

# **Redes de Computadores**

## **Tema 4 – Capa de red**

**Juan Segarra, Natalia Ayuso y Jesús Alastrauey**



**Departamento de  
Informática e Ingeniería  
de Sistemas  
Universidad Zaragoza**

- 1. Introducción**
- 2. Modelos en comut. paquetes**
- 3. Encaminadores**
- 4. Protocolo IP**
- 5. Direcciones IPv4**
- 6. IP versión 6**
- 7. Túneles**

## 1. Introducción

# 1 Introducción

¿Por qué la capa 2 no sirve al aumentar el tamaño de la red?

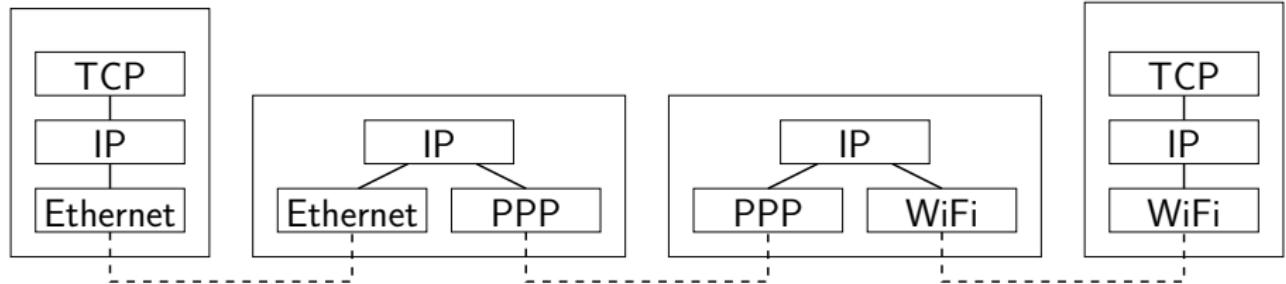
- No puede interconectar redes físicas distintas
- Mensajes de difusión total (broadcast) saturarían la red
- Tamaño excesivo de tablas de encaminamiento en conmutadores aprendices (requiere una entrada por cada equipo)
- Rutas no óptimas ([spanning tree](#))

# 1 Introducción (II)



Solución: pasar de red «física» (capa 2) a redes lógicas interconectadas → capa de red (capa 3)

- Abstira diferencias de funcionamiento de redes físicas
- Todas las redes deben tener un protocolo común para
  - Buscar caminos óptimos
  - Propagar mensajes hacia destino



Internet es un conjunto mundial de redes interconectadas con protocolos comunes (TCP/IP) y direccionamiento universal (IP)

## 2. Modelos en conmut. paquetes

- 2.1. Comutación por datagrama
- 2.2. Encaminamiento fuente
- 2.3. Comutación por circuito virtual
- 2.4. Combinación de modelos

## 2 Modelos en conmutación de paquetes



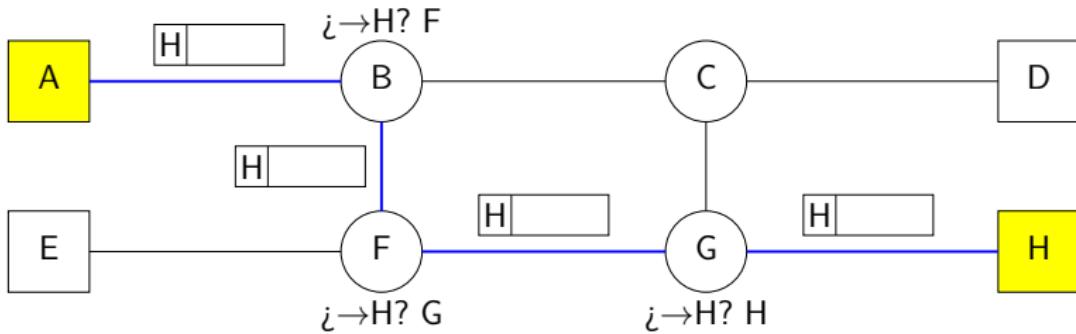
Dependiendo de la información usada para decidir el camino, existen varios modelos dentro de la conmutación de paquetes:

- **Comutación por datagrama**
  - En cada esquina preguntar a alguien por qué calle nos acercamos más al destino
- **Encaminamiento fuente**
  - Buscar la ruta y anotarla antes de iniciar el viaje para después seguirla
- **Comutación por circuito virtual**
  - Especificar un destino a una agencia e iniciar el viaje hasta destino con los trasbordos ya organizados
  - Combinaciones de los modelos anteriores

## 2.1 Comutación por datagrama



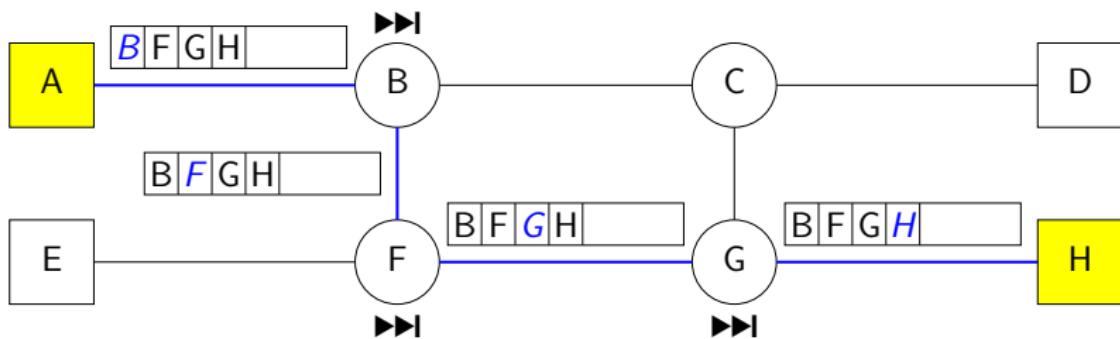
- Usado en Internet en el protocolo IP
- Cada encaminador reenvía en función de la dirección destino de cada paquete
  - Debe conocer el camino a ¡cualquier destino! [p. 68]
  - Mantiene una tabla de encaminamiento con esa info
  - Protocolos para generar dichas tablas
- Cada paquete es encaminado de forma independiente
  - No hay establecimiento del camino
  - Paquetes con igual origen-destino pueden ir por rutas distintas
  - Alta tolerancia a fallos



## 2.2 Encaminamiento fuente



- El propio paquete lleva la ruta a seguir
  - El emisor debe conocer la topología de la red
  - La información de ruta (campo «siguiente puerto») se modifica en cada encaminador (rotación, punteros, etc.)
  - La cabecera tiene un tamaño variable sin límite

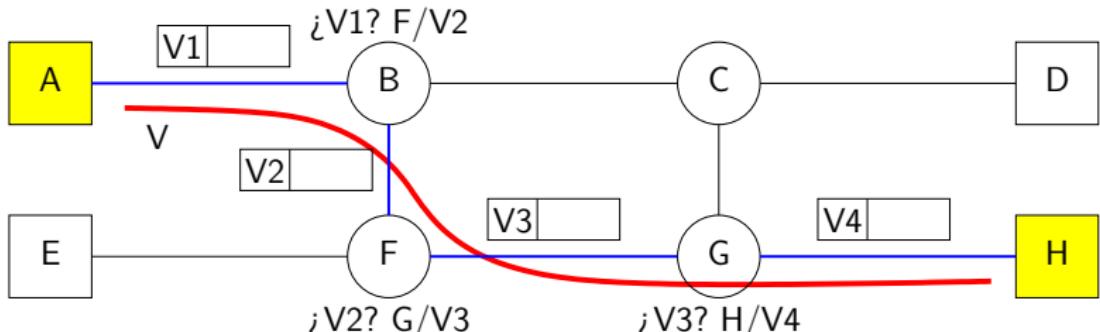


- El protocolo IP permite usar encaminamiento fuente añadiendo ciertas opciones en la cabecera de los paquetes

## 2.3 Comutación por circuito virtual



- Comutación de circuitos vía software
- Creación y destrucción explícita de circuitos mediante paquetes de control
- Paquetes de datos se enrutan por circuito creado
- Cada encaminador mantiene **tabla de circuitos virtuales**
- La creación puede aprovecharse para reservar recursos (QoS)  
**[Tema 6]**
- Si un encaminador o un enlace falla, el circuito también
- E.g. X.25, Frame relay, ATM



## 2.4 Combinación de modelos



### Multi Protocol Label Switching (MPLS)

- En conmutación por datagrama, los encaminadores solicitan que para determinados destinos los paquetes incorporen ciertas etiquetas
- Necesita protocolos encaminamiento IP para crear rutas
- Es capaz de llevar cualquier protocolo de la capa de red
- Situado conceptualmente entre capas 2 y 3

## 3. Encaminadores

- 3.1. Enrutamiento desde encaminador
- 3.2. Enrutamiento desde estación
- 3.3. Ejemplo tablas

### 3 Encaminadores



- Encaminador/*router*: conmutador de capa de red (capa 3)
  - Interconecta redes: inter-net 
  - Trabaja con direcciones lógicas (dir. IP)
  - Varios interfaces o puertos, **distintos tipos de redes**
  - Conoce ruta óptima hacia cada red destino
  - Sólo enruta hacia donde corresponde
  - Nunca enruta tramas broadcast (MAC: ff:ff:ff:ff:ff:ff)
- Cada puerto: dir. lógica (IP) y física (MAC)
- Ejemplo router ADSL: Ethernet + PPPoE (ADSL) + WiFi



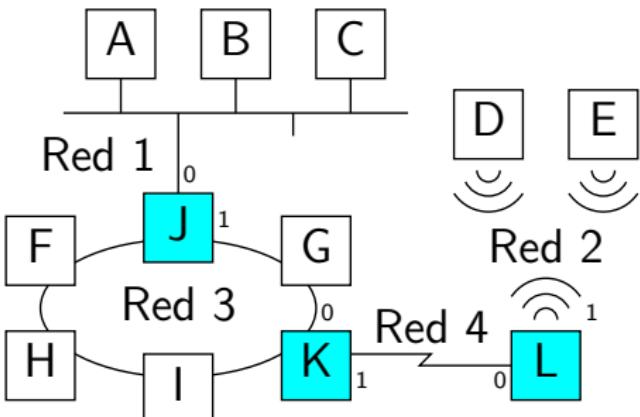
### 3.1 Enrutamiento desde encaminador



- Cada encaminador tiene una tabla con una lista de destinos y cómo acercarse/llegar a ellos
- Al recibir un paquete con dir. destino  $\textcolor{green}{x}$ , la busca en su tabla
  - Si está directamente conectado a la red destino  $\rightarrow$  enruta hacia el destino por interfaz correspondiente
  - Si no  $\rightarrow$  enruta hacia siguiente encaminador indicado en la tabla (sig. salto)

