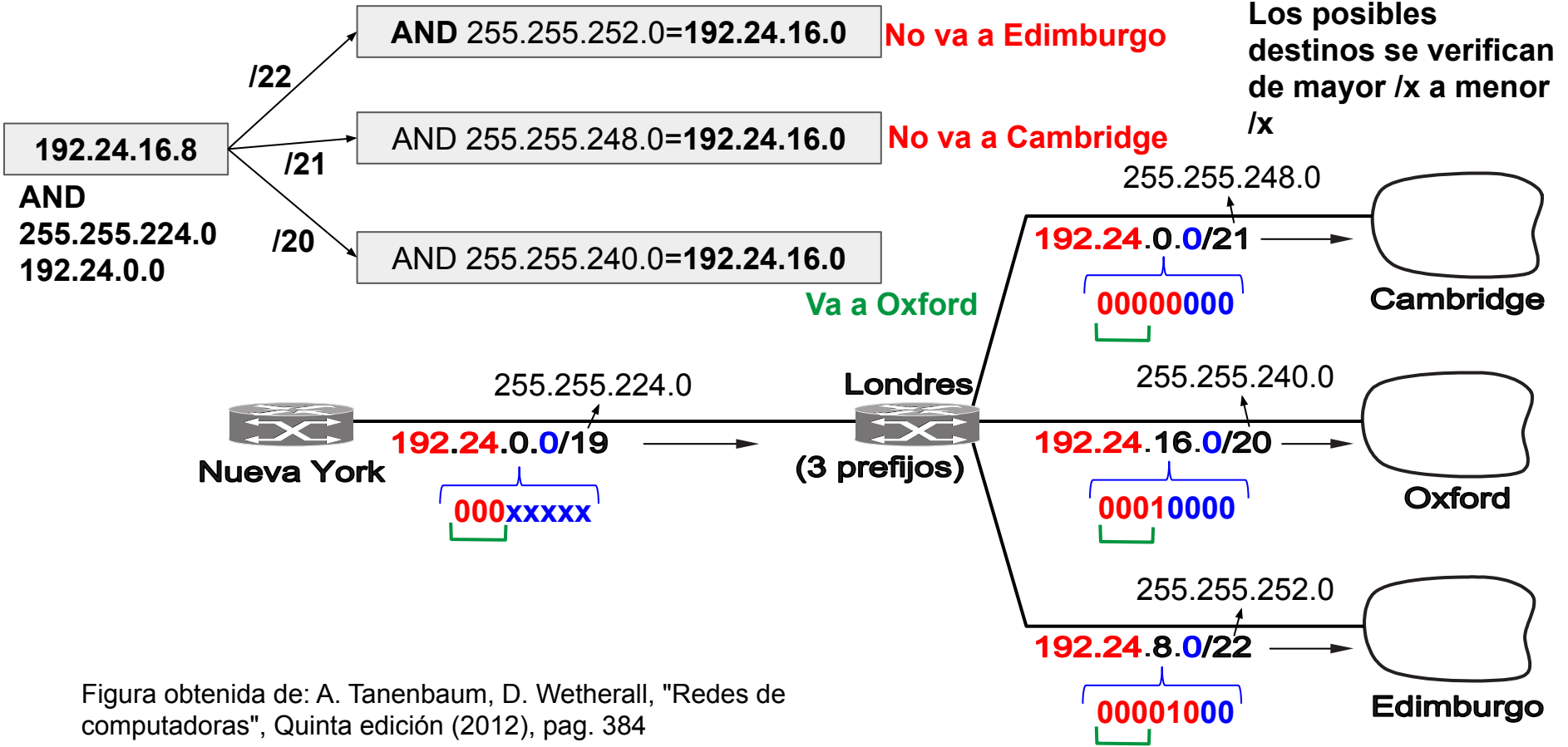
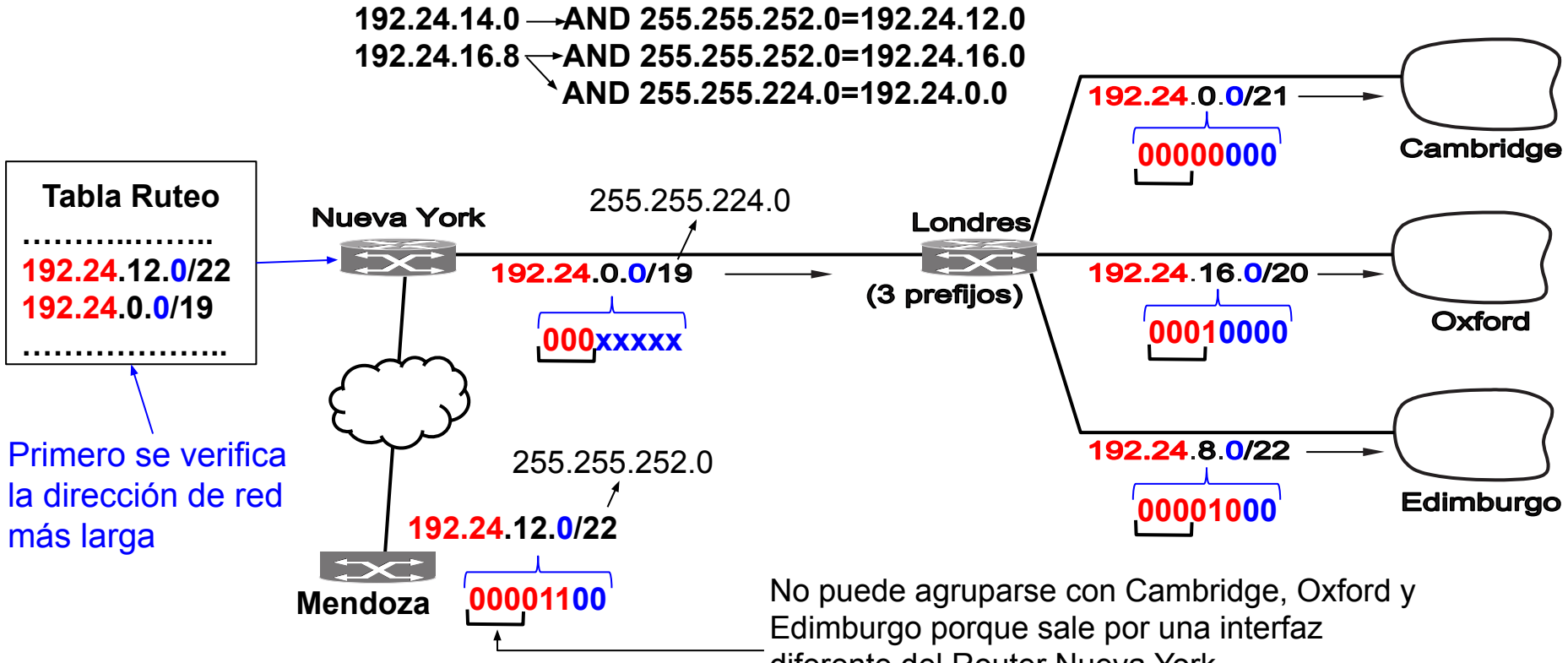


Figura obtenida de: A. Tanenbaum, D. Wetherall, "Redes de computadoras", Quinta edición (2012), pag. 384

CIDR (Classless InterDomain Routing): traslape de prefijos



Agotamiento de direcciones IP

- Causas:
  - El número total direcciones IPv4 (2^{32}=4.29*10^9) **no fue suficientes**.
  - El empleo de **clases de direcciones (A, B, C)** hizo que hubiera gran número de direcciones asignadas pero **no utilizadas**.
  - Al principio, las direcciones IP **se distribuyeron de manera inadecuada**.
- **Soluciones que ayudan a mitigar el problema:**
  - **CIDR (ruteo sin clases)**
    - Hace más eficiente la asignación de direcciones de red.
    - **No incrementa el número de direcciones IP**.
  - **Reclamación de direcciones sin uso**
    - no todos las quieren devolver
    - **No incrementa el número de direcciones IP**.

Problema: Agotamiento de direcciones IP

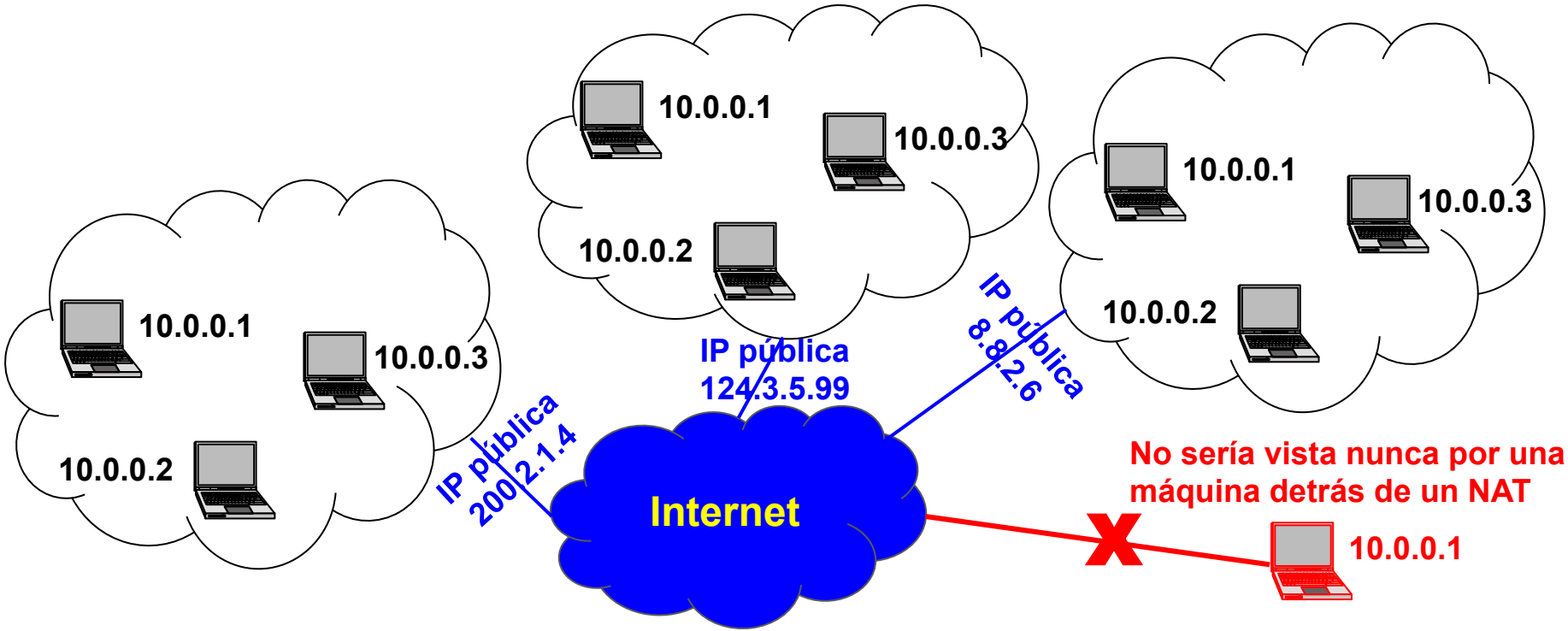
- **Soluciones que ayudan a mitigar el problema (continuación…):**
  - **IP dinámica**.
    - Al conectarse una máquina a la red se le asigna una IP. Cuando se desconecta, esa IP queda libre para asignarse a otra máquina.
    - **No incrementa el número de direcciones IP**.
    - Tendencia actual a mantenerse conectado todo el tiempo hace que pierda aplicabilidad.
- **Soluciones que resuelven el problema:**
  - **NAT:** Network Address Translation. Permite conectar más de una interfaz (pocas o miles) a una sola IP **(RFC 3022).**
  - **IPv6:** Total direcciones IPv6: $2^{128}=3.40*10^{38}$ o $6.7*10^{17}$ direcciones por mm^2 de superficie de la tierra.

