TEMA 1.4. Protocolo IPv6

PROFESORES:
Rubén Santiago Montero
Eduardo Huedo Cuesta
Luis M. Costero Valero

Introducción: Limitaciones IPv4

- Direccionamiento muy limitado
  - Direcciones de 32 bits ($4{,}3 \cdot 10^9$ direcciones)
  - Soluciones parciales:
    - Uso de direcciones sin clases (CIDR)
    - Uso de intranets con direcciones privadas (NAT)
    - Uso de direcciones dinámicas (DHCP)
- Formato complejo de la cabecera del paquete
  - Longitud variable (campo Options)
  - Información de fragmentación (casi nunca necesaria)
- Seguridad limitada
  - No incluye soporte para seguridad o autenticación
  - Solución: extensión IPsec
- Soporte limitado para prioridad de tráfico o clase de servicio
  - Funcionalidad no implementada en la mayoría de encaminadores
- Multicast limitado
  - No se ha llegado a utilizar de forma completa y eficaz

Introducción: Características IPv6

- Espacio de direcciones mucho mayor
  - Direcciones de 128 bits ($3{,}4 \cdot 10^{38}$ direcciones)
- Formato de cabecera más simple
  - Mayor velocidad de procesamiento en los encaminadores
- Posibilidad de autoconfiguración de interfaces
- Mejor soporte para opciones adicionales
  - Las opciones de IPv6 no se codifican en la cabecera, sino en el cuerpo del paquete IP mediante cabeceras de extensión
  - Dispone de mayor espacio para su codificación
  - Permite introducir nuevas opciones en el futuro
- Opciones de seguridad tanto para autenticación como para cifrado
- Soporte para tráfico en tiempo real (ej. VoIP)
- Encaminamiento jerárquico basado en prefijos
- Mecanismos de transición desde la versión 4

Introducción: IPv4 e IPv6

Característica	**IPv4**	**IPv6**
Longitud de direcciones	32 bits	128 bits
Clases de direcciones	Clases A, B y C o CIDR	Direcciones sin clase
Tipo de direcciones	Unicast, Multicast, Broadcast	Unicast, Multicast, Anycast
Configuración de dirección	Estática (ficheros de configuración) o por DHCP	Estática (ficheros de configuración), autoconfiguración (*plug and play*) o por DHCP
Formato cabecera	Complejo. Longitud variable	Simple. Longitud fija
Calidad de servicio	Sí, aunque no soportado totalmente	Sí
Tráfico en tiempo real	No	Sí
Seguridad	No (extensión IPsec)	Sí

Direccionamiento

Direcciones IPv6: Tipos de Direccionamiento

Unicast

- Identifican a un único interfaz en la red
  - Un paquete dirigido a una dirección unicast se entregará únicamente al interfaz identificado con dicha dirección

Multicast

- Identifican a un grupo de interfaces (asignadas a más de un interfaz)
  - Un paquete dirigido a una dirección multicast se entrega a **todos** los interfaces identificados con esa dirección
- No existe dirección de broadcast

Anycast (RFC 2461 y RFC 1884)

- Identifican a un grupo de interfaces (asignadas a más de un interfaz)
  - Un paquete dirigido a una dirección anycast se entrega a **uno solo** de los interfaces identificados con esa dirección, normalmente al más cercano, en función de la métrica usada por el protocolo de encaminamiento
- Se asignan del espacio de direcciones unicast

Direcciones IPv6: Notación

- Una dirección IPv6 tiene una longitud de 128 bits (16 bytes)
- Notación hexadecimal
  - Se escribe como 8 grupos de 4 dígitos hexadecimales (16 bits)
  - Los grupos se separan con “:”

```
FDEC:BA98:7654:3210:0123:4567:89AB:CDEF
FE80:0000:0000:0000:0008:0800:200C:741A
```

- Notación abreviada
  - Los ceros a la izquierda de cada grupo se pueden omitir

```
0000 → 0
0074 → 74
```