Tabla de reexpedición de  $\textcolor{blue}{K}$

Destino	Sig. salto	Interfaz
Red 1	J	0
Red 2	L	1
Red 3	—	0
Red 4	—	1



## 3.2 Enrutamiento desde estación



1474

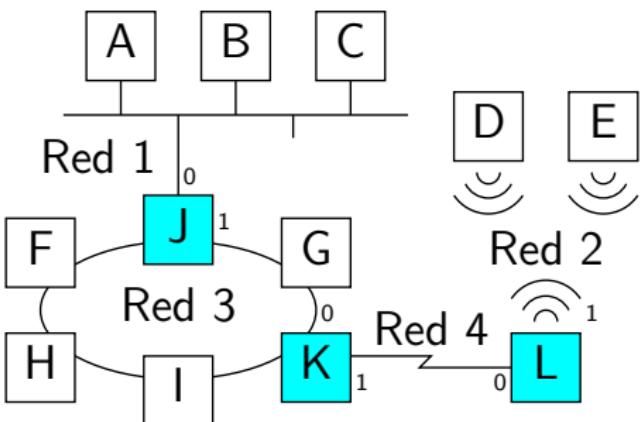


## 3.2 Enrutamiento desde estación (II)



- Cada estación tiene una tabla con su red y su **encaminador (gateway) por defecto**
- Para enviar un paquete hacia dir. destino:
  - Si está en la propia red → envía a estación destino
  - Si no → envía a encaminador por defecto
- ¡Mismo procedimiento que encaminador!

Tabla de reexpedición de A		
Destino	Sig. salto	Interfaz
Red 1	—	0
default	J	0



### 3.3 Ejemplo tablas



```
lab000:~$ /sbin/route  
Kernel IP routing table
```

Destination	Gateway	Genmask	Flags	Metric	Ref	Use	Iface
155.210.152.0	*	255.255.255.0	U	0	0	0	br0
192.168.122.0	*	255.255.255.0	U	0	0	0	virbr0
link-local	*	255.255.0.0	U	1003	0	0	br0
default	155.210.152.254	0.0.0.0	UG	0	0	0	br0

```
lab000:~$ ip route  
155.210.152.0/24 dev br0 proto kernel scope link src 155.210.152.177  
192.168.122.0/24 dev virbr0 proto kernel scope link src 192.168.122.1  
169.254.0.0/16 dev br0 scope link metric 1003  
default via 155.210.152.254 dev br0
```

## 4. Protocolo IP

4.1. Cabecera IPv4

4.2. Fragmentación y reensamblado

4.3. Protocolo de Mensajes de Control de Internet (ICMP)

4.4. Procesado de un paquete IP

# 4 Protocolo IP



- Internet Protocol (IP)
- Comunicación por datagrama [p. 8]
- Servicio **no fiable** (*unreliable*)
  - La red hace lo posible para la entrega de los paquetes, pero sin garantizarlo (*best effort*)
  - Pueden perderse paquetes
  - Pueden llegar desordenados respecto al envío
  - Se pueden entregar paquetes duplicados
  - El tiempo de entrega puede ser muy variable
- Actualmente conviven las versiones 4 (IPv4) y 6 (IPv6 [p. 56])

## 4.1 Cabecera IPv4

0	4	8	16	19	31
Ver	HLen	TOS	Longitud		
Ident		Flg	Offset		
TTL	Proto	Checksum			
Dir. origen					
Dir. destino					
Opciones (opcional, variable)		Relleno (variable)			

Versión: 4, desde comienzo de los años 80

Hlen: longitud de la cabecera, en palabras de 32 bits.

Usualmente 5 → 20 bytes, máximo 15 → 60 bytes

Type Of Service (TOS): calidad de servicio (QoS) [Tema 6]

Longitud: longitud total del paquete, en bytes

- 16 bits → paquetes de tamaño < 64 KiB

Identificador, Flags, Offset: campos para fragmentación [p. 22]

## 4.1 Cabecera IPv4 (II)



**Time-To-Live (TTL):** valor fijado por emisor y decrementado por cada encaminador atravesado. Paquete descartado por encaminador que decrementa TTL a 0.

**Protocolo:** tipo de datos que contiene el paquete (ICMP, IGMP, TCP, UDP). Usado para demultiplexación en la capa superior

**Checksum:** verificación de la cabecera, no de los datos

**Direcciones:** IP origen y destino, 32 bits cada una

**Opciones:**

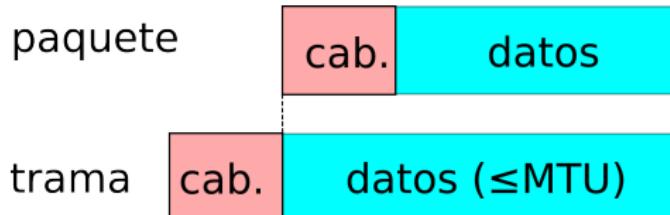
- Pedir que los encaminadores atravesados añadan información al paquete (su IP, la hora, etc.)
- Encaminamiento fuente: lista de encaminadores que pueden/deben ser atravesados
- Y otras

**Relleno:** para que los datos comiencen en posición múltiplo de 32 bits

## 4.2 Fragmentación y reensamblado



- **MTU**, *maximum transmission unit*
  - Tamaño máximo de los datos en una trama
  - Depende del protocolo de la capa de enlace
    - Ej. 1500 B en 802.3, 4464 B en 802.5, 7981 B en 802.11



## 4.2 Fragmentación y reensamblado (II)



- Un paquete generado en una red puede no caber en otra
- Estrategia IPv4:
  - Fragmentar si longitud paquete > MTU
  - Fragmenta el encaminador directamente conectado a la red que requiere tramas más pequeñas
  - Es posible fragmentar fragmentos
  - Reensambla la estación destino

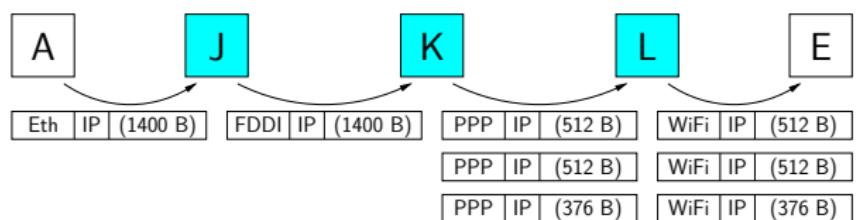


Fuente: [Cloudflare: Broken packets: IP fragmentation is flawed](#)

## 4.2.1 Ejemplo fragmentación

Ejemplo fragmentación:

- *Ident* (16 bits): identificador de paquete (igual en todos los fragmentos)
- *Flags* (3 b): reservado (0), prohibido fragmentar, siguen más fragmentos
- *Offset* (13 b): posición de los datos en el paquete original (unidades de 8 B)



1474

Inicio cabecera
Ident x000 Offset 0
Resto cabecera
1400 bytes datos

↓
Inicio cabecera
Ident x001 Offset 0
Resto cabecera
512 B datos (/8 = 64)

Inicio cabecera
Ident x001 Offset 64
Resto cabecera
512 bytes datos

Inicio cabecera
Ident x000 Offset 128
Resto cabecera
376 bytes datos

## 4.3 ICMP



- Internet Control Message Protocol, RFC 792
- Aunque IP sea no fiable, se notifican incidencias al emisor
- Encaminador o estación destino informan al emisor de un error, por ejemplo, paquete que no
- No se envían mensajes ICMP sobre mensajes ICMP
- Encapsulado dentro de un paquete IP
- Cabecera ICMP: 8 bytes

0	8	16	31
Tipo	Código	Checksum	
Resto cabecera			

**Tipo/Código:** tipo/subtipo de mensaje ICMP

**Checksum:** del mensaje ICMP (cabecera + datos)

**Resto cabecera:** depende del tipo de mensaje

## 4.3.1 Ejemplos ICMP



- Diagnóstico de red
  - ping: disponibilidad y latencia de un enlace
  - traceroute: ruta entre origen y destino
  - mtr: ruta, disponibilidad y latencia
- Se requiere fragmentar pero DF+

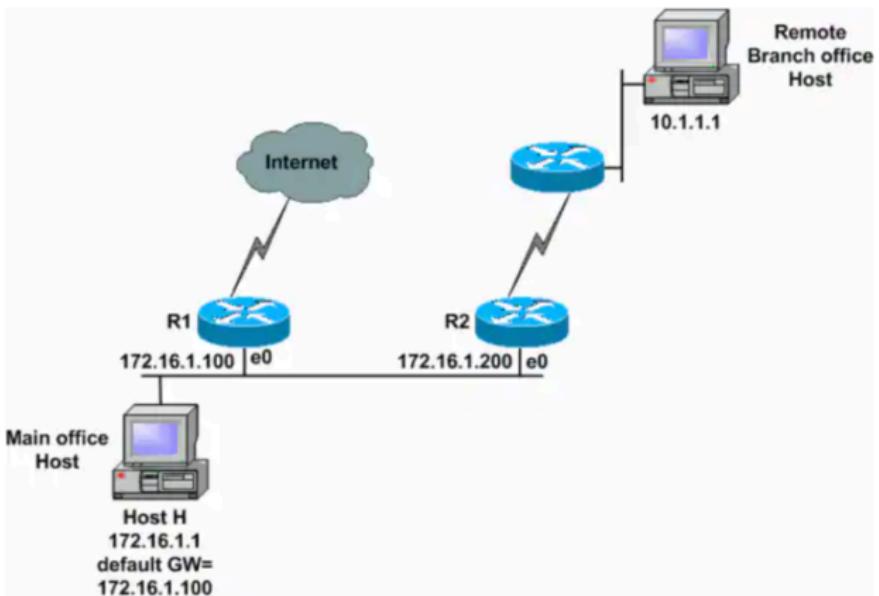


Fuente: [Cloudflare: Broken packets: IP fragmentation is flawed](#)

## 4.3.1 Ejemplos ICMP (II)



- Redirect: router notifica a estación que hay una ruta mejor hacia un destino



Fuente: Cisco: When Are ICMP Redirects Sent?

## 4.3.2 Ejercicio ping + fragmentación



✍ En una red 802.3, el MTU es de 1500 bytes. ¿Cuántos datos se pueden enviar en un paquete ICMP sin que haya fragmentación?