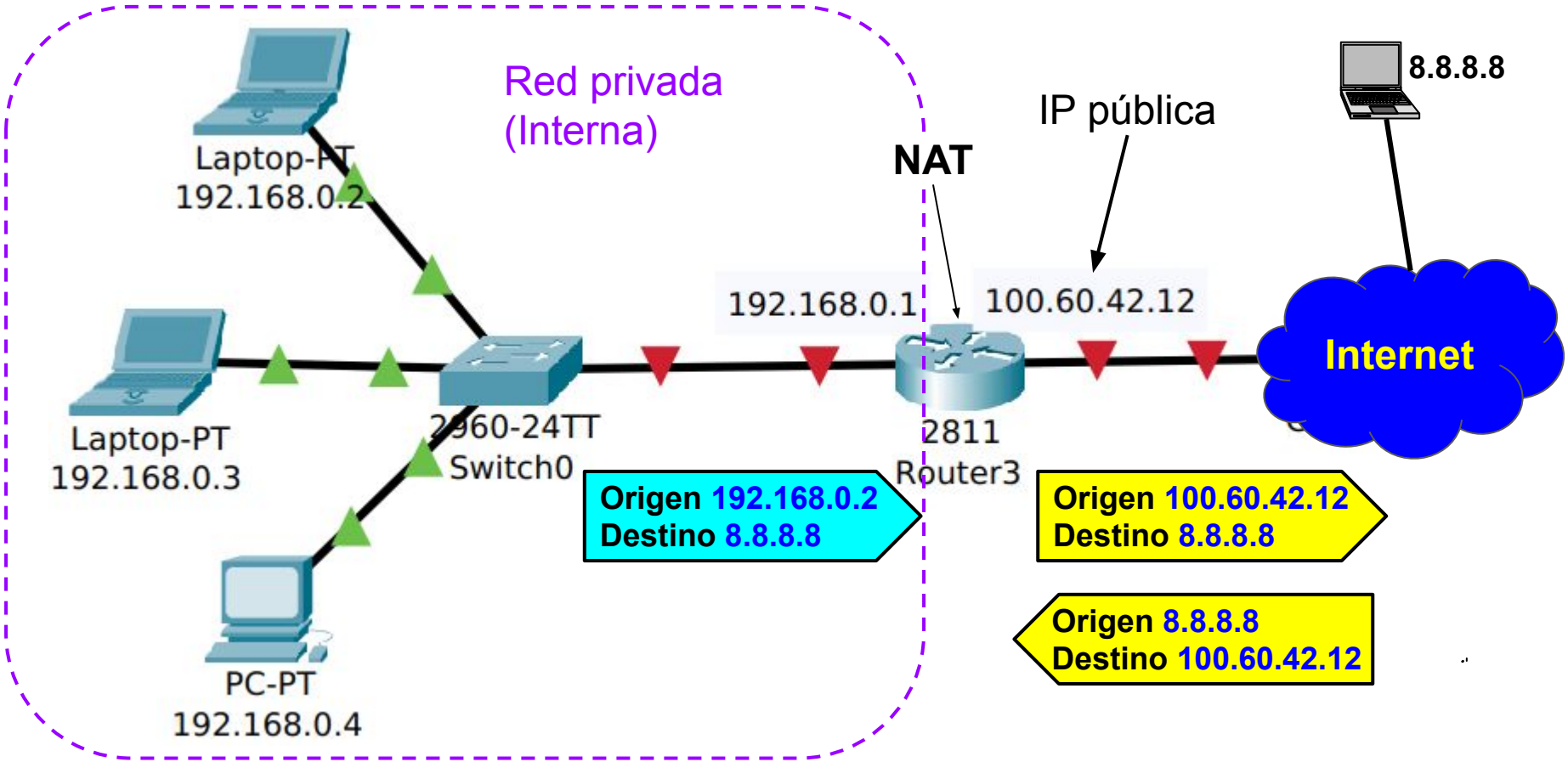
Protocolo IP: NAT (Network Address Translation) (Traducción de Dirección de Red)

- Asignar a **una red** conectada a Internet una **única IP** (usualmente casas o empresas) llamada **IP pública**.
- La IP pública es **compartida** por **todas las computadoras** de la red.
- Dentro de la red, **cada computadora** tiene **una IP** que puede usar solo para **tráfico interno** en la red, llamada **IP privada** (RFC 1918).
- Si un paquete tiene que salir de la red cliente, su **IP privada se cambia por la IP pública**.
- **Una IP pública no puede usarse como IP privada**.
- Prefijos de direcciones IP que pueden utilizarse como **IP privada**:
  - **10.0.0.0/8** (10.0.0.0 - 10.255.255.255, 16M de direcciones).
  - **172.16.0.0/12** (172.16.0.0 - 172.31.255.255, 1M de direcciones).
  - **192.168.0.0/16** (192.168.0.0 - 192.168.255.255, 65k direcciones).
- **Una IP reservada para usarse como privada no puede usarse como pública**

Protocolo IP: NAT (Network Address Translation)

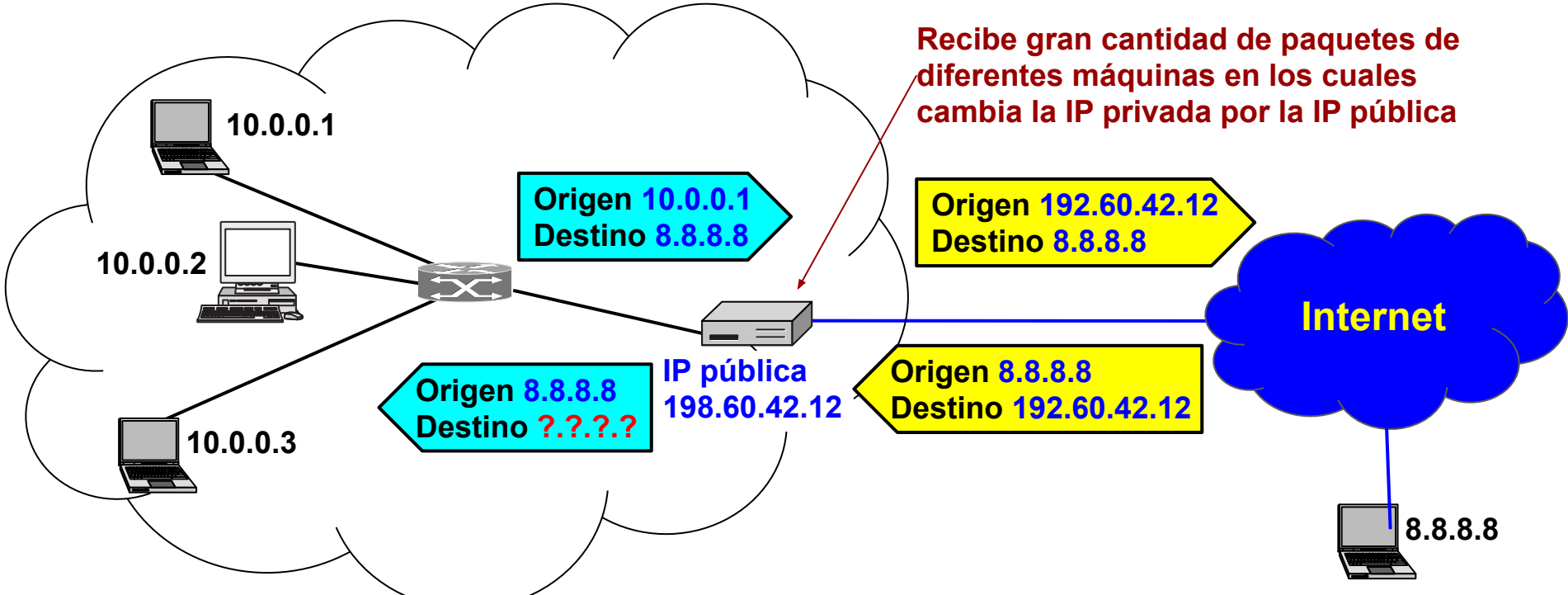
- Las **IP privadas** pueden **repetirse** en todas las redes privadas existentes.




Red privada
(Interna)
Laptop-PT
192.168.0.2
Laptop-PT
192.168.0.3
PC-PT
192.168.0.4
2960-24TT
Switch0
192.168.0.1
NAT
IP pública
100.60.42.12
2811
Router3
8.8.8.8
Internet
Origen 192.168.0.2
Destino 8.8.8.8
Origen 100.60.42.12
Destino 8.8.8.8
Origen 8.8.8.8
Destino 100.60.42.12

Protocolo IP: NAT (Network Address Translation)

- **Problema**: Cuando llega un paquete de respuesta, **tendrá como IP destino la IP pública, ¿Como sabe el NAT la IP privada de origen?**



Protocolo IP: NAT (Network Address Translation)

- **Solución: Se utiliza el campo puerto de origen TCP o UDP (capa transporte)**.
  - Campo de 16 bits de los segmentos[1] generados por la capa de transporte.
  - Puerto origen: Identifica al proceso que genera el segmento TCP
  - Puerto destino: Identifica al proceso destino del segmento TCP.
- El NAT posee una "**tabla de traducciones de entrada**" con 65536 entradas.
  - Cada entrada de la tabla posee un **índice** y espacio para almacenar una **dirección IP** y un **puerto origen**.
- Se almacena en la tabla la dirección IP y puerto origen, y en el campo puerto origen se inserta el índice de la tabla donde se almacenó el IP y puerto.
- Se recalcula el CRC.

[1] Segmendo: Nombre de las unidades de datos generados en la capa de transporte

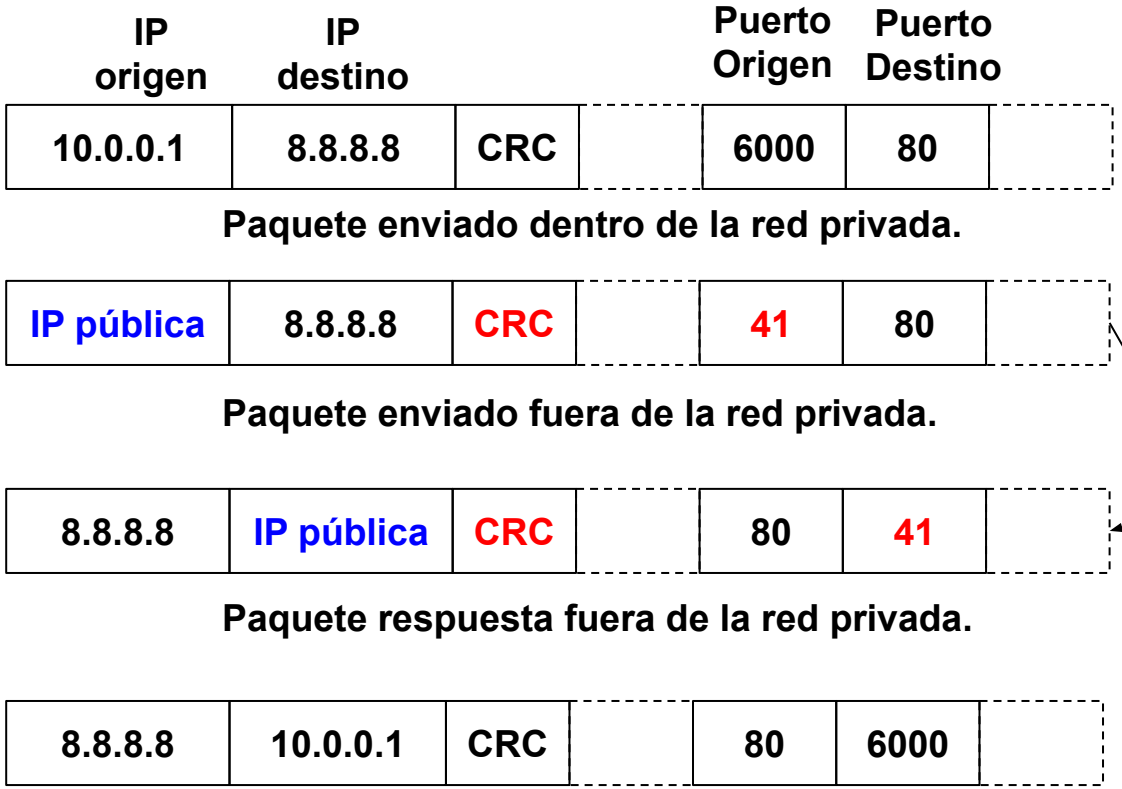


Tabla de traducciones de entrada

Indice	IP privada origen	Puerto origen
….	…..	…..
41	10.0.0.1	6000

Protocolo IP: NAT: Desventajas, objeciones

- Quebranta el modelo IP: según IP, cada máquina conectada a Internet tiene un IP único. Con NAT puede hacer muchas máquinas con el mismo IP.
- **Una máquina detrás de un NAT no puede ser vista desde Internet** (solo puede llegarle una respuesta desde Internet si la máquina envió previamente un paquete de salida y sus datos se almacenaron en el NAT).
- **Si el NAT falla se pierden todos los paquetes desde el exterior destinados a la red privada** (por ejemplo: se pierden todas las conexiones TCP).
- **Requiere que el usuario utilice TCP o UDP** (protocolos de la capa de transporte con un campo de puerto).
- **Quebranta el principio de que una capa k no puede depender de la capa k+1, y mucho menos modificar campos de la capa k+1.**
- **Pero resuelve el problema del límite de usuarios que pueden acceder a Internet por agotamiento de direcciones IP** (la mayoría de los usuarios no necesitan una dirección IP, solo quieren acceder a Internet).
- **Seguridad:** Una máquina externa no puede llegar a una máquina con IP privada.