  - La cadena de ceros más larga, y la primera si hay varias del mismo tamaño, se puede reemplazar por “::”

```
FE80:0:0:0:8:800:200C:741A → FE80::8:800:200C:741A
21AB:0:0:A:0:0:1234:5678 →
                  → 21AB::A::1234:5678      Incorrecto (ambiguo)
                  → 21AB::A:0:0:1234:5678   Correcto
```

Direcciones IPv6: Notación CIDR

- Las direcciones IPv6 son sin clase para soportar el direccionamiento jerárquico
- Se dividen en prefijo y sufijo
- La longitud del prefijo se denota en CIDR
- **Ejemplos**:

```
FDEC:BA98:7654:3210:0123:4567:89AB:CDEF/64
FE80:0:0:0:8:800:200C:741A/64
```

Direcciones IPv6: Ámbitos (RFC 4007)

- **Ámbito (*scope*)**: Determina en qué parte de la red es válida la dirección
  - **Enlace local (*link-local*)**: Válida dentro del enlace en el que está conectado la interfaz de red (ej. una LAN)
  - **Sitio local (*site-local*)**: Válida dentro de un *sitio* formado por una o varias redes interconectadas mediante encaminadores (ej. campus universitario)
  - **Global**: Válida en todo Internet
- **Zona (*scope zone*)**: Región conexa de la red de un ámbito determinado
  - Por ejemplo, una zona de enlace local consiste en un enlace y todos los interfaces directamente conectados, y la zona global única comprende todos los interfaces y enlaces de Internet
  - La unicidad de las direcciones sólo se garantiza dentro de su zona
  - Los datagramas no se redirigen a una zona distinta, aunque sea del mismo ámbito
  - En caso de ambigüedad, se debe usar **<dirección>%<id_zona>**
    - Por ejemplo, `fe80::1234%eth1` para direcciones de enlace local (requerido en Linux)

Direcciones IPv6: Estructura

- IPv4 tiene una estructura de un nivel (red y host)
- IPv6 permite una jerarquía flexible, que acomoda diferentes tipos de direcciones
- Cada tipo de dirección comienza con un prefijo (prefijo de formato) de longitud variable

Tipo de dirección	**FP (binario)**	**FP (hexadecimal)**
Reserved Address	`0000 0000`	`::/8`
Global Unicast Address	`001`	`2000::/3`
Link-Local Unicast Address	`1111 1110 10`	`FE80::/10`
Unique Local Address (ULA)	`1111 110`	`FC00::/7`
Multicast Address	`1111 1111`	`FF00::/8`

Direcciones IPv6: Enlace local

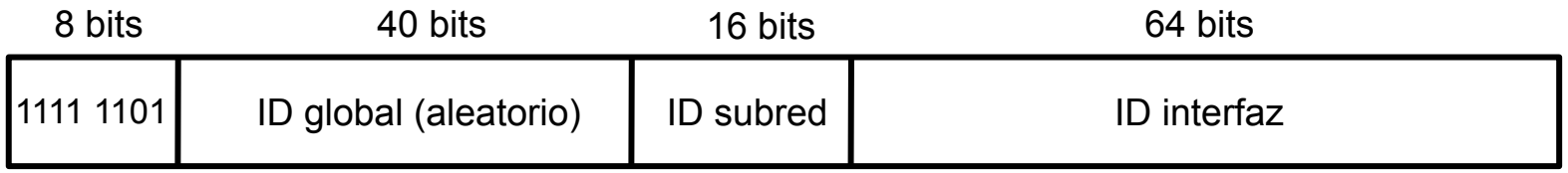
- Direcciones unicast privadas que se asignan a un enlace (*link*) y nunca se encaminan fuera de la zona de ámbito del enlace
  - Es un espacio de direcciones plano
  - Su principal uso es la autoconfiguración y el descubrimiento de vecinos
- Formato:
  - Prefijo de formato (10 bits): `1111 1110 10` (`FE80::/10`)
  - Los siguientes 54 bits son `0`
  - Identificador de interfaz (64 bits)
- **Ejemplo:**