## 4.4 Procesado de un paquete IP



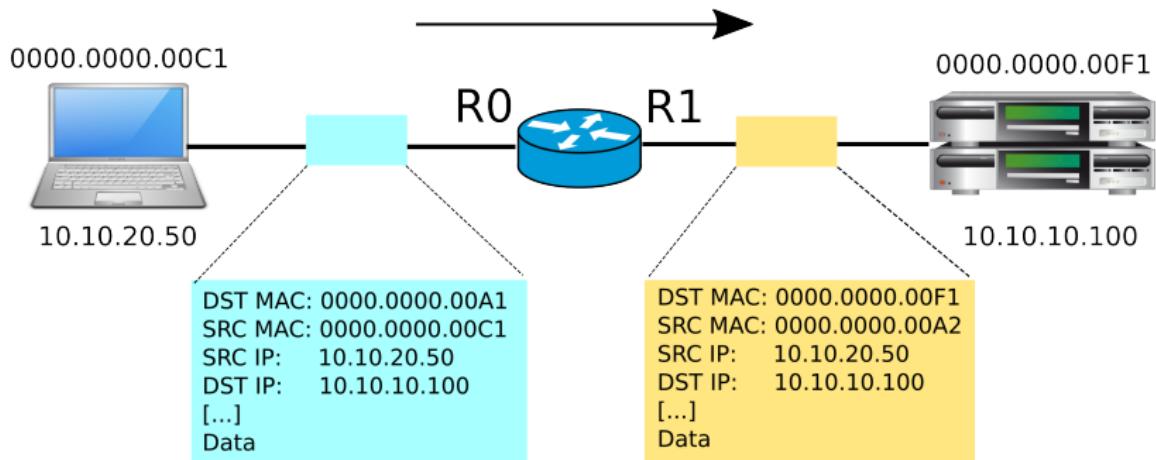
Al recibir una trama, el encaminador debe:

1. Validar trama (checksum/crc/etc.)
2. Validar cabecera IP (comprobar checksum)
3. Procesar opciones de la cabecera (si las hay)
4. Buscar dirección destino en tabla de encaminamiento
5. Decrementar TTL
6. Realizar fragmentación (si es necesario)
7. Calcular checksum (por cada fragmento)
8. Construir trama de capa inferior (cabecera, crc, etc.)
9. Transmitir a siguiente salto por interfaz correspondiente
10. Generar y enviar paquete ICMP (si es necesario)

El tiempo de procesado en cada salto **no es despreciable**

## 4.4 Procesado de un paquete IP (II)

- Ejemplo de procesado de paquete en router:



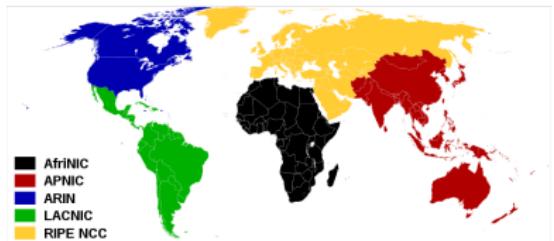
## 5. Direcciones IPv4

- 5.1. Clases de direcciones IPv4
- 5.2. Direcciones especiales
- 5.3. Correspondencia IP-MAC
- 5.4. Address Resolution Prot. (ARP)
- 5.5. Subredes
- 5.6. Superredes
- 5.7. ¿Cómo usar menos direcciones IP?
- 5.8. DHCP
- 5.9. NAT
- 5.10. Ejemplo cortafuegos + NAT
- 5.11. Multidestino

# 5 Direcciones IPv4



- Direcciones de 32 bits
- Globalmente únicas, excepto las privadas
- Jerárquicas: red + estación
- Asociadas a interfaces de red más que a estaciones
- Internet Assigned Numbers Authority (IANA) reparte bloques de direcciones IPv4 a Registros Regionales de Internet (RIR) bajo demanda → **todos ya repartidos**
  - AFRINIC: África
  - APNIC: Asia-Pacífico
  - ARIN: EE.UU.-Canadá
  - LACNIC: Lat. América-Caribe
  - RIPE: Europa-Asia occidental
- DNS traduce nombres a direcciones IP [Tema 7]



## 5.1 Clases de direcciones IPv4



- Notación de puntos:

- 10.3.2.4
- 128.96.33.81
- 192.12.69.77

A:	0	Red	Estación
B:	10	Red	Estación
C:	110	Red	Estación

- 5 formatos de dirección:

Clase	Prefijo	1 <sup>er</sup> byte	Nº redes	Nº dir./red	Uso
Clase A	0	0-127	128	16777216	Unicast
Clase B	10	128-191	16348	65536	Unicast
Clase C	110	192-223	2097152	256	Unicast
Clase D	1110	224-239			Multicast
Clase E	1111	240-255			Experimental

- Históricamente, a una organización se le asignaba un id. red de una clase, por ejemplo, 155.210.0.0
- Actualmente, las direcciones se consideran sin clase (CIDR), por ejemplo, puede asignarse el id. de red 193.10.20.192

## 5.1.1 Direcciones sin clase



- Ignora la distinción entre clases A, B y C y las fronteras entre identificadores de red y estación
- Notación dirección red: dirección red/número bits red
  - 155.210.0.0/16
  - 206.62.226.0/24
- El uso de direcciones sin clase requiere encaminamiento sin clase: [Classless Inter-Domain Routing, RFC 1519](#)
- Objetivos CIDR
  - Reducir tamaño tablas encaminamiento routers
  - Reducir agotamiento direcciones IPv4

## 5.2 Direcciones especiales

- Dirección de red: todo 0s en bits de estación. Ej: 128.96.0.0
- Difusión/broadcast: todo 1s en bits estación. Ej: 192.12.69.255
- 0.0.0.0: dirección no encaminable.
  - Significado dependiente del contexto, ej. ruta por defecto
- 127.0.0.0/8: bucle (*loopback*), la propia estación
  - Ejemplo: 127.0.0.1
  - [RFC 1122](#), Section 3.2.1.3
- 10.0.0.0/8, 172.16.0.0/12, 192.168.0.0/16: privadas
  - No únicas globalmente → no sirven como dirección destino a nivel global (Internet)
  - Válidas a nivel local → redes privadas
  - Para conectarse a Internet se necesita traducción de direcciones privadas (NAT) [\[p. 49\]](#)
  - [RFC 1918](#)

## 5.2 Direcciones especiales (II)



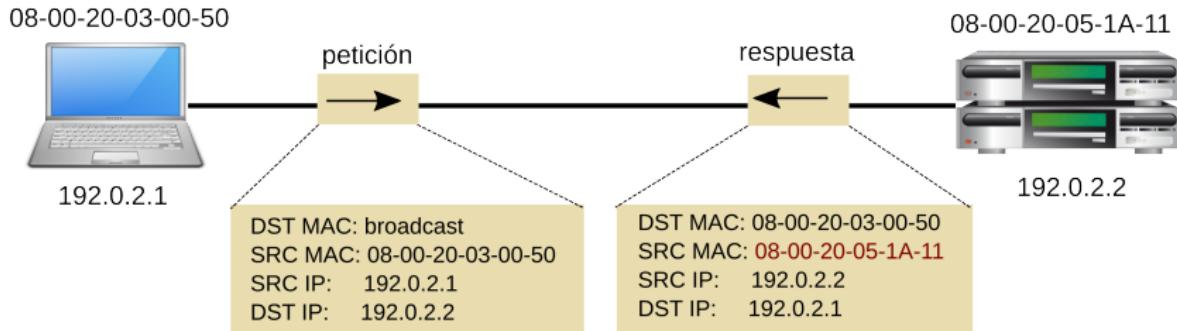
- 169.254.0.0/16: link-local
  - Dirección que se autoasigna una estación cuando no ha podido obtener otra mediante configuración manual (fichero) o automática (DHCP)
  - Válida únicamente para comunicación local
  - Bits de estación: valores aleatorios para mitigar conflictos
  - RFC 3927
- Paquetes con destino difusión/privadas/link-local **no salen de la red local**

## 5.3 Correspondencia IP-MAC



- La capa de red funciona con direcciones IP
- La capa de enlace funciona con identificadores MAC
- ¿Cuándo se necesita asociar ambas?
  - Estación necesita el id. MAC de su encaminador por defecto y de las estaciones de la misma red
  - Encaminador necesita el id. MAC del siguiente salto
  - Encaminador final necesita el id. MAC de la estación destino
- ¿Cómo se asocian ambas direcciones?
  - Codificar id. MAC dentro de dir. red (e.g. EUI-64)
    - Usado en IPv6
    - No sirve en IPv4 porque los identificadores MAC tienen un tamaño mayor que las direcciones IPv4
  - Protocolo basado en tablas, e.g. ARP
    - Usado en IPv4

## 5.4 Address Resolution Prot. (ARP)



- Mensajes de petición y respuesta sobre capa de enlace
  1. Origen consulta @IP destino en su tabla ARP.  
Si no está, petición ARP por difusión
  2. Estaciones que reciben petición actualizan su tabla con la correspondencia IP-MAC origen
  3. Destino responde con su id. MAC
  4. Origen actualiza su tabla con IP-MAC destino

## 5.4 Address Resolution Prot. (ARP) (II)



- Entradas de tabla ARP:
  - No se añaden por ningún otro procedimiento
  - Son eliminadas tras un tiempo sin usarse
- Ejemplo consulta tablas ARP mediante orden arp:

```
lab000:~$ ping camposancos.cps.unizar.es
```

```
^C
```

```
lab000:~$ arp
```

Address	HWtype	HWaddress	Flags	Mask	Iface
hendrix02.cps.unizar.es	ether	00:14:4f:ec:4d:54	C		br0
155.210.152.254	ether	f0:f7:55:f3:c7:c1	C		br0
camposancos.cps.unizar.	ether	00:1c:c0:ef:8d:8d	C		br0



## 5.4.1 Ejemplo petición-respuesta ARP

No.	Time	Source	Destination	Protocol	Length	Info
4338	158.72	IntelCor_8b:f9	Broadcast	ARP	42	who has 192.168.0.1? Tell 192.168.0.13
4339	158.72	1 CiscoSvp_f4:49	IntelCor_8b	ARP	42	192.168.0.1 is at 18:59:33:f4:49:1f