Temario

- Introducción.
- Congestión, reenvío de paquetes y calidad de servicio.
- IPv4
- **IPv6**
  - **Características. Encabezado. Encabezados de extensión.**
  - **Diferencias con IPv4.**
  - **Mecanismos de transmisión de IPv4 a IPv6.**
- Protocolos de control de Internet
- Conmutación basada en etiquetas (MPLS)
- Algoritmos de enrutamiento

IPv6

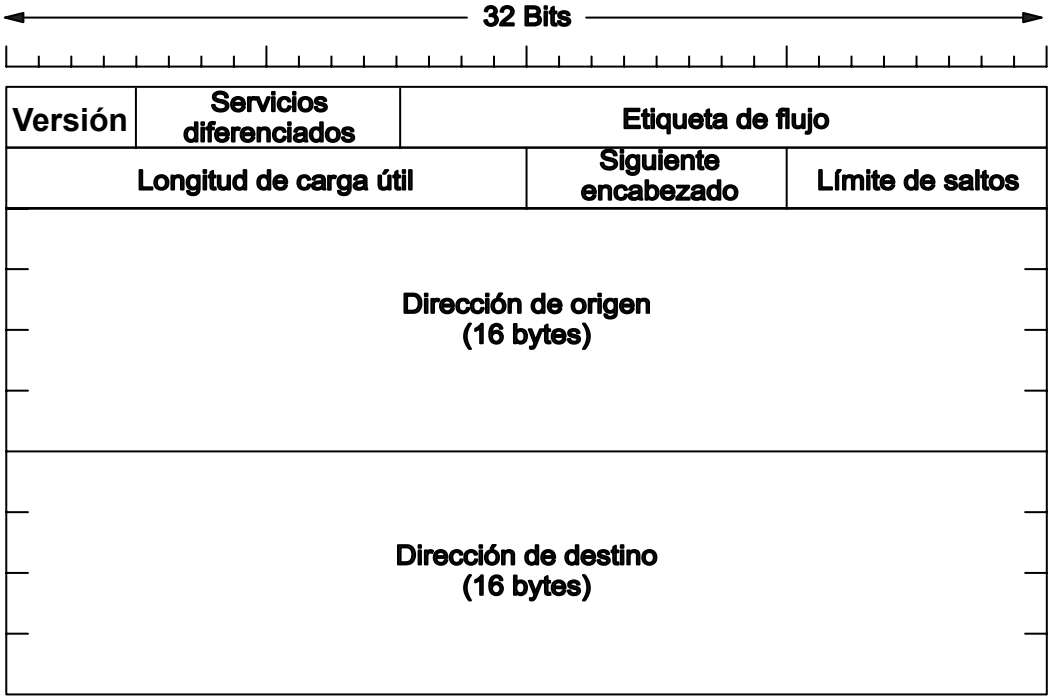
- Estándar desde 1998 (RFC 2460 - 2466).
- Características principales (algunas):
  - Campos de direcciones de **128 bits**[1] en lugar de los 32 de IPv4.
  - **Encabezado más simple** (7 campos en lugar de los 13 de IPv4) y de **tamaño fijo** (Su procesamientos es **más rápido**).
  - **Encabezados de extensión** en lugar de campos de opciones.
    - Esto permite que el encabezado tenga longitud fija.
  - **Mejoras en la seguridad.**
  - **Enrutamiento jerárquico y agregación de direcciones** (permite disminuir tamaño de tablas de ruteo).
  - Características mejoradas de **calidad de servicio**.
    - Muy importante para transmitir multimedia.

[1] $2^{128}=3.40*10^{38}$ o $6.7*10^{17}$ direcciones por mm^2 de superficie de la tierra

IPv6

- Características principales (continuación):
  - Etiquetado de paquetes como pertenecientes a un **flujo** que requiere tratamiento especial (importante para video en tiempo real).
  - **Jumbogramas**: paquetes de hasta 4GB.
  - **El tamaño del paquete se elige en el origen. No se fragmenta**.
- No hay código para detección de errores.
  - Se confía en que la suma de verificación se calcula tanto en capa de enlace y en la de transporte.
  - Las redes actuales son en general muy confiables.
  - Quitar la suma de verificación aumenta el desempeño (no hay que recalcular la suma de verificación en cada salto).

Encabezado IPv6



No posee campos relacionados con:

- **Fragmentación.**
- **Opciones (Puede poseer encabezados adicionales) .**
- **Longitud del encabezado (tamaño fijo).**
- **Suma de verificación.**
- **Identificación de paquete (No necesario si no hay fragmentación).**

Figura obtenida de: A. Tanenbaum, D. Wetherall, "Redes de computadoras", Quinta edición (2012), pag. 393

Encabezado IPv6: Campos

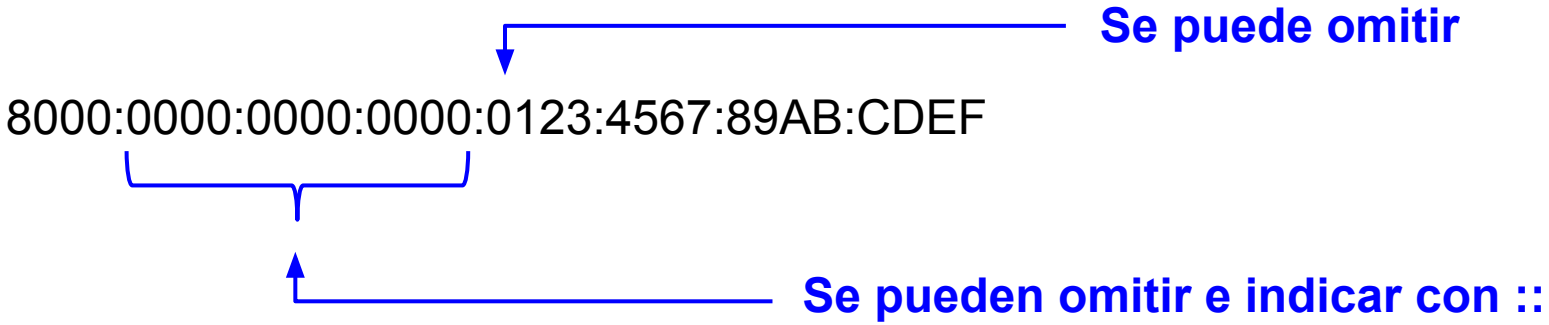
- Versión: Indica que es IPv6 (Los enrutadores necesitan saber si es IPv4 o IPv6).
- Servicios diferenciados: Identifica diferentes calidades de servicio o tipo de tráfico (Como IPv4).
- Etiqueta de Flujo: permite marcar grupos de paquetes como pertenecientes a un flujo, para que sean tratados de la misma manera (tengan los mismos requerimientos). Por ejemplo: baja latencia.
- Siguiente encabezado:
  - El paquete IPv6 puede tener encabezados adicionales o de extensión (hay distintos tipos de encabezados de extensión).
  - Este campo puede indicar:
    - El tipo del siguiente encabezado de extensión (si lo hay).
    - Si no hay encabezado de extensión, indica el protocolo del datagrama de la capa de transporte.

Encabezado IPv6: Campos

- Límite de saltos: Evita que el paquete viva por siempre.

Notación de las direcciones IPv6

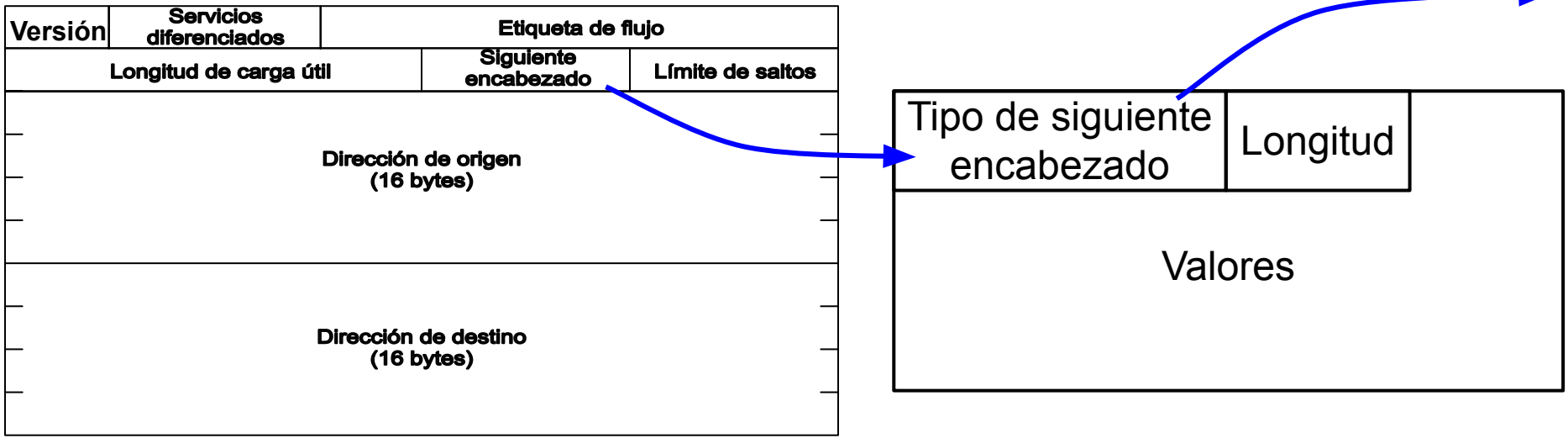
- Los bit se agrupan en 8 grupos de 4 números hexadecimales (8*4*4=128).



La dirección anterior simplificada quedaría como: 8000::123:4567:89AB:CDEF

Encabezados de Extensión

- Permiten agregar **opciones adicionales**.
- No son obligatorios, pero si están, su presencia se debe indicar en el campo "Siguiente Encabezado".
- Algunos tienen tamaño fijo, otros tienen tamaño variable.
- Formato:

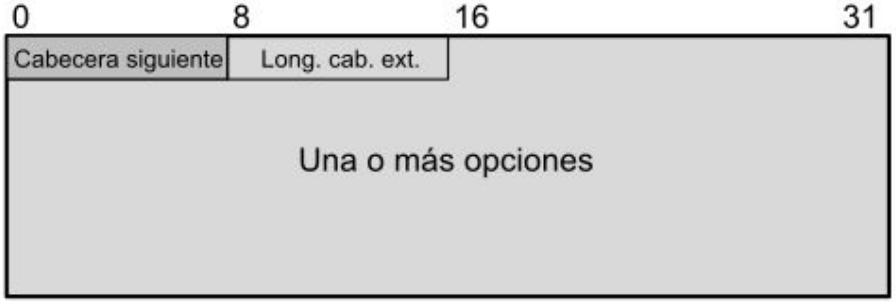


- **Tipo** (1 byte): indica el tipo de encabezado de extensión. Indicado en el encabezado anterior.
  - Los **dos primeros bits indican que hacer a los enrutadores que no sepan cómo procesar la información**:
    - Omitir la opción
    - Descartar el paquete enviando un mensaje ICMP (Protocolo de mensajes de control de Internet, se verá en esta unidad).
    - Descartar el paquete sin enviar mensajes ICMP.
- **Longitud** (1 byte): Indica la longitud del campo Valor.
- **Valor** (255 bytes).