  `fe80::2e81:58ff:fee9:64bb/64`

Direcciones IPv6: ULA (Unique Local Address)

- Direcciones unicast privadas, definidas en RFC 4193, para usar en intranets jerárquicas, pero no encaminables en Internet (aunque su ámbito es global)
  - Sustituyen a las direcciones de sitio local, definidas en RFC 3879
  - Permiten la auto-configuración
- Formato:
  - Prefijo de formato (7 bits): `FC00::/7`
  - Bit 8: 1 indica que el prefijo se asigna localmente (0 no está definido)
  - Identificador global (40 bits): pseudo-aleatorio para evitar colisiones
  - Identificador de subred (16 bits): 65.536 subredes por sitio, para crear la estructura de red interna
  - Identificador de interfaz (64 bits)
- **Ejemplo:**

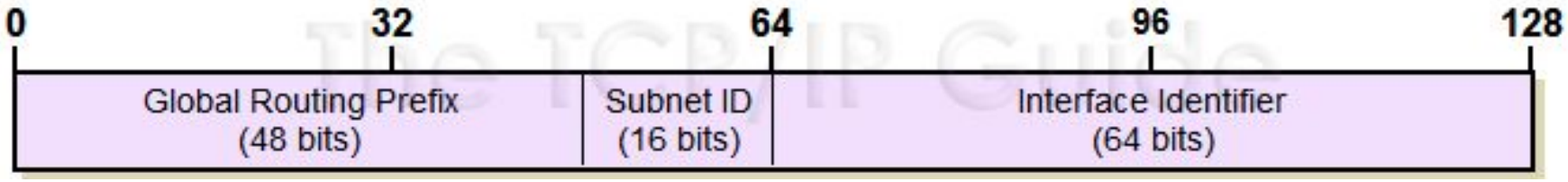
`fd12:A128:e8e1:1:FEDC:BA98:7865:4321/64`