Frame 4338: 42 bytes on wire (336 bits), 42 bytes captured (336 bits) on interface 0  
Ethernet II, Src: Intelcor\_8b:f9:de (68:5d:43:8b:f9:de), Dst: Broadcast (ff:ff:ff:ff:ff:ff)  
Destination: Broadcast (ff:ff:ff:ff:ff:ff)  
Source: Intelcor\_8b:f9:de (68:5d:43:8b:f9:de)  
Type: ARP (0x0806)  
Address Resolution Protocol (request)  
Hardware type: Ethernet (1)  
Protocol type: IP (0x0800)  
Hardware size: 6  
Protocol size: 4  
Opcode: request (1)  
Sender MAC address: Intelcor\_8b:f9:de (68:5d:43:8b:f9:de)  
Sender IP address: 192.168.0.13 (192.168.0.13)  
Target MAC address: 00:00:00\_00:00:00 (00:00:00:00:00:00)  
Target IP address: 192.168.0.1 (192.168.0.1)

Frame 4339: 42 bytes on wire (336 bits), 42 bytes captured (336 bits) on interface 0  
Ethernet II, Src: CiscoSvp\_f4:49:1f (18:59:33:f4:49:1f), Dst: Intelcor\_8b:f9:de (68:5d:43:8b:f9:de)  
Destination: Intelcor\_8b:f9:de (68:5d:43:8b:f9:de)  
Source: CiscoSvp\_f4:49:1f (18:59:33:f4:49:1f)  
Type: ARP (0x0806)  
Address Resolution Protocol (reply)  
Hardware type: Ethernet (1)  
Protocol type: IP (0x0800)  
Hardware size: 6  
Protocol size: 4  
Opcode: reply (2)  
Sender MAC address: CiscoSvp\_f4:49:1f (18:59:33:f4:49:1f)  
Sender IP address: 192.168.0.1 (192.168.0.1)  
Target MAC address: Intelcor\_8b:f9:de (68:5d:43:8b:f9:de)  
Target IP address: 192.168.0.13 (192.168.0.13)

The diagram illustrates the flow of ARP requests and responses between hosts. Hosts a, b, c, and d send a broadcast ARP request (labeled 1-4). Host f sends a response (labeled 5-8).

- Host a: ARP Request (labeled 1)
- Host b: ARP Request (labeled 2)
- Host c: ARP Request (labeled 3)
- Host d: ARP Request (labeled 4)
- Host f: ARP Response (labeled 5)
- Host g: ARP Response (labeled 6)
- Host h: ARP Response (labeled 7)
- Host i: ARP Response (labeled 8)

Fuente: Sharetechnote.com: IP Network - ARP

## 5.5 Subredes



- Direcciones unicast posibles en una red:  $2^{n^o}$  bits estación – 2
- **Problema:** redes muy grandes
  - Broadcast excesivo, colisiones, retardos, pérdida de tramas
- **Solución:** añadir nivel de jerarquía red-**subred**-estación
  - Se usan **bits de estación** para identificar subredes
  - Cada subred necesita @ red, broadcast y encaminador
  - Fuera de una red no hay conciencia de sus subredes  
(los encaminadores externos propagan hasta la red)
- Gestiónadas mediante **máscaras de subred**
  - Soportan 1s no contiguos pero en la práctica no se permiten
- Gestiónadas mediante **máscaras CIDR** [p. 45]
  - NO se permiten 1s no contiguos en la máscara

## 5.5.1 Máscara de subred

- Información total & Máscara de bits = Información útil



&



=

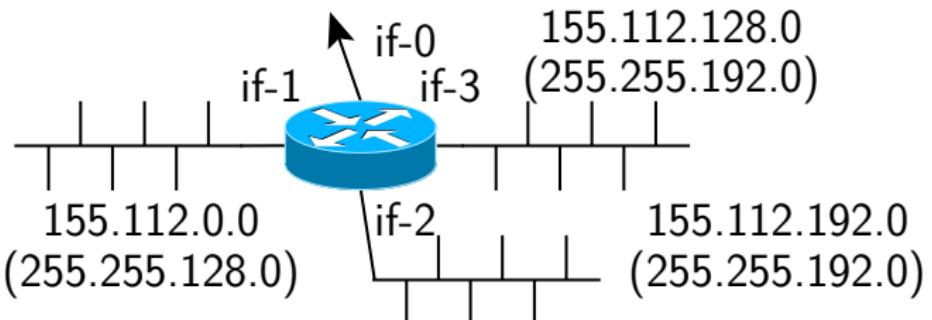


- Dirección IP & Máscara de subred = Dirección de subred
  - Red 155.210.0.0/16

$\underbrace{\text{bytes id. red}}$ IP 155.210.153.238 - 10011011.11010010.10011001.11101110	$\underbrace{\text{bits id. red}}$ Mask 255.255.248.0 - 11111111.11111111.11111000.00000000	$\underbrace{\text{bits id. estación}}$ Sub 155.210.152.0 - 10011011.11010010.10011000.00000000
		bits subred      bits estación

- Subred 155.210.152.0/255.255.248.0 = 155.210.152.0/21

## 5.5.2 Ejemplo subredes



Destino	Máscara subred	Interfaz	(Destinos)
155.112.0.0	255.255.128.0	If-1	155.112.0xxxxxx.X
155.112.128.0	255.255.192.0	If-3	155.112.10xxxxxx.X
155.112.192.0	255.255.192.0	If-2	155.112.11xxxxxx.X
default	—	if-0	



Resolver con notación CIDR

## 5.5.3 Ejercicio subredes



Para la red 155.210.0.0/16, ¿son válidas estas máscaras?

- a) 255.239.248.0 (11111111.111**0**1111.1111000.00000000)
- b) 255.255.216.0 (11111111.11111111.**110**1000.00000000)
- c) 255.255.255.0 (11111111.11111111.11111111.00000000)

## 5.6 Superredes

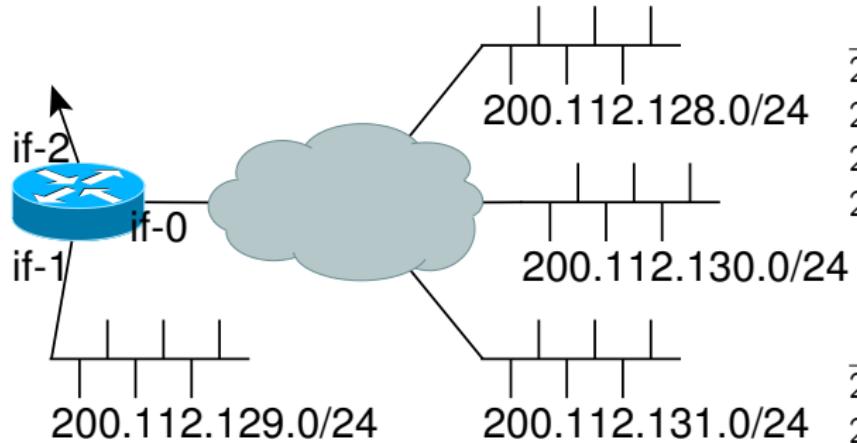


- RFC 4632
- Los encaminadores «necesitan» una entrada en la tabla por cada red destino, y hay más de 2 millones de redes
- Problema: con tantas entradas las tablas no son eficientes
- Objetivo: juntar varias redes contiguas en una única entrada en tabla
  - Redes 192.4.8.0/24 - 192.4.15.0/24 → 192.4.8.0/21

192.4.00001000.0  
192.4.00001001.0  
192.4.00001010.0  
...  
192.4.00001111.0

192.4.8.0/21

## 5.6.1 Ejemplo CIDR



Destino	Interfaz
200.112.128.0/24	if-0
200.112.129.0/24	if-1
200.112.130.0/24	if-0
200.112.131.0/24	if-0
default	if-2

Destino	Interfaz
200.112.129.0/24	if-1
200.112.128.0/22	if-0
default	if-2

- if-0: 200.112.128.0, 130.0, 131.0 ( $100000\frac{0}{1}\frac{0}{1}$ )
  - 22 bits de red comunes: 200.112.100000xx.xxxxxxxx
  - Prefijo común: 200.112.**128.0/22**
  - Redes 128, 130 y 131 se agrupan en una única entrada
- if-1: 200.112.129.0 ( $10000001$ ) más prioritaria en tabla por estar incluida en 200.112.128.0/22

## 5.7 ¿Cómo usar menos direcciones IP?



- Problema: agotamiento de direcciones IPv4 unicast
- Servidores necesitan estar localizables en todo momento para recibir peticiones
  - IP **estática** o fija: dirección IP que no cambia con el tiempo
- Clientes no necesitan estar localizables
  - IP **estática**, si hay para todos
  - IP **dinámica**: dirección IP que puede cambiar con el tiempo
- Asignación dinámica desde un servidor (DHCP, PPP)
  - Al apagar el equipo, otro puede usar su IP
  - Al reiniciar el equipo, se puede usar una IP distinta
  - Una dir. IP nunca es usada por varios equipos a la vez
- Compartir direcciones IP unicast (NAT)
  - Una dirección IP es usada por varios equipos a la vez

## 5.8 DHCP



- Dynamic Host Configuration Protocol
- Un servidor DHCP proporciona información para que los equipos de su LAN configuren la red:
  - Dirección IP: no necesariamente la misma siempre
  - Máscara de subred
  - Encaminador por defecto
  - Servidor de nombres [Tema 7]
  - etc.
- Pasos de configuración:
  1. Al arrancar, el equipo busca un servidor DHCP:  
IPsrc: 0.0.0.0, IPdest: 255.255.255.255, UDP: 67
  2. El servidor responde anunciando su presencia:  
IPdest: 255.255.255.255
  3. El equipo pide datos al servidor
  4. El servidor proporciona los datos

## 5.9 Network Address Translation



1. Uso de @IP privadas en equipos locales
  - 10.X.X.X, 172.0001xxxx.X.X, 192.168.X.X
  - Válidas localmente pero NO globalmente
2. Enmascarar tras @IP válida con encaminador NAT
  - Network Address (and port) Translator
  - El encaminador tiene una @IP unicast válida
  - Salida: NAT sustituye @IP origen por la propia
  - Entrada: NAT deshace la sustitución: deduce a quién entregar el paquete
  - Solución arquitectónicamente mala
    - Modifica el funcionamiento básico de la capa de red (el NAT cambia direcciones en paquetes)
    - Implica restricciones de funcionalidad
  - Carrier-grade NAT / Large-scale NAT: NAT dentro de NAT
    - RFC 6598: IANA-Reserved IPv4 Prefix for Shared Address Space asigna bloque IPv4 100.64.0.0/10 para CGN