Algunos tipos de encabezados de extensión

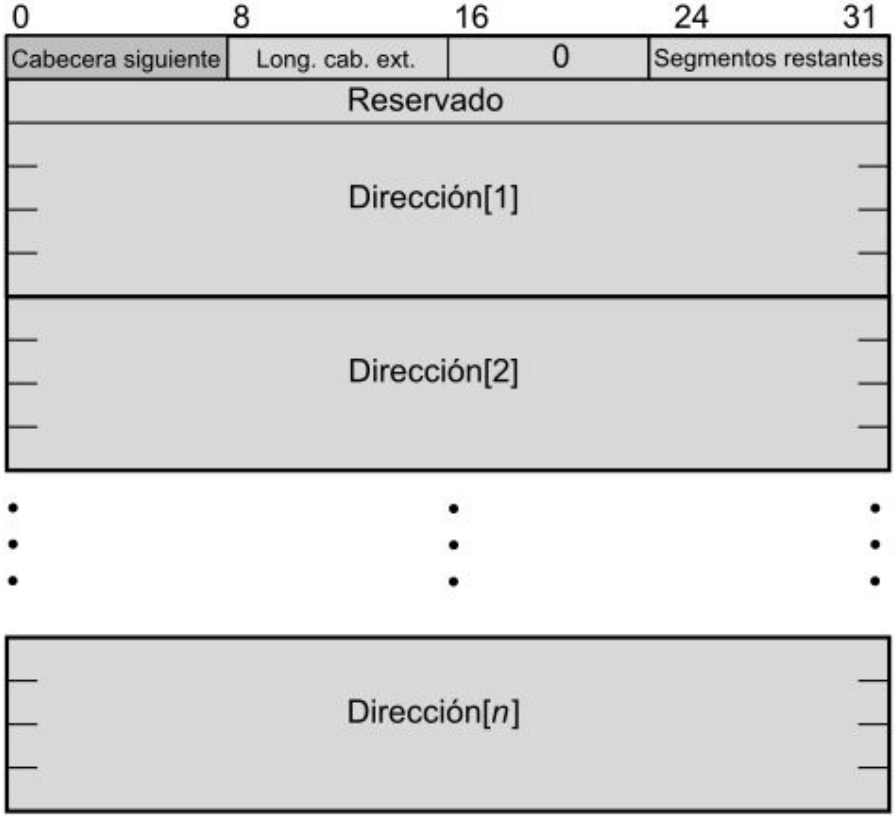
Encabezado de extensión	Descripción
Opciones salto por salto.	Información diversa para los enrutadores.
Opciones de destino.	Información adicional para el destino.
Enrutamiento.	Lista informal de los enrutadores a visitar.
Fragmentación.	Manejo de fragmentos de datagramas.
Autentificación.	Verificación de la identidad del emisor.
Carga útil de seguridad cifrada.	Información sobre el contenido cifrado.

Tabla obtenida de: A. Tanenbaum, D. Wetherall, "Redes de computadoras", Quinta edición (2012), pag. 395



(a) Cabecera de opciones salto a salto; cabecera de opciones para el destino

(b) Cabecera de fragmentación



(d) Cabecera de encaminamiento tipo 0

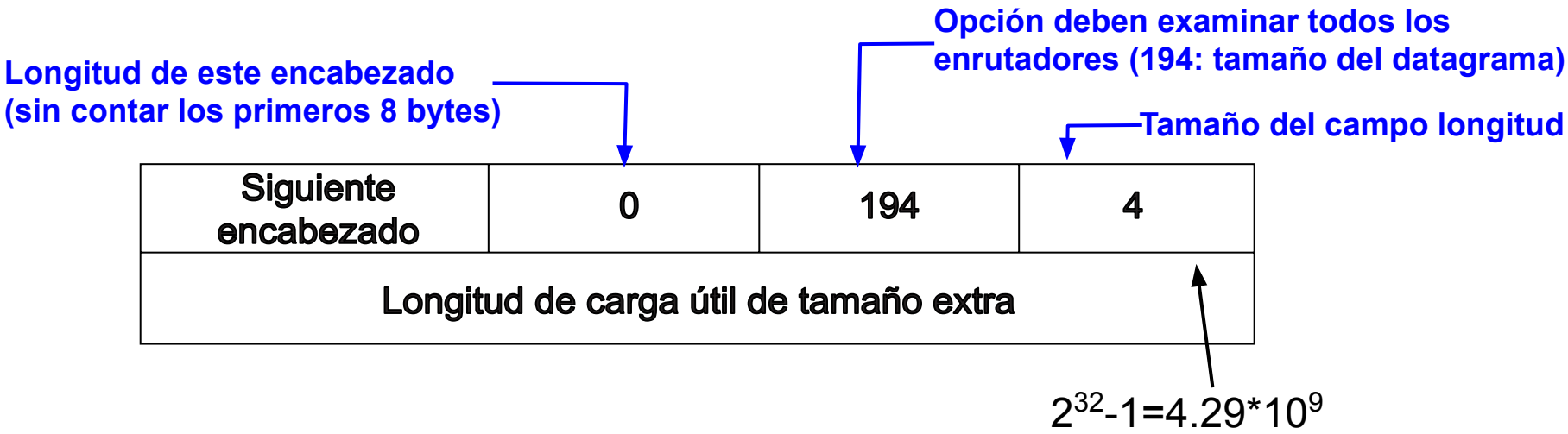
Reservado y Res: reservado uso futuro.
M: Más fragmentos
Identificador: ID paquete original

Segmentos restantes: número de nodos intermedios explícitamente contenidos en la lista que falta visitar.

Figura obtenida de: William Stallings, “Comunicaciones y redes de computadores” , Séptima Edición, pag. 625

Ejemplo: Envío de **paquetes de más de 64 Kb o jumbogramas**

- Utilizados en computación de alto rendimiento o video.
- Encabezado de extensión **Opciones salto por salto**.
  - Indica opciones que deben examinar todos los enrutadores a lo largo de la ruta.



Transición de IPv4 a IPv6

- Mecanismos:
  - **Tunelización** entre redes (o computadoras individuales) IPv6 conectadas por redes IPv4.
  - **Doble pila**: Cada host y router posea pilas IPv4 e IPv6.
  - **Traducción**: Para comunicar una máquina que solo emplee IPv4 con una que solo emplee IPv6.
- Estadísticas de adopción de Google:
  - https://www.google.com/intl/en/ipv6/statistics.html (se sugiere ver).

Temario

- Introducción.
- Congestión y calidad de servicio.
- IPv4
- IPv6
- **Protocolos de control de Internet (ICMP), ARP y DHCP.**
- Conmutación basada en etiquetas (MPLS)
- Algoritmos de enrutamiento

Protocolos de Control de Internet: ICMP (Internet Control Message Protocol)

- Aplicaciones:
  - Informar al emisor si ocurre un **error**.
  - Permitir obtener información sobre el **funcionamiento** de la red.
- Se encapsula en paquetes IP.

Protocolo ICMP: Ejemplos de mensajes

- **Destination unreachable** (Destino inaccesible):
  - Cuando el destino de un paquete no puede localizarse.
  - Cuando un paquete con el bit DF (Don’t Fragment) seteado llega a una red con tamaño de paquetes más pequeño.

Protocolo ICMP: Ejemplos de mensajes

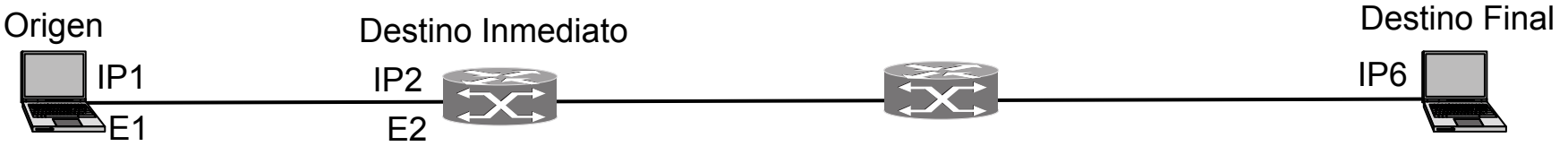
- **Echo and echo reply** (Eco y respuesta al eco): Mensaje para ver si un destino es alcanzable y está “vivo”. El emisor envía un mensaje “eco” y espera como respuesta el mensaje “respuesta al eco”.
  - Empleado por la **aplicación ping**.
    - Sugerencia: ver “ping --help” y “man ping”.
- **Time exceeded** (Tiempo excedido): Se envía cuando el campo tiempo de vida (o número de saltos máximo) de un paquete llega a 0.
  - Usado por **traceroute** (aplicación que encuentra todos los enrutadores hacia un destino).
- **Source quench** (Ralentización de fuente): Mensaje que se envía a un host para indicarle que está enviando demasiados paquetes.
  - Se esperaba que sería usado para regular congestiones. Pero hoy día la congestión se trata en la capa de transporte.

Protocolo ICMP: Ejemplos de mensajes

- **Redirect** (Redireccionar): Cuando un enrutador detecta un paquete mal enrutado, o la existencia de un camino más corto al destino final, envía este mensaje al emisor para que actualice la tabla de ruteo.
- **Parameter problem** (Problema de parámetros): Hay un valor ilegal en un parámetro del encabezado.
- **Timestamp request/reply** (Estampa de tiempo, Petición/respuesta): Similar a eco, pero con estampa de tiempo.
- **Router advertisement/solicitation** (anuncio de enrutador/solicitud de enrutador): usados por los host para buscar enrutadores.
- Otros: www.iana.org/assignments/icmp-parameters/icmp-parameters.xhtml

Protocolo ARP (Address Resolution Protocol) (Protocolo de Resolución de Direcciones)

- **IP toma decisiones de ruteo**: decide cual es el host o enrutador inmediato al cual enviar un paquete para que llegue al destino final.
  - Si hay varias interfaces, decide la IP de la interfaz de salida.
- Una vez que IP conoce el destino inmediato (destino final o enrutador intermedio) IP entrega el paquete a la **capa de enlace** para que haga el lo envío.
- **Problema**: La capa de enlace **NO emplea direcciones IP. En una red por difusión** (Ethernet o IEEE 802.11)**, se necesita conocer la dirección MAC del destino inmediato**.
- **ARP:** protocolo que asocia direcciones IP con direcciones MAC:



Protocolo ARP

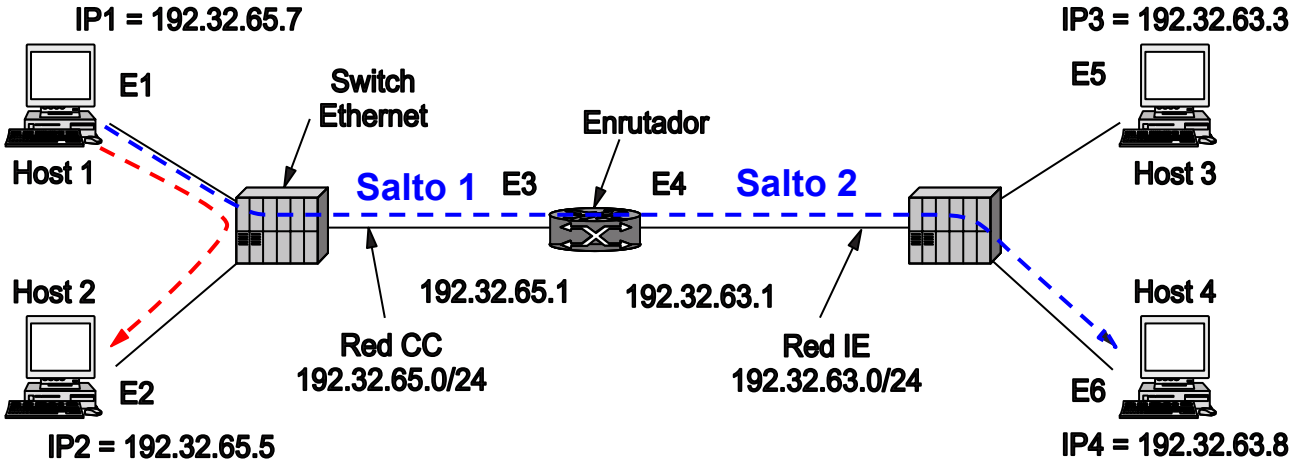
Direcciones IP	Direcciones MAC
• Configurables, jerárquicas. • Dependientes de la red, si la máquina se mueve a otra red, la dirección IP cambia.	• Fijas y grabadas de fábrica para cada Interfaz. • Si la máquina se mueve a otra red, la dirección MAC NO cambia.