Direcciones IPv6: Unicast Globales

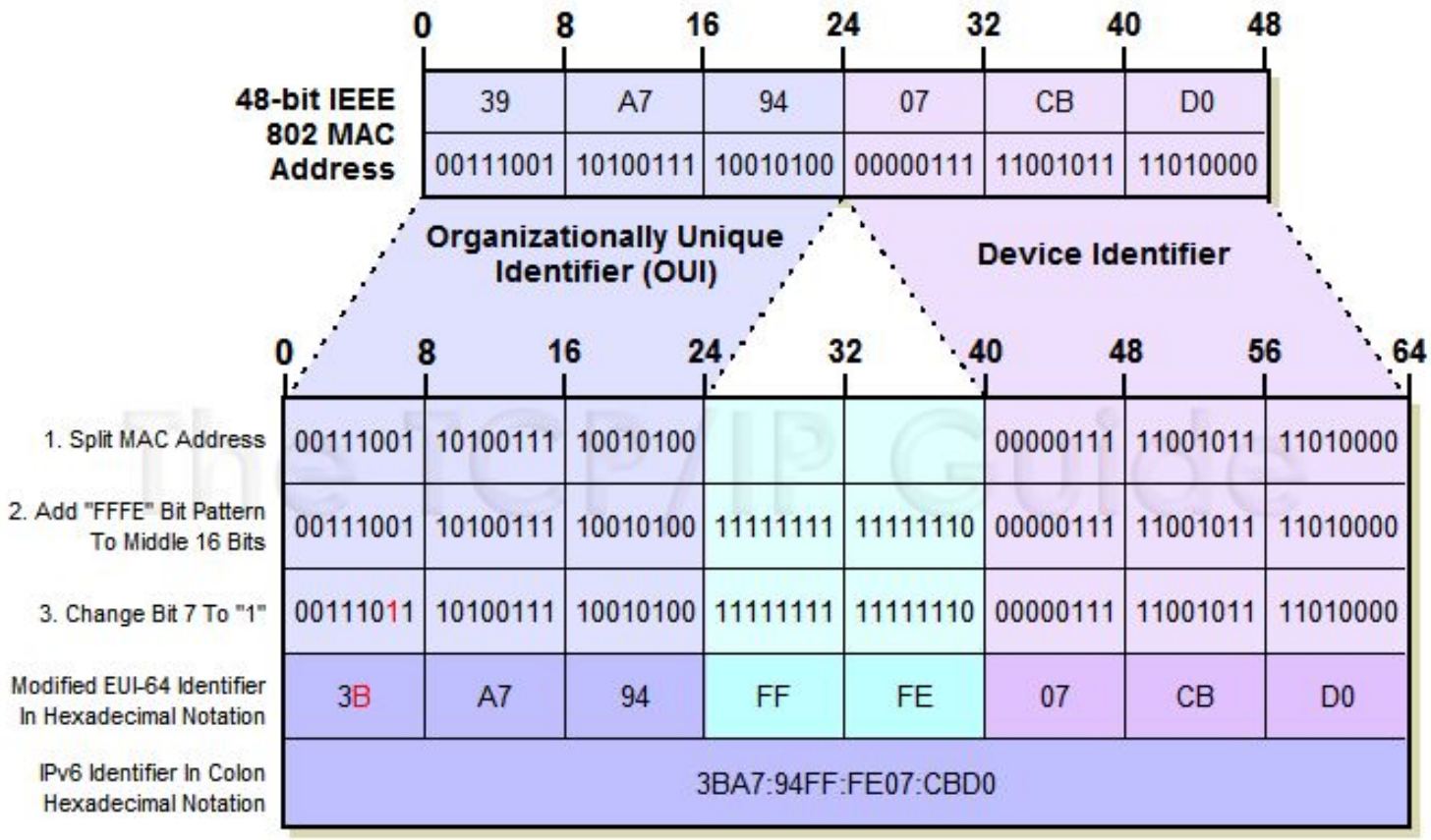
- Direcciones unicast globales, definidas en RFC 3587, para uso en Internet
  - Permiten la autoconfiguración
- Formato:
  - Prefijo global de encaminamiento (48 bits): Actualmente, IANA está asignando el rango `2000::/3`, que permite 2^{45} sitios diferentes. Es la única parte relevante en el encaminamiento global y puede subdividirse jerárquicamente de acuerdo a las necesidades de los RIRs (*Regional Internet Registry*) y LIRs (*Local Internet Registry*)
  - Identificador de subred (16 bits): 65.536 subredes por sitio, para crear la estructura de red interna
  - Identificador de interfaz (64 bits)
- **Ejemplo:**