## 5.9 Network Address Translation (II)

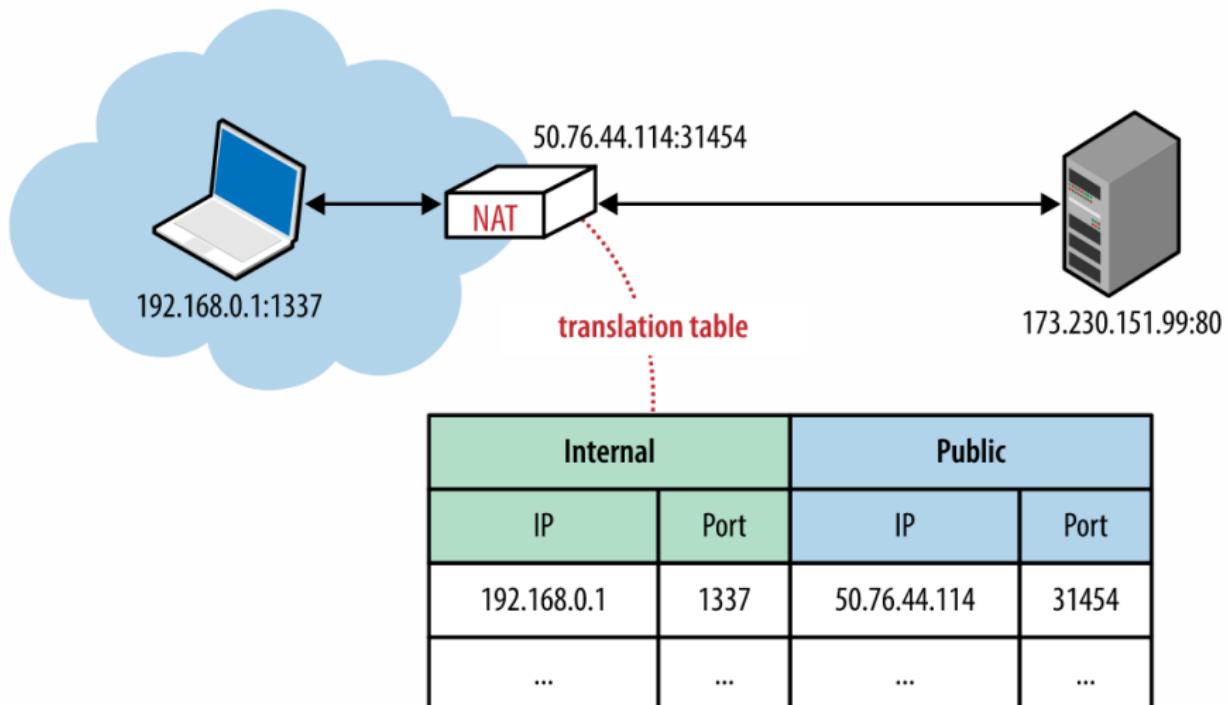
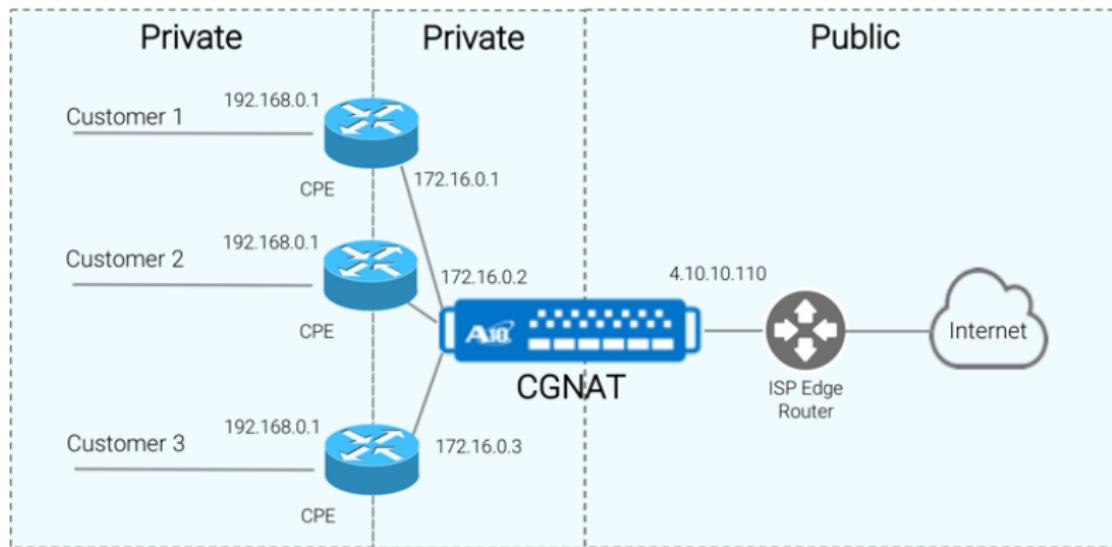


Imagen: [High Performance Browser Networking: Building Blocks of UDP](#)

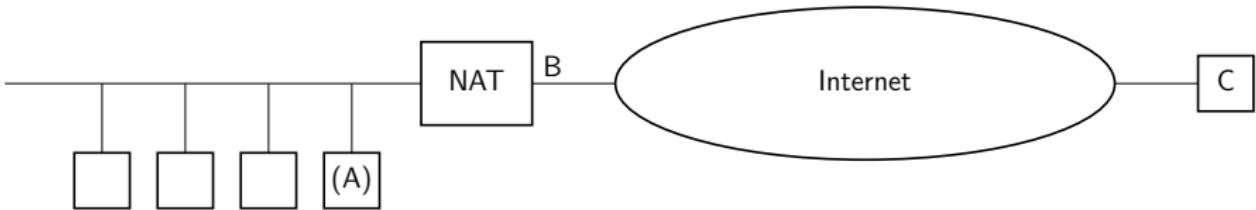
## 5.9 Network Address Translation (III)



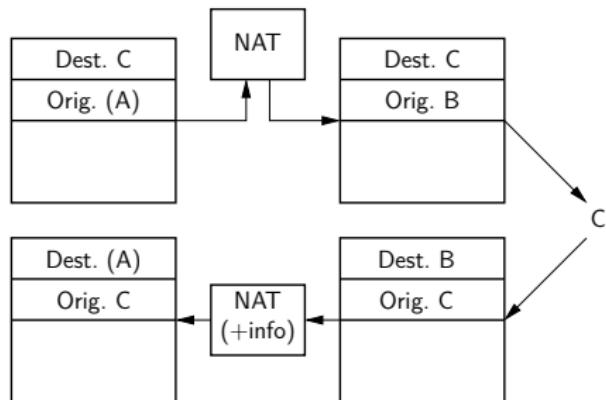
### Ejemplo NAT444



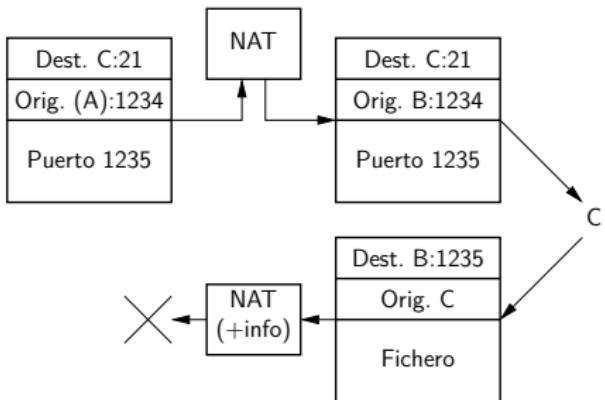
## 5.9 Network Address Translation (IV)



Ejemplo «funcional»



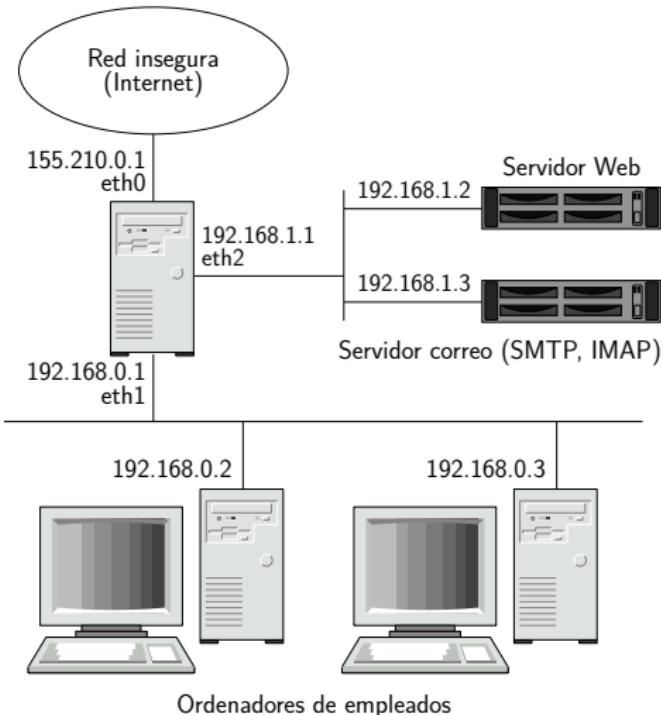
Ejemplo FTP «problemático»



## 5.10 Ejemplo cortafuegos + NAT



Ej. de manipulación de paquetes:



- Redirigir paquetes SMTP e IMAP al servidor de correo (NAT)
- Redirigir paquetes web, con un límite de 1 por segundo y ráfagas de 10 como máximo, al servidor web (NAT+filtro)
- Descartar todo el tráfico con protocolo distinto de TCP (filtro)
- Hacer de NAT a los ordenadores de empleados
- Inhabilitar el uso de la red en la propia máquina (filtro)
- Descartar conexiones desde 192.168.0.3 a puertos 6667 del exterior (filtro)



## 5.11 Multidestino

1474

- Unicast múltiple es ineficiente
- Dirección IP asociada a un conjunto de equipos
  - IPv4: 224-239.X.X.X
  - IPv6: prefijo multicast FF00::/8
  - E.g. *Discovery Max* en Movistar+: <rtp://239.0.0.32:8208>
- El emisor envía un paquete al grupo y la red se encarga de que llegue a **todos** los integrantes del grupo
- Necesita soporte de multidestino en encaminadores
- Estaciones se unen a un grupo multidestino mediante protocolo IGMP (Internet Group Management Protocol, IPv4) y MLD (Multicast Listener Discovery, IPv6)
- Protocolos de búsqueda de caminos multidestino:
  - Algoritmos para optimizar rutas [p. 68]
  - Multidestino independiente de protocolo (PIM): funciona sobre cualquier protocolo de encaminamiento unidestino