- IP decide el destino inmediato:
  - Si el destino final está en **la misma red**, el destino inmediato será el **destino final**.
  - Si el destino final está en **otra red**, el destino inmediato será un **router**.
- Funcionamiento de ARP:
  - Cada máquina posee una tabla que asocia direcciones IP a direcciones MAC.
  - Si se conoce la dirección MAC de destino, la capa de enlace envía el paquete al destino que **IP decidió**.

Funcionamiento de ARP (continuación):

- Si no se conoce la dirección MAC de destino:
  - El origen envía una pregunta por difusión (Ethernet o 802.11) preguntando: ¿Quién posee tal dirección IP?
  - Todas las máquinas de la red **reciben el paquete** y **verifican si es su IP**
- La máquina **dueña de la IP**, responde **enviando su dirección MAC**.
  - La máquina origen ya puede enviar el paquete.
- La información queda **almacenada** para **comunicaciones futuras**.
- La máquina origen de la consulta **envía su propia IP** para que el destino la almacene en su tabla ARP.
- Todas las máquinas que escuchan la consulta y la respuesta ARP, y almacenan las direcciones IP y MAC de las máquinas origen y destino en sus tablas ARP.
- Las asociaciones dirección IP - dirección MAC **expiran cada cierta cantidad de minutos**, para permitir adaptarse a cambios en la red.
- Cuando una máquina se **conecta**, envía **peticiones ARP buscándose a si misma**. Esto permite que otras máquinas agenden su IP y dirección MAC.

Protocolo ARP (Address Resolution Protocol)
(Repaso de rutero)



	N° de Saltos	Salto	IP origen	IP destino	Eth origen	Eth destino
IP1 a IP2	**1**	**1°**	**IP1**	**IP2**	**E1**	**E2**
IP1 a IP4	**2**	**1°** **2°**	**IP1** **IP1**	**IP4** **IP4**	**E1** **E4**	**E3** **E6**

Protocolo DHCP (Dynamic Host Configuration Protocol)
Protocolo de Configuración Dinámica de Host

- ¿Cómo obtienen direcciones IP las computadoras?
  - **Asignación estática** (Las asigna manualmente un administrador).
  - **Asignación dinámica** (automática) mediante DHCP (RFC 2131 y 2132)
- **Servidor DHCP**: es el encargado de asignar direcciones IP
- Al **encender** una máquina, no posee dirección IP.
  - La máquina difunde una petición de IP o **paquete DHCP Discover** (incluye la dirección MAC de la máquina origen).
  - El **servidor DHCP** le asigna una **dirección IP libre** y se la envía a la máquina a través de un paquete **DHCP offer**.
  - La asignación dura un tiempo determinado. Luego de ese tiempo, la máquina debe enviar una **petición de renovación** para conservar la IP.
  - DHCP **configura otros parámetros** (máscara de red, servidores DNS[1], etc.)

[1] Protocolo de la capa de aplicación. Se verá en la unidad 6

Temario

- Introducción.
- Congestión y calidad de servicio.
- IPv4
- IPv6
- Protocolos de control de Internet
- Conmutación basada en etiquetas (MPLS)
- Algoritmos de enrutamiento

Conmutación mediante etiquetas (MPLS)

- MPLS (MultiProtocol Label Switching) o conmutación mediante etiquetas multiprotocolo (RFC 3031).
- Protocolo **orientado a conexión** (circuitos virtuales) [1].
- Basado en **tunelización**: Cada paquete (puede ser IP u otro protocolo) se encapsula añadiendo un encabezado que contiene una etiqueta.
- **El ruteo que hace en base a esas etiquetas** o circuitos virtuales.
- Puede transportarse en otros protocolos de capa de enlace, por ejemplo PPP.
- Sucesor de Frame Relay y ATM.

[1] Repaso (ver filmina 12): Requiere una negociación previa, en la cual se **preestablece la ruta** por la cual circularán los paquetes. Los ruteadores poseen tablas en las que se asocian circuitos virtuales (o etiquetas) de entrada con circuitos virtuales (o etiquetas) de salida.

Conmutación mediante etiquetas (MPLS)

- MPLS no es de capa de enlace (varios saltos, no un solo enlace) ni de red (depende de IP u otro protocolo de red). Se dice que es **capa 2.5**

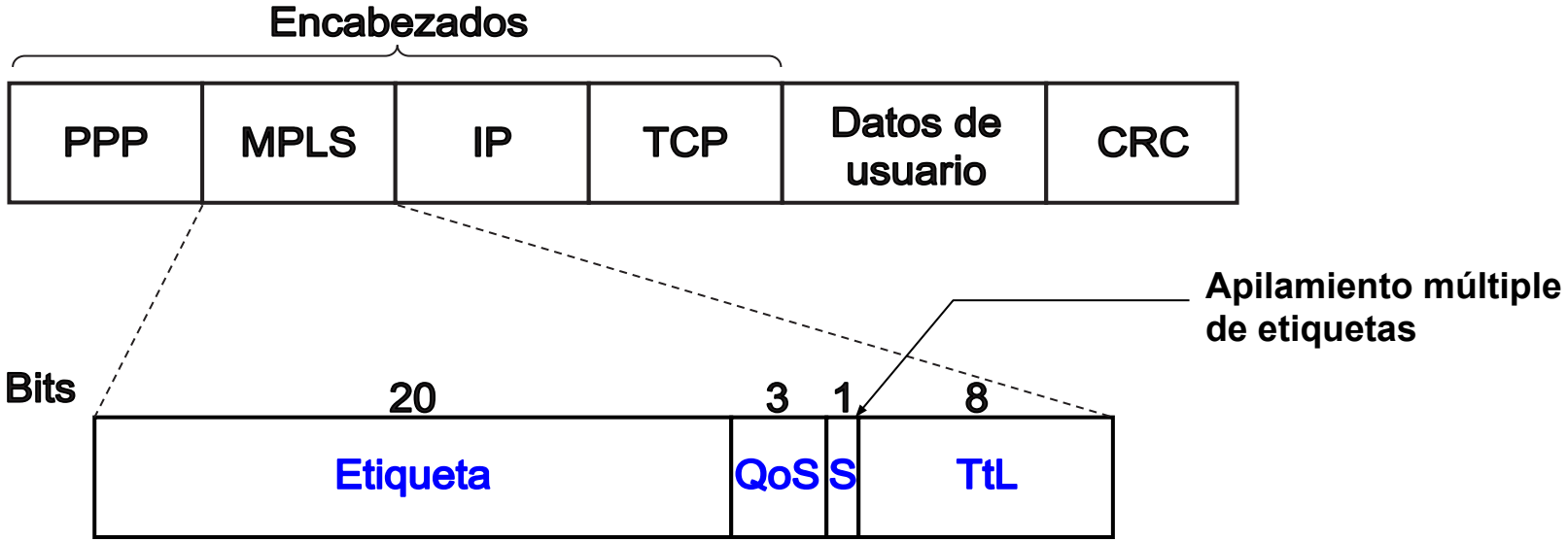


Figura obtenida de: A. Tanenbaum, D. Wetherall, "Redes de computadoras", Quinta edición (2012), pag. 403

Conmutación mediante etiquetas (MPLS)

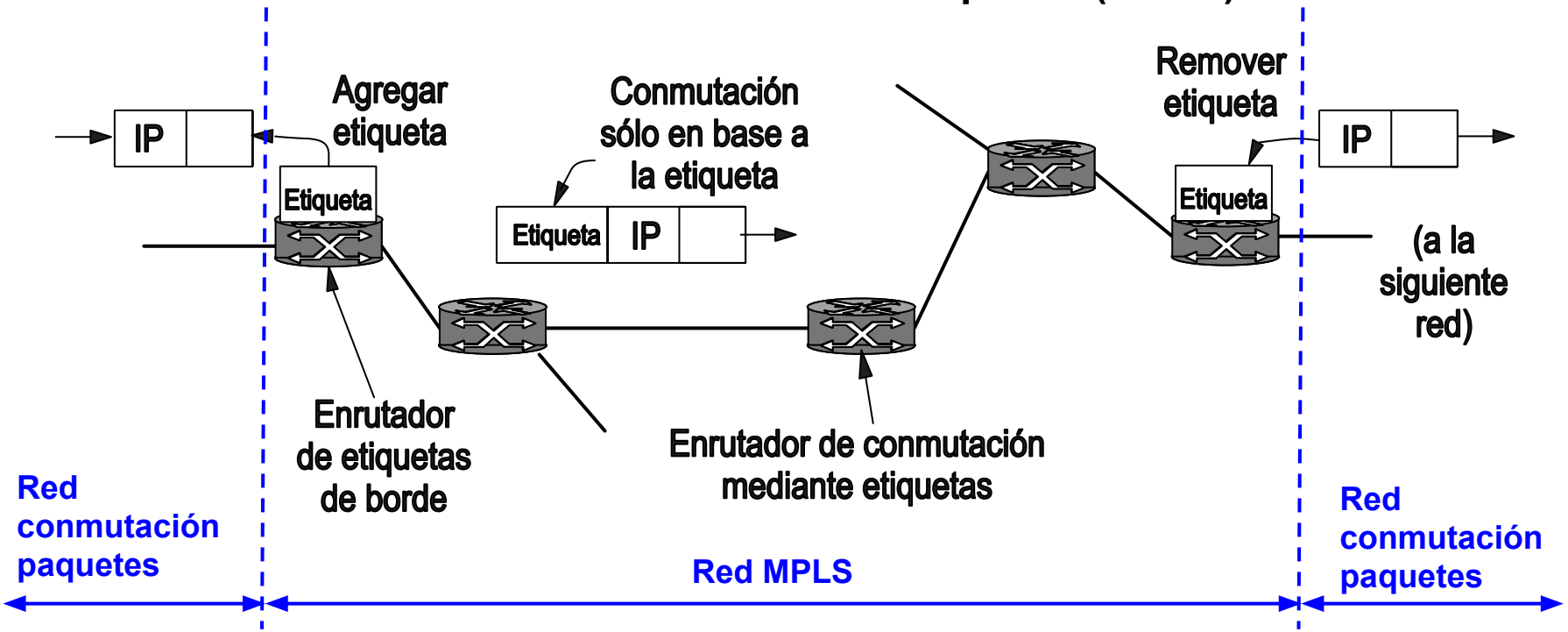


Figura obtenida de: A. Tanenbaum, D. Wetherall, "Redes de computadoras", Quinta edición (2012), pag. 404

Conmutación mediante etiquetas (MPLS)

- Características especiales:
  - Permite **agregación** de rutas.
    - Varios flujos que terminan en un mismo enrutador pueden utilizar la misma etiqueta.
  - Permite **múltiples niveles** (un paquete puede llevar varias etiquetas MPLS).
- Ventaja:
  - **Permite a un ISP brindar calidad de servicio**.

Temario

- Introducción.
- Congestión, reenvío de paquetes y calidad de servicio.
- IPv4
- IPv6
- Protocolos de control de Internet
- Conmutación basada en etiquetas (MPLS)
- **Algoritmos de enrutamiento:**
  - **Principio de optimización**
  - **Tipos de algoritmos de optimización**
  - **Enrutamiento jerárquico**
  - **Protocolos de Ruteo intradominio**
  - **Protocolos de Ruteo interdominio**

Algoritmos y protocolos de Enrutamiento

- Toma la desición del **camino que seguirá un paquete** para ir del origen al destino final (**arma y mantiene tablas de ruteo**).
- Tipos:
  - Algoritmos de enrutamiento **no adaptativo**: Las rutas se calculan por adelantado (llamado también estático).
  - Algoritmos de enrutamiento **adaptativo**: Las rutas se deciden en función de mediciones o estimaciones de tráfico y topologías actuales.
- **Son algoritmos distribuidos**.
- Emplea conceptos de: teoría de grafos, electrónica (ruidos, latencias) y matemática.

Tipos de algoritmos de ruteo

- Algoritmo de la ruta más corta.
- Inundación.
- Algoritmo de vector de distancia.
- Algoritmo de estado de enlace.

- Existen muchos algoritmos de enrutamiento. Todos se acercan a alguno de estos tipos de algoritmos. Algunos combinan características de varios.

Algoritmo de la ruta más corta

- Elige la ruta con la **menor "distancia"**.
- **Métricas de "distancia"**:
  - Número de saltos. Fácil de medir. (redes cableadas).
  - Distancia en metros o km. Redes inalámbricas (Necesidad de algoritmos de posicionamiento).
  - Latencia. Medida con paquetes de prueba (se envían peticiones de eco y se mide el tiempo que tarda en volver la respuesta).
  - Ancho de banda.
  - Trafico promedio.
  - …..
- En general la distancia es una **función ponderada de varias de estas métricas**.

Algoritmo de Inundación

- Cada **paquete que llega se envía por todas las líneas de salida**, excepto la línea por la cual llegó.
- El número de paquetes duplicados crece exponencialmente
- Métodos para limitar el tamaño de la inundación:
  - **Contador de saltos**: campo del encabezado de un paquete que disminuye con cada salto. Al llegar a cero, el paquete se descarta.
  - **Número de secuencia**: si un enrutador recibe un paquete de otro router por inundación con número de secuencia que ya recibió antes, significa que ya “inundó” el paquete, y no lo vuelve a transmitir.
- Aplicaciones:
  - Transmitir un mensaje a todos los nodos.
- Características:
  - Muy robusto.
  - No requiere configuración ni conocimiento de la red.

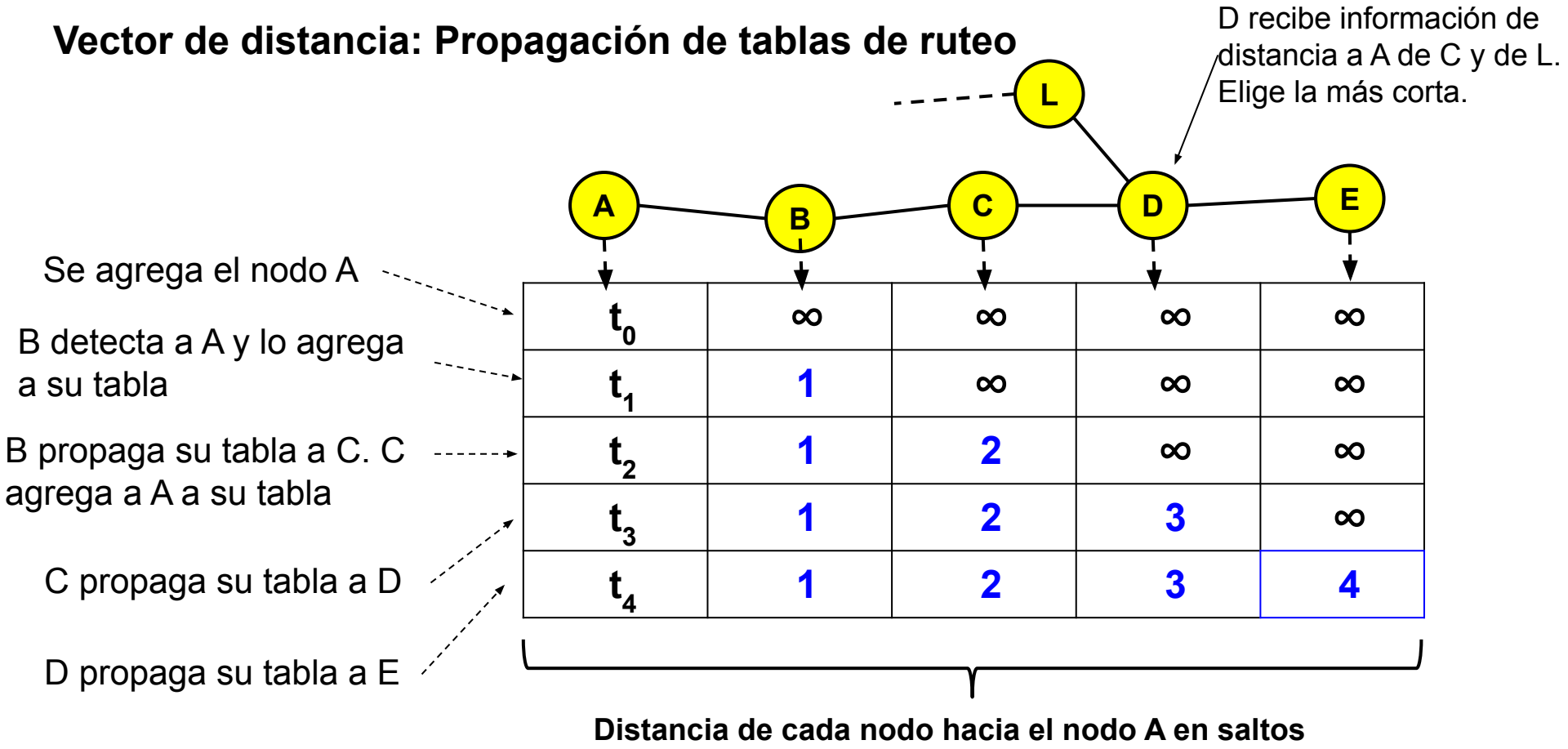
Algoritmo de ruteo por vector de distancia

- Cada entrada en la tabla de ruteo posee tres campos.

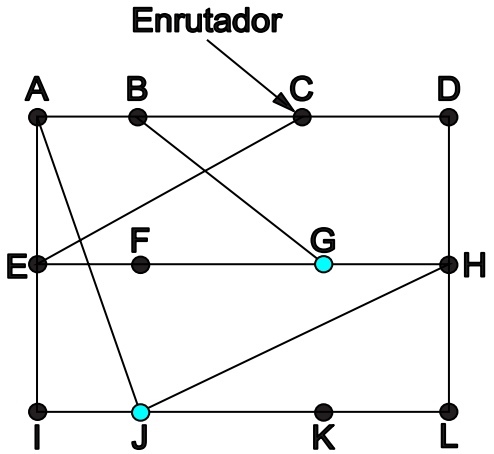
Destino Final	Línea de Salida preferida	Distancia

- Los nodos calculan la distancia a sus vecinos inmediatos mediante mensajes de prueba.
- Los nodos comparten periódicamente tablas de distancias con los nodos vecinos (conectados a la misma red), para que los mismos puedan actualizar sus tablas en caso de haberse producido cambios.
- Problemas:
  - Conteo al infinito
  - Converge muy lento ante cambios de la topología que involucran la desaparición de un nodo.

Vector de distancia: Propagación de tablas de ruteo



Algoritmo de ruteo por vector de distancia: Ejemplo



Cálculo de ruta y distancia de J hacia G

- a través de A: 8 + 18 = 26
- a través de I: 10 + 31 = 41
- a través de H: 12 + 6 = 18 ← Ruta elegida
- a través de K: 6 + 31 = 37

Destino final | Distancia | Líneas de salida

A	A	I	H	K
A	0	24	20	21
B	12	36	31	28
C	25	18	19	36
D	40	27	8	24
E	14	7	30	22
F	23	20	19	40
G	18	31	6	31
H	17	20	0	19
I	21	0	14	22
J	9	11	7	10
K	24	22	22	0
L	29	33	9	9

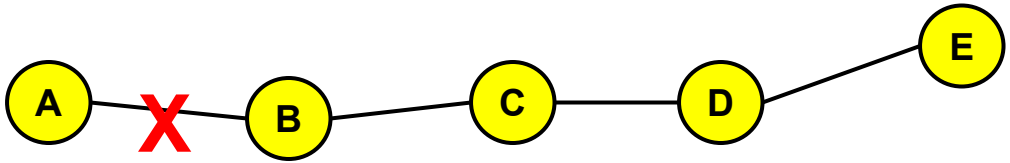
Tablas distancias recibidas por J desde A, I, H, K

A	8	A
B	20	A
C	28	I
D	20	H
E	17	I
F	30	I
G	18	H
H	12	H
I	10	I
J	0	
K	6	K
L	15	K

Tabla Ruteo J

Figura obtenida de: A. Tanenbaum, D. Wetherall, "Redes de computadoras", Quinta edición (2012), pag. 319

Algoritmo de ruteo por vector de distancia: Problema conteo infinito



Se rompe el enlace AB

B deja de recibir tablas de ruteo desde A, pero recibe una tabla de ruteo desde C. B calcula erróneamente a partir de la tabla recibida desde C que A está a distancia 3

B propaga su tabla errónea hacia C. C calcula erróneamente desde B que A está a distancia 4

Hay varias propuestas para resolver el problema, pero ninguna eficiente

t_0	1	2	3	4
....	....	....	....	....
t_4	3	2	3	4
t_5	3	4	3	4
t_6	5	4	5	4
t_7	5	6	5	6
t_8	7	6	7	6
t_9	7	8	7	8
t_{10}	9	8	9	8

Enrutamiento por estado del enlace

- Mensajes:
  - Al iniciarse el router, descubre sus vecinos y calcula los **costos de enlace** (función de la latencia, inversa del ancho de banda, etc.) a sus vecinos.
  - **Construir un paquete** con los costos de los enlaces y lo **envía a todos los demás enrutadores** del SA o sub grupo dentro del SA.
  - **Recibe** paquetes de estado de enlace de los demás routers.
  - Si cambia el costo de un enlace, si se agrega un nuevo enlace o uno existente deja de trabajar, crea un nuevo paquete de estado de enlace y lo comparte.
- Con la información recibida, cada nodo construye su tabla de ruteo (cada nodo).
- **Requiere** más **memoria** y **poder de procesamiento** que el algoritmo de vector de distancia.
- Se adapta a las condiciones de la red (latencia, ancho de banda disponible, etc.).

Enrutamiento Jerárquico

- Para que los protocolos de ruteo sean efectivos, los routers deben conocer como llegar a todos los routers o un porcentaje alto de ellos en la red.
  - **Problemas: La memoria y poder de procesamiento necesario deben incrementarse si el tamaño de la red crece.**
  - **Las tablas de ruteo pueden llegar a ser muy grandes y costosas de procesar.**
- **Solución: Dividir los enrutadores en regiones (o grupos)**.
  - Cada enrutador conoce a los enrutadores de su región, pero no a los de otras regiones.
  - Cada enrutador sabe como llegar a las diferentes regiones.