## 6. IP versión 6

- 6.1. Cabecera IPv6
- 6.2. Direcciones IPv6
- 6.3. Ejercicio de direcciones

## 6 IP versión 6

---



- RFC 8200: Internet Protocol, Version 6 (IPv6) Specification
- Propuesta inicial en 1991 (IETF IPng: IP Next Generation)
- Nuevo protocolo → requiere actualizar encaminadores
- Intención de transición progresiva, que se ha ido retrasando «forzando» IPv4
- Direcciones de 128 bits sin clases y jerárquicas (red + interfaz)
- Al no haber NAT es posible tener seguridad en capa de red
  - Implementación obligatoria de IPsec
- No hay fragmentación (ICMP notifica tamaño demasiado grande)
- Estadísticas adopción:  
<https://www.google.com/intl/en/ipv6/statistics.html>

## 6.1 Cabecera IPv6

Cabecera de tamaño fijo (40 bytes):

1	4	12	32	48	56	64
Ver.	TrafClas	Flow Label	Payload Length	NextHdr	HopLimit	
Dirección origen						
Dirección destino						

- No hay checksum ni campos fragmentación ni opciones
- Campos ligeramente modificados: TOS → TrafficClass, Length → PayloadLength, Protocol → NextHeader, TTL → HopLimit
- Nuevo campo *FlowLabel*
- Opciones → Cabeceras de extensión (NextHeader)

## 6.1 Cabecera IPv6 (II)



Cabeceras de extensión (ejemplo):

IPv6 Header NextHeader= Security	Security Header NextHeader= Fragmentation	Frag. Header NextHeader= TCP	TCP Header	DATA
--	---	------------------------------------	------------	------

- Enlazadas con campos NextHeader hasta capa superior
- Procesadas por estación destino  
(excepto extensión *Hop-by-Hop*)
- Permite añadir funcionalidad sin cambiar protocolo y sin modificar encaminadores
- E.g. salto a salto, fragmentación, autentificación, encapsulado de seguridad de la carga útil

## 6.2 Direcciones IPv6



- RFC 4291
- Direcciones de 128 bits
- 3 tipos:
  - Unicast: interfaz único
  - Anycast: conjunto de interfaces
  - Multicast: conjunto de interfaces
- Paquete enviado a dirección **anycast/multicast** se envía al **interfaz más cercano/todos los interfaces** del conjunto
- No hay direcciones broadcast
- Representación:
  - 8 números de 16 bits en formato hexadecimal
    - 2001:0DB8:0000:0000:0000:A456:0024
  - 0 contiguos y a la izquierda se pueden omitir
    - 2001:DB8::A456:24
    - ":" solamente puede aparecer una vez

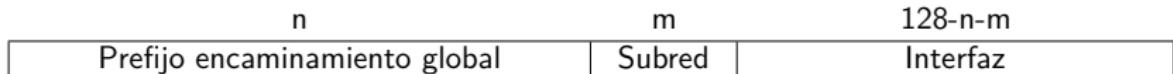
## 6.2 Direcciones IPv6 (II)



- Tipos de direcciones:

Tipo	Prefijo	Notación IPv6
Sin especificar	00...0 (128 bits)	::/128
Bucle local ( <i>Loopback</i> )	00...1 (128 bits)	::1/128
Multicast	11111111	FF00::/8
Link-Local unicast	1111111010	FE80::/10
Global Unicast	resto	

- Bloque de direcciones global unicast:



- Identificador de interfaz autoconfigurado a partir de MAC, asignado mediante DHCP, aleatorio (privacidad) o establecido manualmente

## 6.3 Ejercicio de direcciones



Busca la configuración de los equipos de tu casa. Para cada uno de ellos (excepto el encaminador):

- ¿Cuál es su dirección IP? ¿Tiene IPv4, IPv6 o ambas?
- ¿Es pública o privada?
- ¿Está en alguna subred?
- ¿Está configurado manualmente o vía DHCP?

Para el encaminador:

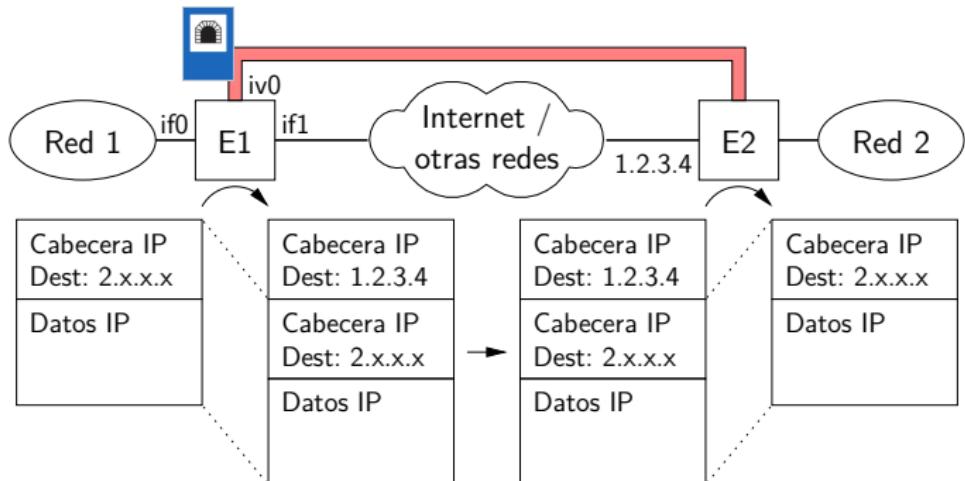
- ¿Qué dirección IP tiene cada uno de sus interfaces?
- ¿Tiene IPv4, IPv6 o ambas?
- ¿Cuáles son públicas?
- ¿Es también un servidor DHCP?
- ¿Es también un NAT?

## 7. Túneles

### 7.1. Ejemplo VPN

# 7 Túneles

- Encapsulación de paquetes de la capa de red dentro de paquetes de la capa de red



- Tabla encaminamiento E1:

	Destino	Interfaz
Red 1		Interfaz 0
Red 2		Interfaz virtual 0
Por defecto		Interfaz 1

- Túnel+cifrado: VPN (Virtual Private Network)

# 7.1 Ejemplo VPN



1474

<https://remoto.unizar.es>

The screenshot shows the SSL VPN login interface for the University of Zaragoza. At the top left is the university's logo and name. To the right is a colorful circular graphic representing the United Nations Sustainable Development Goals (ODS). The main title "SSL VPN Universidad de Zaragoza" is centered above a download button for the FortiClient software. Below this is a "Bookmarks" section containing four entries: "UNIZAR" (with a globe icon), "SICUZ" (with a globe icon), "ASISTENCIA" (with a globe icon), and "PSFunizar0" (with a document icon).

SSL VPN Universidad de Zaragoza

Download FortiClient ▾

Bookmarks

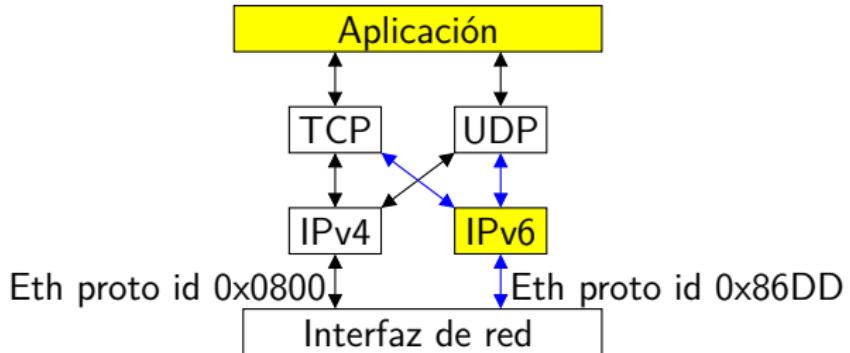
UNIZAR SICUZ ASISTENCIA PSFunizar0

## 8. Transición IPv4 - IPv6

# 8 Transición IPv4 → IPv6



- Imposible cambio instantáneo IPv4 a IPv6
- Despliegue IPv6 incremental, conviviendo ambas versiones
- Operación en modo doble pila de protocolos
  - Estaciones tienen IPv4 e IPv6
  - Misma solución que para redes no-IP
- Túneles [p. 63] / MPLS [p. 11]
  - Enviar paquetes IPv6 encapsulados en IPv4 o viceversa
  - Permite comunicar redes IPv6 a través de caminos no-IPv6
  - E.g. Hurricane Electric (<http://tunnelbroker.net/>)



## 9. Protocolos de encaminamiento

- 9.1. Sistemas autónomos
- 9.2. Protocolo encaminamiento interior
- 9.3. Protocolo encaminamiento exterior
- 9.4. Algoritmos de encaminamiento
- 9.5. Estado de enlace
- 9.6. Ejemplo búsqueda de caminos



## 9 Protocolos de encaminamiento

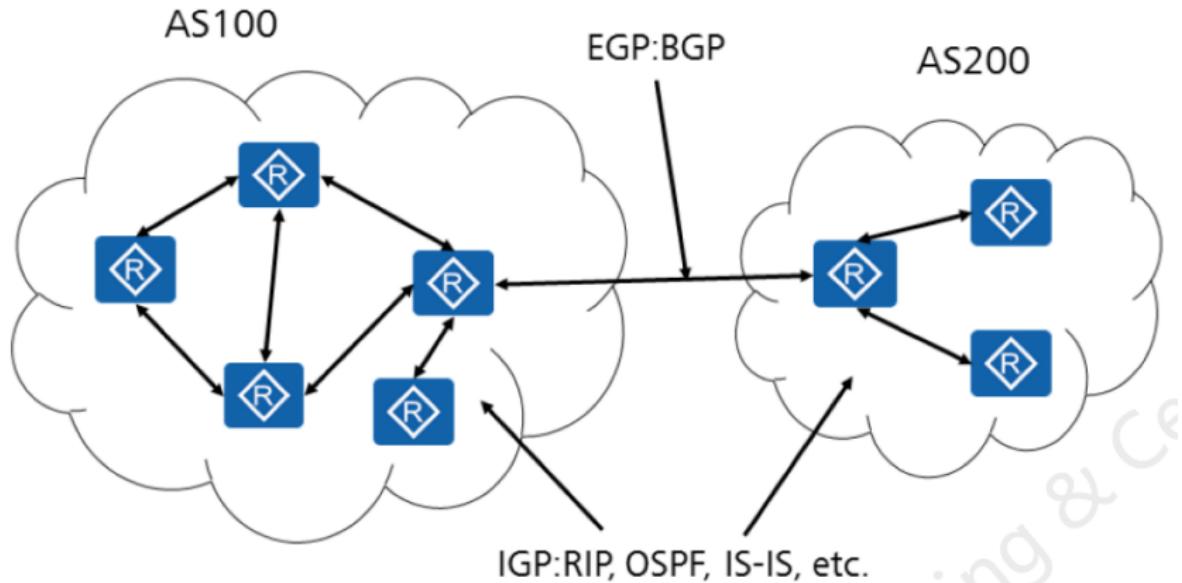
1474

- Encaminadores reciben paquetes y los reenvían hacia el destino (*forwarding*)
- Decisiones basadas en
  - Conocimiento topología de la red
  - Condiciones red (caídas, retardos ...)
- Encaminadores intercambian este tipo de información mediante protocolos de encaminamiento (*routing*)
- Objetivo: configuración automática de tablas de encaminamiento
- Ventajas: reacción y adaptación a cambios
  - Propagación rutas alternativas