Ejemplo de Enrutamiento Jerárquico

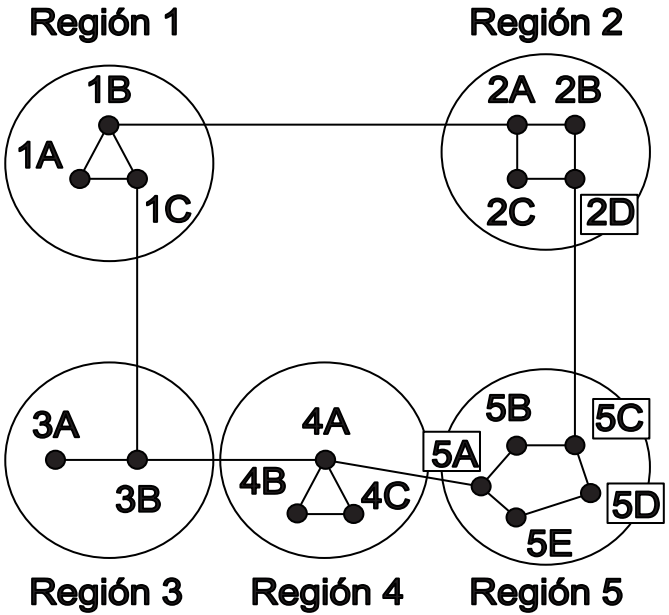


Figura basada en: A. Tanenbaum, D. Wetherall, "Redes de computadoras", Quinta edición (2012), pag. 326

Tabla ruteo de 1A

Dest.	Línea	Saltos
1A	–	–
1B	1B	1
1C	1C	1
2A	1B	2
2B	1B	3
2C	1B	3
2D	1B	4
3A	1C	3
3B	1C	2
4A	1C	3
4B	1C	4
4C	1C	4
5A	1C	4
5B	1C	5
5C	1B	5
5D	1C	6
5E	1C	5

Enrutamiento sin jerarquías

Dest.	Línea	Saltos
1A	–	–
1B	1B	1
1C	1C	1
2	1B	2
3	1C	2
4	1C	3
5	1C	4

Enrutamiento jerárquico

Interconexión de Redes: Enrutamiento en una internet

Concepto importante

- **Sistema Autónomo** (AS: Autonomous System): Red o grupo de redes que posee una **política** de enrutamiento propia e independiente:
  - Suele ser la red o red de redes de una organización. Todos los enrutadores suelen usar el mismo protocolo de encaminamiento.
  - Ejemplo de AS: Red de un ISP, Red de una Universidad, Red de grandes empresas (La UNCuyo es un AS).
  - **Las direcciones IP de red se asignan a AS**.
  - Internet es una gran colección de AS.
- Tipos de protocolos de enrutamiento:
  - Protocolos de enrutamiento **intradominio** o protocolo de puerta de enlace interior (RIP, OSPF, IS-IS, muchos otros propietarios), usado dentro de un AS.
  - Protocolos de enrutamiento **interdominio** o protocolo de puerta de enlace exterior (BGP: Border Gateway Protocol), usado para conectar AS.

Ejemplos de Protocolos de enrutamiento Intradominio: RIP
(Routing Information Protocol)

- Principal protocolo de ARPANET en sus comienzos.
- Basado en **vector de distancia "modificado"**:
  - Al agregarse una red o ruta, el algoritmo lo anuncia a sus vecinos.
  - Métricas: Número de saltos.
- **Funciona bien en sistemas pequeños**.
- Desventajas:
  - Su desempeño disminuye si el tamaño del sistema aumenta.
  - Convergencia lenta.
- Varias versiones: RIPv 1 para IPv4 con direccionamiento con clase, RIPv 2 para IPv4 sin clases, y RIPng para IPv6.

Ejemplos de Protocolos de enrutamiento Intradominio: OSPF

(Open Shortest Path First o primero la ruta más corta “abierto”)

- Estandarizado por la **IETF** en 1990 (RFC 2328 versión 2).
- Se emplea en redes internas de de empresas u organizaciones.
- Basado en algoritmo de **Estado de enlace** + **algoritmo de Dijkstra**.
- Soporte a enrutamiento con base en **tipo de servicio** (el primero).
- Balancea carga entre **múltiples rutas**.
- Soporte para **sistemas jerárquicos** (las redes eran muy grandes).
- Soporta enrutadores conectados mediante **enlaces punto a punto y por difusión** (ejemplo: Ethernet).

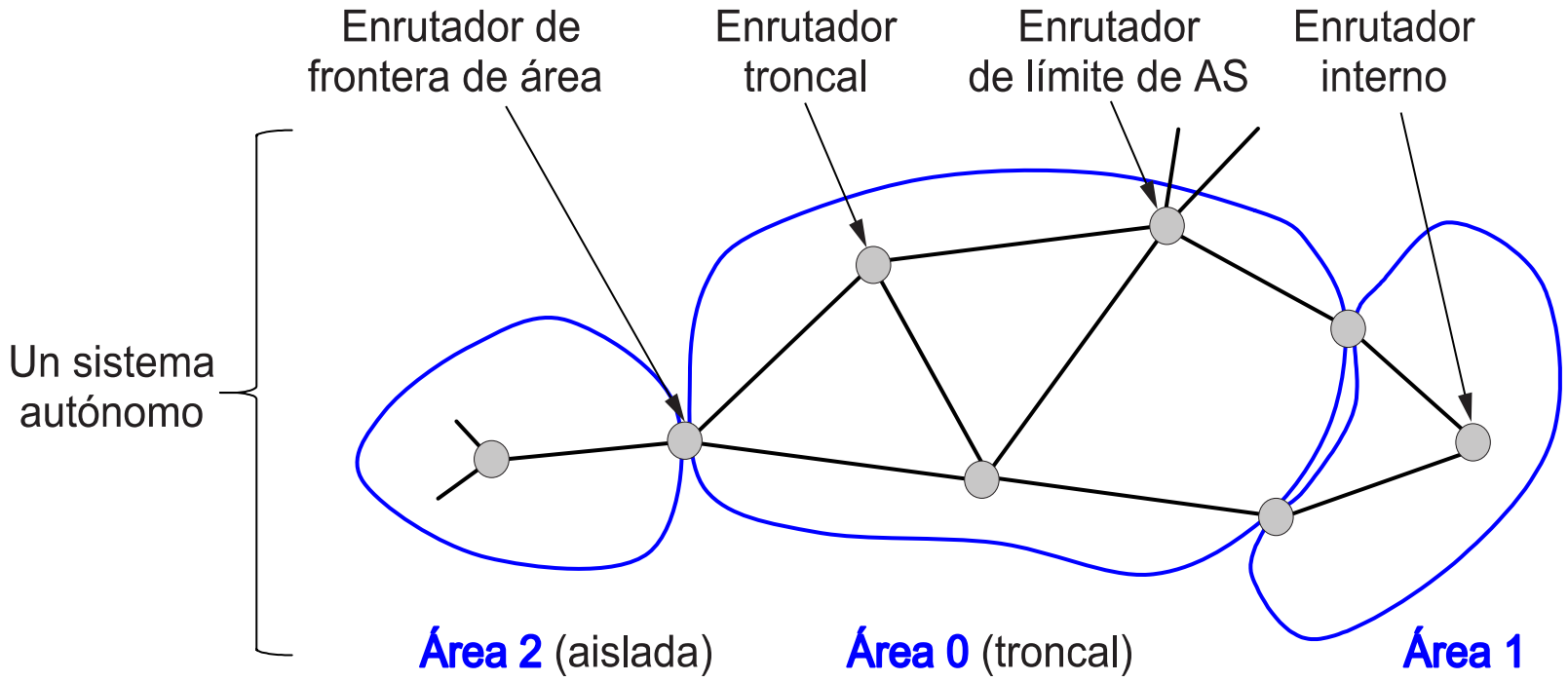


Figura obtenida de: A. Tanenbaum, D. Wetherall, "Redes de computadoras", Quinta edición (2012), pag. 407

Ejemplos de Protocolos de enrutamiento Intradominio: OSPF y áreas

- Mensajes empleados por OSPF (algunos):
  - **Hello**: Cuando un **enrutador se enciende y periódicamente**, envía un Hello y espera respuestas para conocer a sus vecinos.
  - **Link state update** (**LSA**)(actualización de estado del enlace): Se envían **periódicamente por inundación**. Contiene **estado del enrutador y costos de su base de datos**. Contiene número de secuencia.
  - **Link state ack**: Confirma la recepción de un Link state update.
  - **Link state request**: Solicitar información a otros enrutadores.

Ejemplos de Protocolos de enrutamiento Interdominio: BGP

(Border Gateway Protocol o Protocolo de Puerta de Enlace de Frontera)

- RFC 4271.
- **Dificultades** de los protocolos de enrutamiento **interdominio**: **Políticas**.
  - Un AS puede no querer transportar paquetes que se originan en otro AS y tienen como destino un tercer AS.
  - Un AS puede tener acuerdo de pares con otro AS, pero no con un tercero.
  - Un AS podría cobrar una tarifa a otros AS para transportar su tráfico (empresas portadoras).
  - Un AS puede preferir determinado AS y no un tercero para enviar sus paquetes por ser el tercero más costoso.

Ejemplos de Protocolos de enrutamiento Interdominio: BGP

(Border Gateway Protocol o Protocolo de Puerta de Enlace de Frontera)

- Algunos modelos:
  - **Servicio de tránsito o proveedor-cliente**: AS2, AS3 y AS4 (clientes) pueden pagar a un AS1 (proveedor) para que envíe sus paquetes a cualquier destino en Internet.
    - **AS1 debe anunciar todos los destinos alcanzables a sus clientes**.
    - **Los clientes deben anunciar sus destinos al proveedor**.
  - **Acuerdo** (o comunicación) **entre pares** (peering): Dos AS que intercambian mucho tráfico pueden acordar intercambiar paquetes **sin costo**.
    - **Deben enviarse anuncios de enrutamiento entre si**.
    - **No es transitiva**: si AS2 y AS3 tienen acuerdo, AS3 y AS4 tienen acuerdo, no significa que AS2 pueda enviar paquetes a AS4 a través de AS3 (AS3 anuncia sus destinos a AS4, pero no los destinos en AS2).
  - Algunos host (usualmente compañías) compran acceso a varios ISP.

Ejemplos de Protocolos de enrutamiento Interdominio: BGP

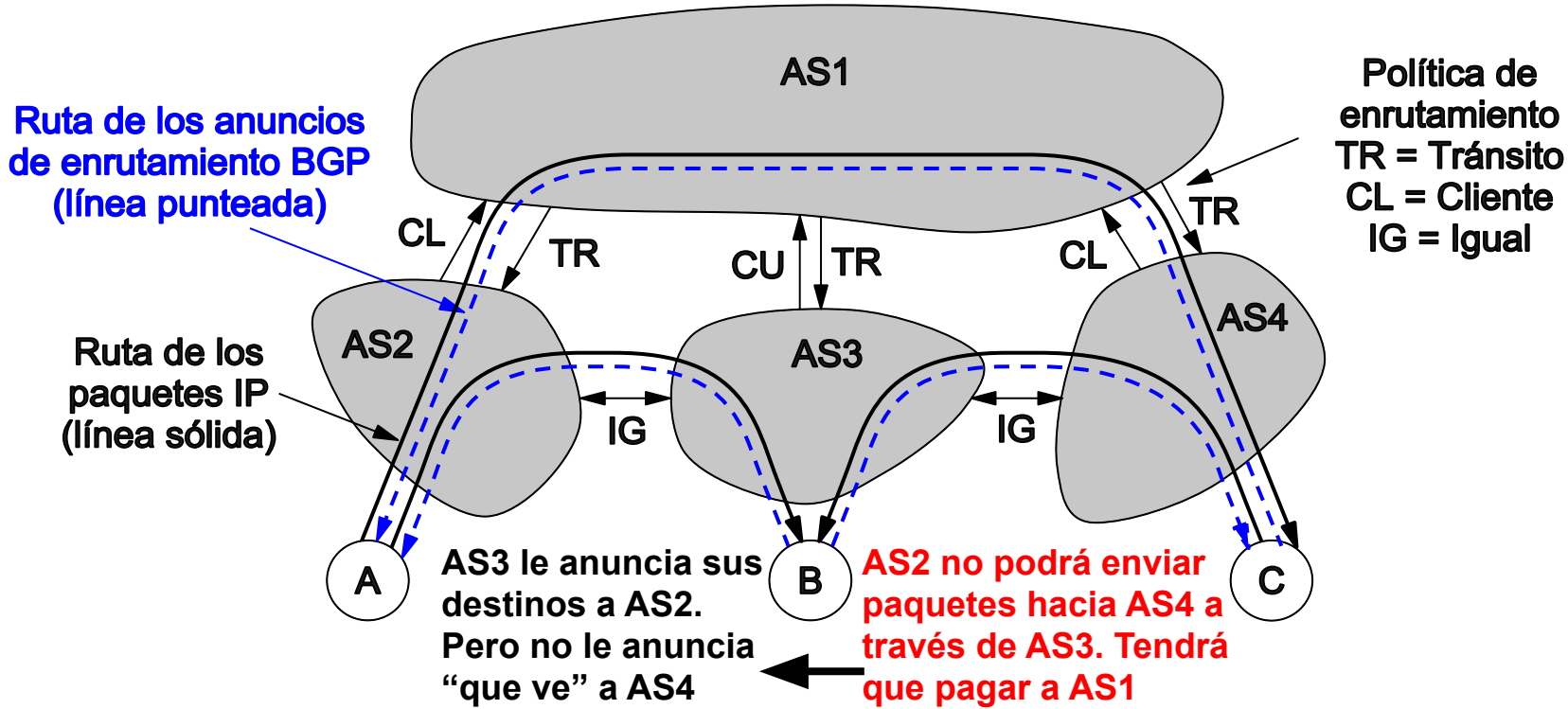


Figura obtenida de: A. Tanenbaum, D. Wetherall, "Redes de computadoras", Quinta edición (2012), pag. 409

Ejemplos de Protocolos de enrutamiento Interdominio: BGP

- Las **rutas** se definen **principalmente por políticas**, y en forma **secundaria por costos** (El costo es difícil calcularlo, depende de los protocolos intradominio, y algunos AS pueden no querer proporcionarlos).
- Protocolo basado en **vector de camino** (o de vector de distancia “modificado” o vector de ruta).
  - Los enrutadores BGP tienen información sobre los **destinos**, **costos a cada destino** y ***ruta***.
  - **Ruta** se da en forma de **próximo salto** (próximo router BGP o de frontera) y **secuencia de AS**.
  - Si un enrutador recibe un anuncio de ruta, añade su número de AS al mensaje y lo reenvía al siguiente AS.
    - Si el enrutador detecta que su número de AS ya está en la ruta, ha detectado un ciclo y descarta el mensaje.