# 9 Protocolos de encaminamiento (II)



- Dos tipos:
  - Interior: dentro de un Sistema Autónomo (SA)
  - Exterior: entre SAs



## 9.1 Sistemas autónomos

- Sistema Autónomo (SA) es un grupo de redes IP que poseen una política de rutas propia e independiente
  - Un SA es un dominio administrativo independiente
  - Se asigna a cada SA un número de 32 bits (ASN)
  - Ejemplos: gran compañía, red columna vertebral
- Gestión de caminos en dos niveles: dentro/fuera de un SA
  - Dentro: optimizar caminos entre las redes que contiene
  - Fuera: buscar caminos que comuniquen los distintos SAs
- Ventajas por trabajar con subconjuntos de Internet:
  - Escalabilidad: que al crecer todo siga funcionando
  - Eficiencia: poco tráfico de configuración
  - Tolerancia a fallos: buscar rápido otras rutas en caso de fallo del enlace o de un encaminador

## 9.2 Protocolo encaminamiento interior



1474

- Entre encaminadores dentro de un SA
- Todos los encaminadores del SA deben usar el mismo protocolo de búsqueda de caminos
  - RIP: Routing Information Protocol
  - OSPF: Open Shortest Path First

## 9.3 Protocolo encaminamiento exterior

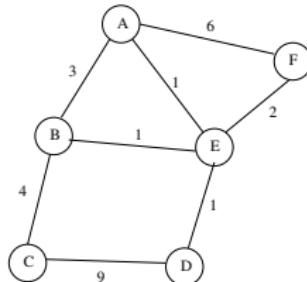
- Entre encaminadores de distintos SAs
- Cada SA tiene uno o más encaminadores frontera, que anuncian
  - Redes internas
  - Redes externas alcanzables (sólo en SA de tránsito)
  - Información de caminos
- Todos los SAs deben usar el mismo protocolo:
  - BGP-4 (*Border Gateway Protocol 4*), [RFC 4271](#)
- Elección de rutas basada en políticas explícitas (preferencias basadas en precio, etc.)
- Para poder atravesar ciertos SAs y evitar otros, BGP trabaja con rutas completas, no solo el siguiente salto



## 9.4 Algoritmos de encaminamiento

Objetivo: encontrar el camino con el menor coste entre dos nodos en una red dada. Se basan en:

- Topología: grafo donde cada red es un nodo
- Métricas de coste en enlaces
  - Coste constante: e.g. capacidad enlace, nº saltos, etc.
  - Factor dinámico «simple»: e.g. nº paquetes en cola
  - Factor dinámico dependiente de capacidad y carga (e.g. retardo medio de los últimos *n* minutos)
  - Factores económicos: e.g. precio por transmisión
  - Etc.
- Con esta información, los encaminadores construyen su tabla de encaminamiento



## 9.4 Algoritmos de encaminamiento (II)

Dos tipos:

- Distancia-vector
  - «Si el router X está a 5 saltos de la red Y, y yo soy adyacente a X, estoy a 6 saltos de la red Y»
  - Problemas de convergencia
  - RIP (LANs), IGRP (WANs pequeñas), EIGRP (WANs), BGP (Internet backbone)
- Estado-enlace
  - «Router X es adyacente al router Y por enlace activo»
  - Convergencia rápida
  - Requiere más memoria y CPU que distancia-vector
  - OSPF (LANs, WANs pequeñas)

## 9.5 Estado de enlace (link-state)



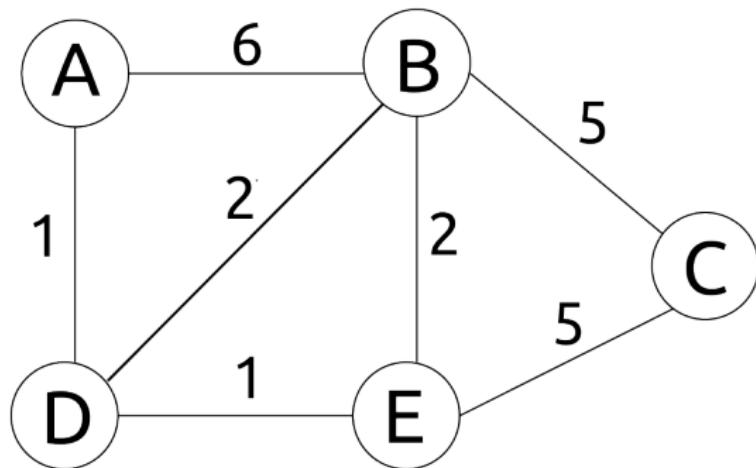
- Cada actualización contiene información sobre los **enlaces directamente conectados** (no toda la tabla de encam.)
- Envía actualización de estado a **todos los nodos** (no sólo a los vecinos inmediatos) mediante inundación fiable

Cada nodo ejecuta el algoritmo de *Dijkstra* (teoría de grafos) para calcular la mejor ruta hacia otros nodos:

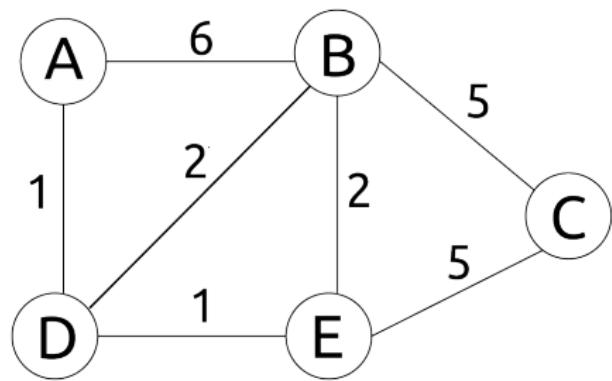
1. Confirmar camino con distancia 0 al propio nodo
2. Crear lista vacía de posibles caminos y costes
3. Para el nuevo nodo confirmado:
  - 3.1 Añadir a la lista los nodos directamente conectados al nuevo nodo confirmado y el coste para llegar a ellos pasando por él
  - 3.2 Si hay varios caminos para llegar a un nodo, descartar los más costosos
  - 3.3 Confirmar el nodo con menor coste y quitarlo de la lista

## 9.6 Ejemplo búsqueda de caminos

✍ Obtener la tabla de encaminamiento del nodo A mediante el algoritmo estado de enlace

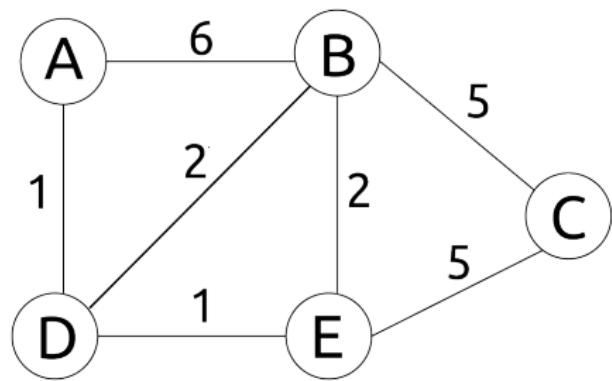


## 9.6 Ejemplo búsqueda de caminos



Vértice	Distancia	Último nodo
A		
B		
C		
D		
E		

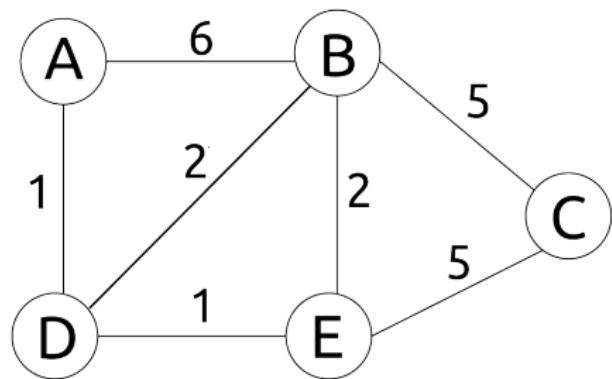
## 9.6 Ejemplo búsqueda de caminos



Vértice	Distancia	Último nodo
A	0	-
B	$\infty$	
C	$\infty$	
D	$\infty$	
E	$\infty$	

Visitados = [ - ], No visitados = [A,B,C,D,E]

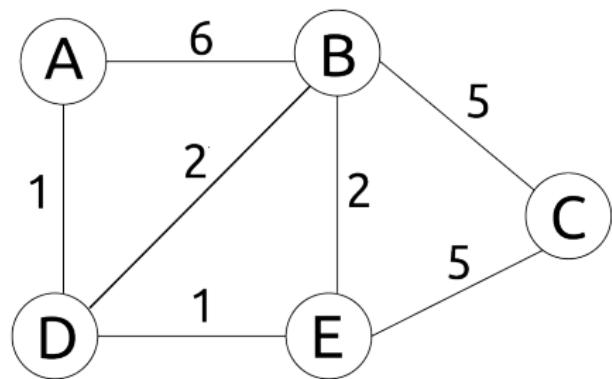
## 9.6 Ejemplo búsqueda de caminos



Vértice	Distancia	Último nodo
A	0	-
B	6	A
C	$\infty$	
D	1	A
E	$\infty$	

Visitados = [A], No visitados = [B,C,D,E]

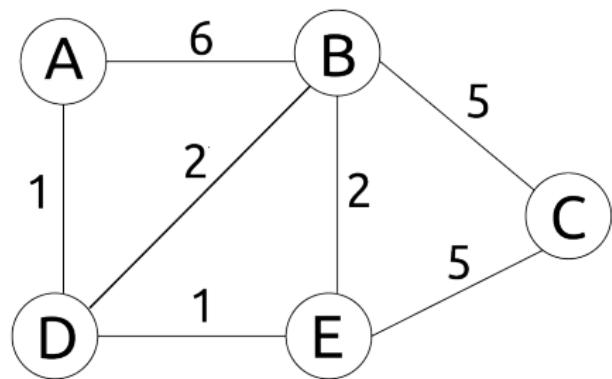
## 9.6 Ejemplo búsqueda de caminos



Vértice	Distancia	Último nodo
A	0	-
B	3	D
C	$\infty$	
D	1	A
E	2	D

Visitados = [A,D], No visitados = [B,C,E]

## 9.6 Ejemplo búsqueda de caminos

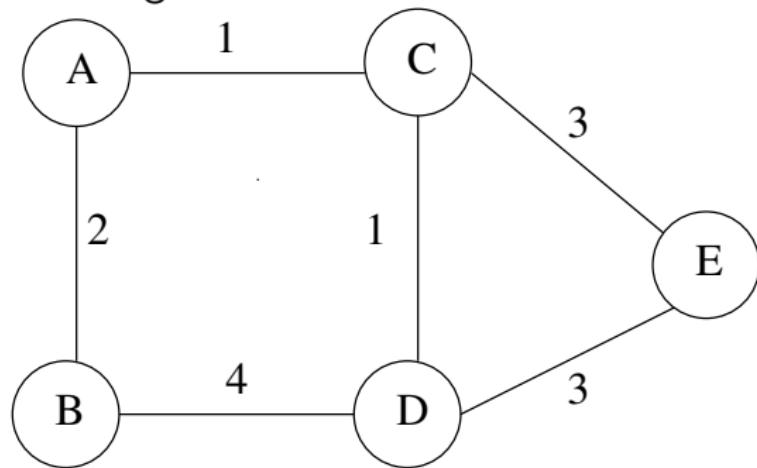


Vértice	Distancia	Último nodo
A	0	-
B	3	D
C	7	E
D	1	A
E	2	D

Visitados = [A,D,E], No visitados = [B,C]

## 9.6 Otro ejemplo búsqueda de caminos

Obtener la tabla de encaminamiento del nodo A mediante el algoritmo de estado de enlace



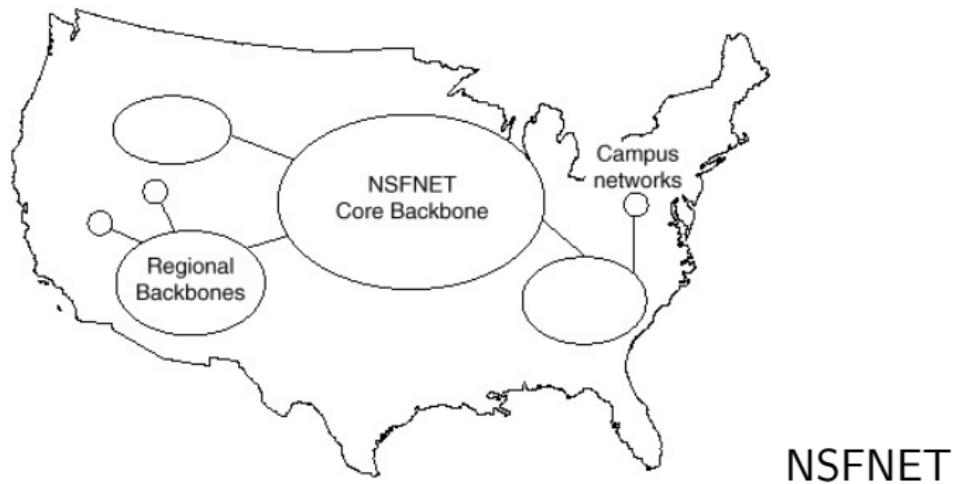
## 10. Estructura de Internet

### 10.1. Sistemas autónomos

# 10 Estructura de Internet

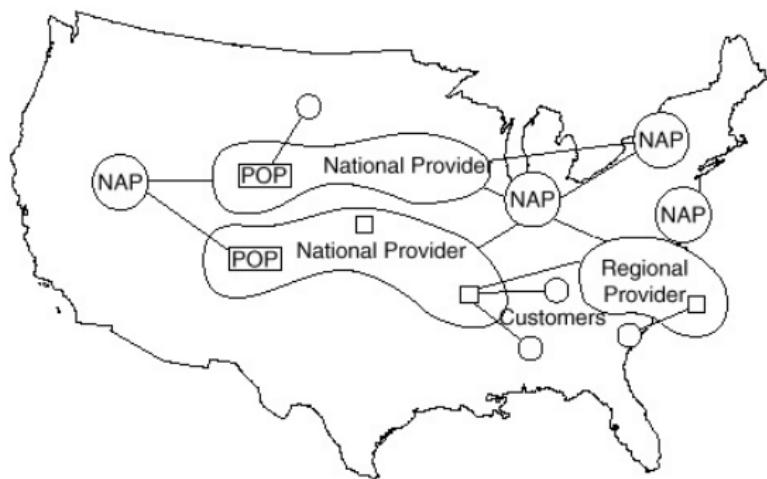


- Pasado reciente (1986-1995)



# 10 Estructura de Internet (II)

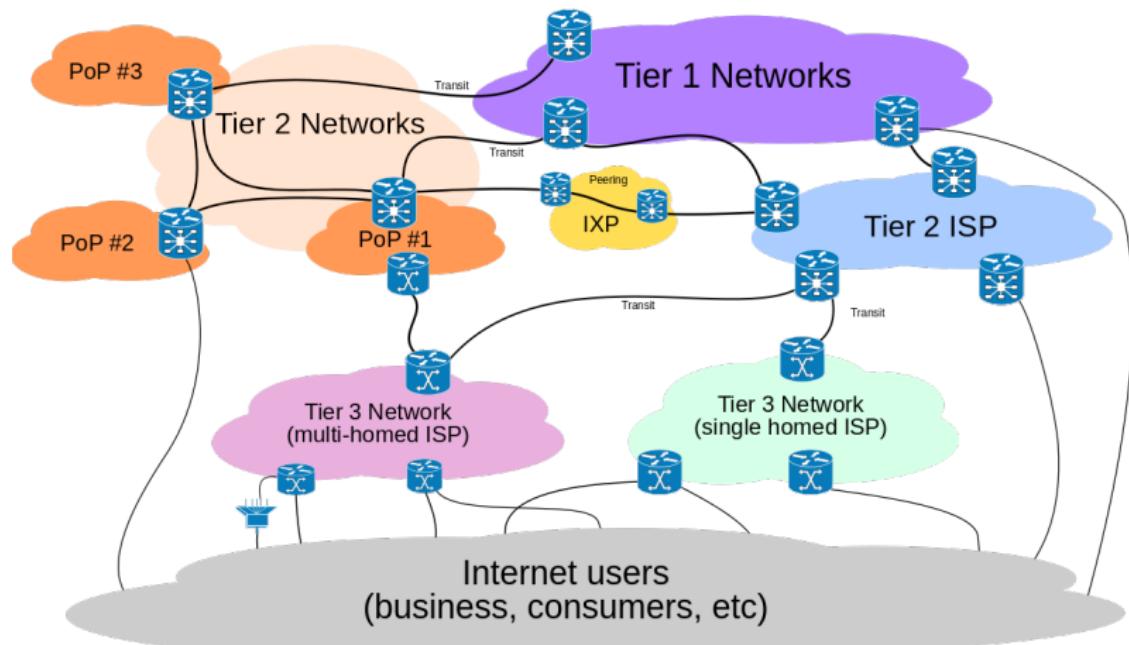
- Ahora es una estructura jerárquica operada por proveedores comerciales



# 10 Estructura de Internet (III)



- ISP roles y relaciones



[https://en.wikipedia.org/wiki/Internet\\_transit](https://en.wikipedia.org/wiki/Internet_transit)

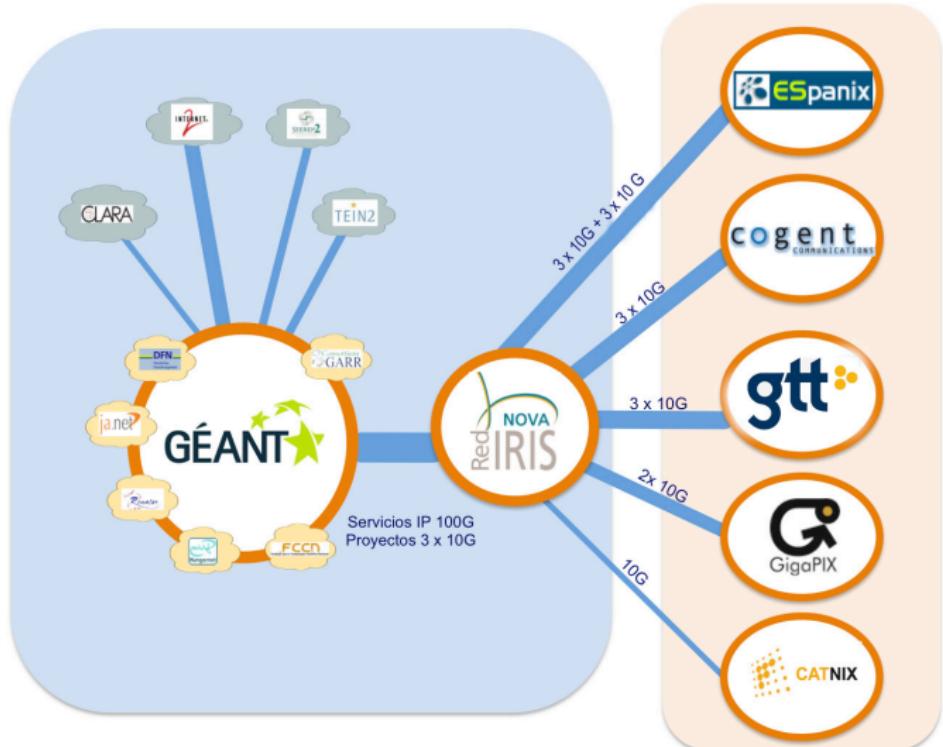
## 10.1 Sistemas autónomos

- E.g. RedIRIS (SA 766) agrupa las redes de las universidades y centros de investigación en España



# 10.1 Sistemas autónomos (II)

- Conectividad externa de RedIRIS



# 10.1 Sistemas autónomos (III)

- E.g. de SA troncal: GÈANT (SA 20965) comunica los SAs de investigación europeos