Ejemplos de Protocolos de enrutamiento Interdominio: BGP
(continuación)

- Los pares de enrutadores BGP se comunican mediante TCP.
- Si un router detecta un cambio en su base de datos (nueva ruta, ruta ya no existente, etc.), difunde un mensaje de actualización.
- Un router que se comunica con otro router de otro AS no necesariamente debe implementar BGP. Otro router del mismo AS que implemente BGP puede informar que dicho router es el “proximo salto” para llegar a otro destino.

Ejemplos de Protocolos de enrutamiento Interdominio: BGP

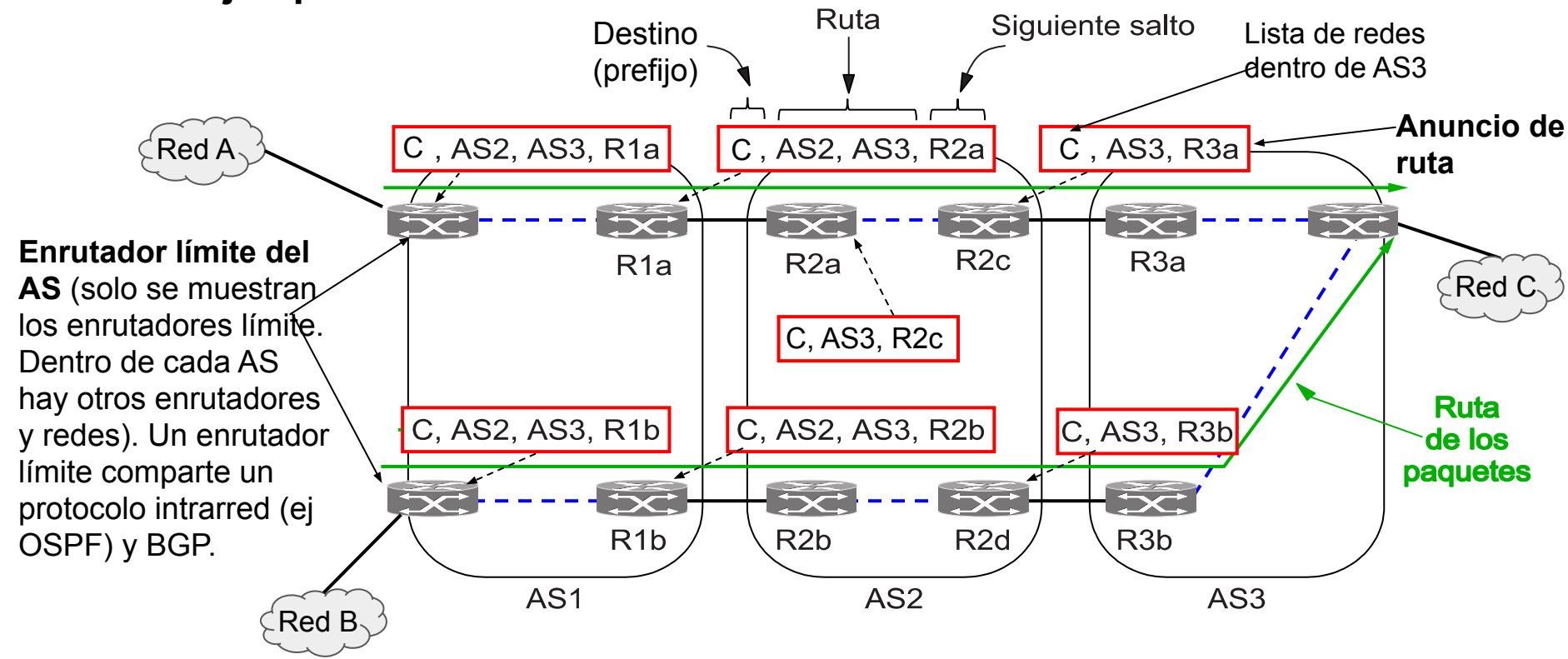


Figura obtenida de: A. Tanenbaum, D. Wetherall, "Redes de computadoras", Quinta edición (2012), pag. 413

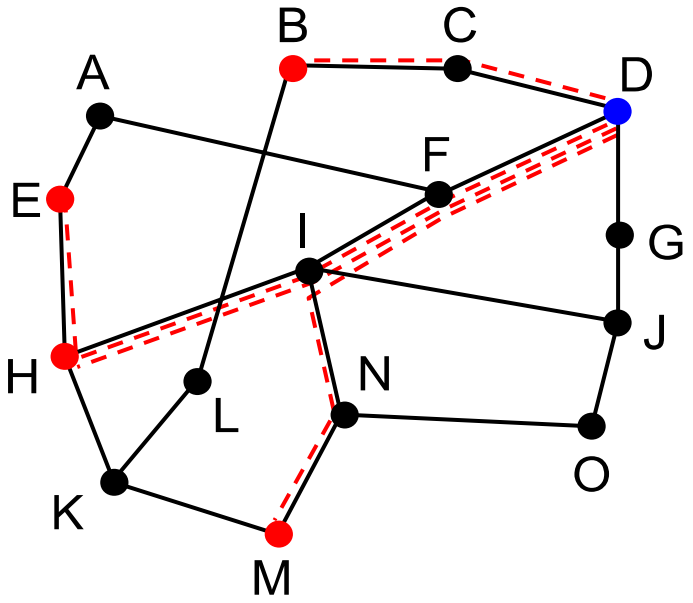
Ejemplos de Protocolos de enrutamiento Interdominio: BGP

- ¿Cómo pasa un anuncio de ruta **BGP** a través de las **rutas internas de un AS** (por ejemplo, un ISP)?
  - **No se emplea el protocolo intradominio**, se emplea **iBGP** (internal BGP).
  - Cada enrutador límite (o de salida del AS) conoce la información contenida por todos los demás enrutadores límites del AS, de manera que saben cómo salir del AS.
  - Cada AS elige sus estrategias o políticas para rutear paquetes de tránsito:
    - Usar rutas con acuerdo entre pares (son gratuitas).
    - Dar preferencia a los que paguen.
    - En caso de dos rutas “iguales”: menor costo dentro del AS (o enrutamiento de la papa caliente).

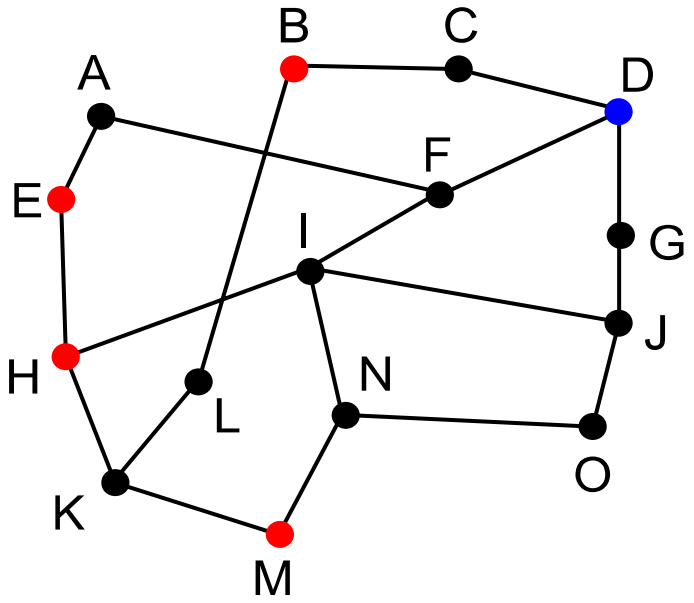
Enrutamiento por difusión (Broadcasting)

- Envío de mensajes a varias o todas las máquinas de una red (broadcast, multicast, anycast).
- Métodos (tanto para broadcast, multicast, anycast):
  - Enrutamiento multidestino: El paquete tiene múltiples destinos. El paquete solo se divide en dos copias cuando deben seguir diferentes rutas. Sobrecarga en enrutadores.
  - Inundación. Latencia grande.
  - Enviar una copia del paquete a cada destino.
  - Árboles de expansión.

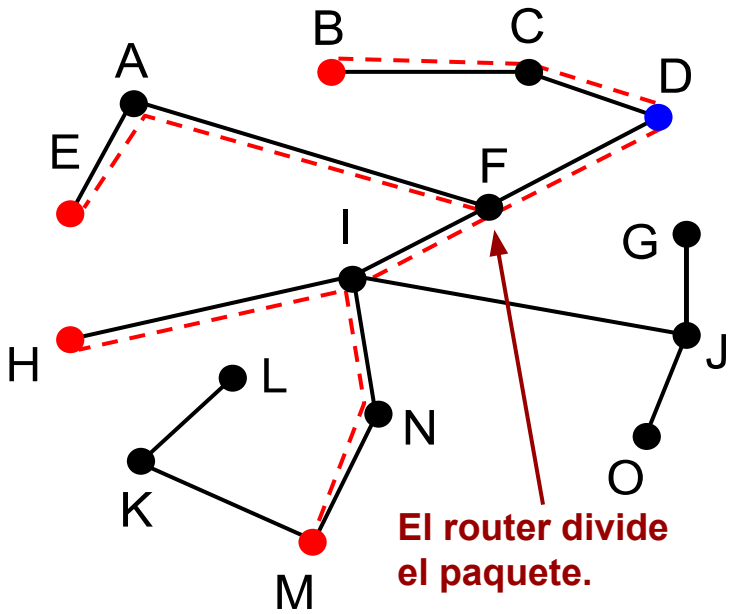
- Inundación
  - **No es necesario conocer la ubicación de los nodos finales.**
  - **Gran cantidad de tráfico innecesario.**
- Enviar una copia del paquete a cada destino.
  - **Es necesario conocer la ubicación de estos nodos.**
  - **Muchos paquetes con los mismos datos circulan por los mismos enlaces y routers.**
- Árboles de expansión (siguiente filmina).



Enrutamiento por difusión: Ejemplo de ruteo por árbol de expansión



Red completa



árbol de expansión

Figura basada en: A. Tanenbaum, D. Wetherall, "Redes de computadoras", Quinta edición (2012), pag. 327

Enrutamiento por difusión, ejemplos de uso

- **Broadcast**:
  - Envío de mensajes a todos los nodos de la red.
  - Ejemplo de aplicación:
    - Algoritmos de ruteo de Internet (BGP).
    - Algoritmos de estado de enlace (envío de paquetes de estado de enlace en protocolos como OSPF).
- **Multicast**:
  - Envío de mensajes a todos los nodos de un grupo.
  - Ejemplo de aplicación:
    - Enviar un flujo continuo de paquetes a un subgrupo de máquinas la red (no a toda la red).

Enrutamiento por difusión

- **Anycast**:
  - El paquete se entrega al miembro más cercano de un grupo.
  - Ejemplo aplicación: Cuando un grupo de nodos provee un **servicio**. Temperatura promedio por zonas, DNS.