  `2004:A128::32:FEDC:BA98:7865:4321/64`



Direcciones IPv6: ID de Interfaz

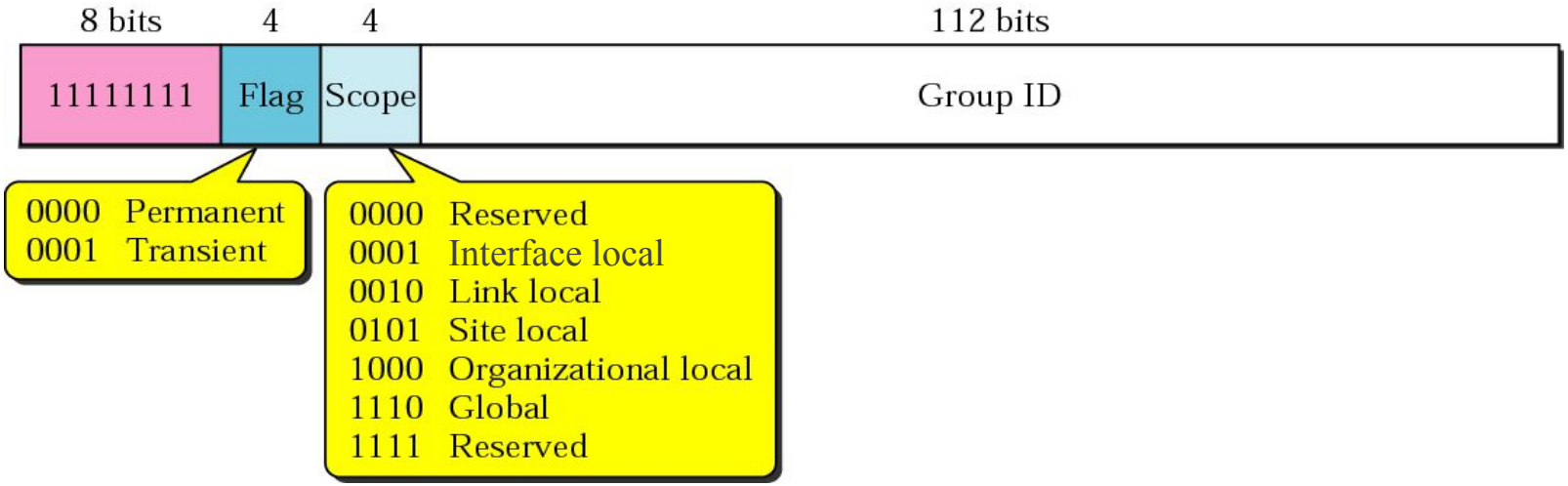
- Los 64 bits menos significativos de la dirección se generan
  - A partir de la dirección MAC (EUI-48) usando el procedimiento EUI-64 (64-bit Extended Unique Identifier) modificado
  - De forma pseudoaleatoria y temporal para evitar el rastreo de los clientes, activando las extensiones de privacidad (RFC 4941)



Direcciones IPv6: Multicast

- Definen un grupo de interfaces en un ámbito determinado
- Formato:
  - Prefijo de formato (8 bits): `FF::/8`
  - Flags (4 bits): indican si es una dirección permanente (IANA) o temporal para una comunicación (ej. grupo de nodos en una teleconferencia)
  - Ámbito (4 bits)
  - Identificador de grupo (112 bits)
- **Ejemplo**:

`FF02::16`



- Las direcciones MAC se generan con el prefijo `33:33:*` y los 32 bits menos significativos del identificador de grupo

Direcciones IPv6: Multicast

- Direcciones para los nodos

Dirección	Ámbito	Significado
`FF01::1`	*Interface local*	Un interfaz en el nodo (ej. como forma de comunicación entre procesos)
`FF02::1`	*Link local*	Todos los interfaces del enlace local

- Direcciones para los encaminadores

Dirección	Ámbito	Significado
`FF02::2`	*Link Local*	Todos los encaminadores del enlace
`FF05::2`	*Site local*	Todos los encaminadores del sitio local, por tanto, se reexpide a todas las subredes a través de los encaminadores internos
`FF02::5`	*Link local*	Todos los encaminadores OSPF del enlace local
`FF02::9`	*Link local*	Todos los encaminadores RIP del enlace local

Direcciones IPv6: Multicast

- **Direcciones multicast de nodo solicitado** (*Solicited-node multicast addresses*), usadas en el protocolo de descubrimiento de vecinos
- Se calculan como función de la dirección unicast del nodo:
  FF02:0:0:0:0:1:FF00::/104 + 24 bits menos significativos de la dirección
- **Ejemplo**:

  Dirección unicast: 2037::01:800:20**0E:8C6C**
  Dirección multicast de nodo solicitado: FF02::1:FF**0E:8C6C**

Direcciones IPv6: Otras Direcciones

- Dirección sin especificar: `0:0:0:0:0:0:0:0` (`::`)
  - Indica que el interfaz no tiene ninguna dirección asignada
- Dirección de *loopback*: `0:0:0:0:0:0:0:1` (`::1`)
  - Análoga a la dirección de *loopback* IPv4 (`127.0.0.1`)
- Direcciones asignadas a IPv4 (*IPv4-mapped*): `::FFFF:<IPv4>`
  - De uso en arquitecturas que mezclan las pilas IPv4 e IPv6
  - **Ejemplo**:

    `::FFFF:192.02.13.123` (en notación mixta)

¿Cuántas direcciones IPv6 tiene un nodo?

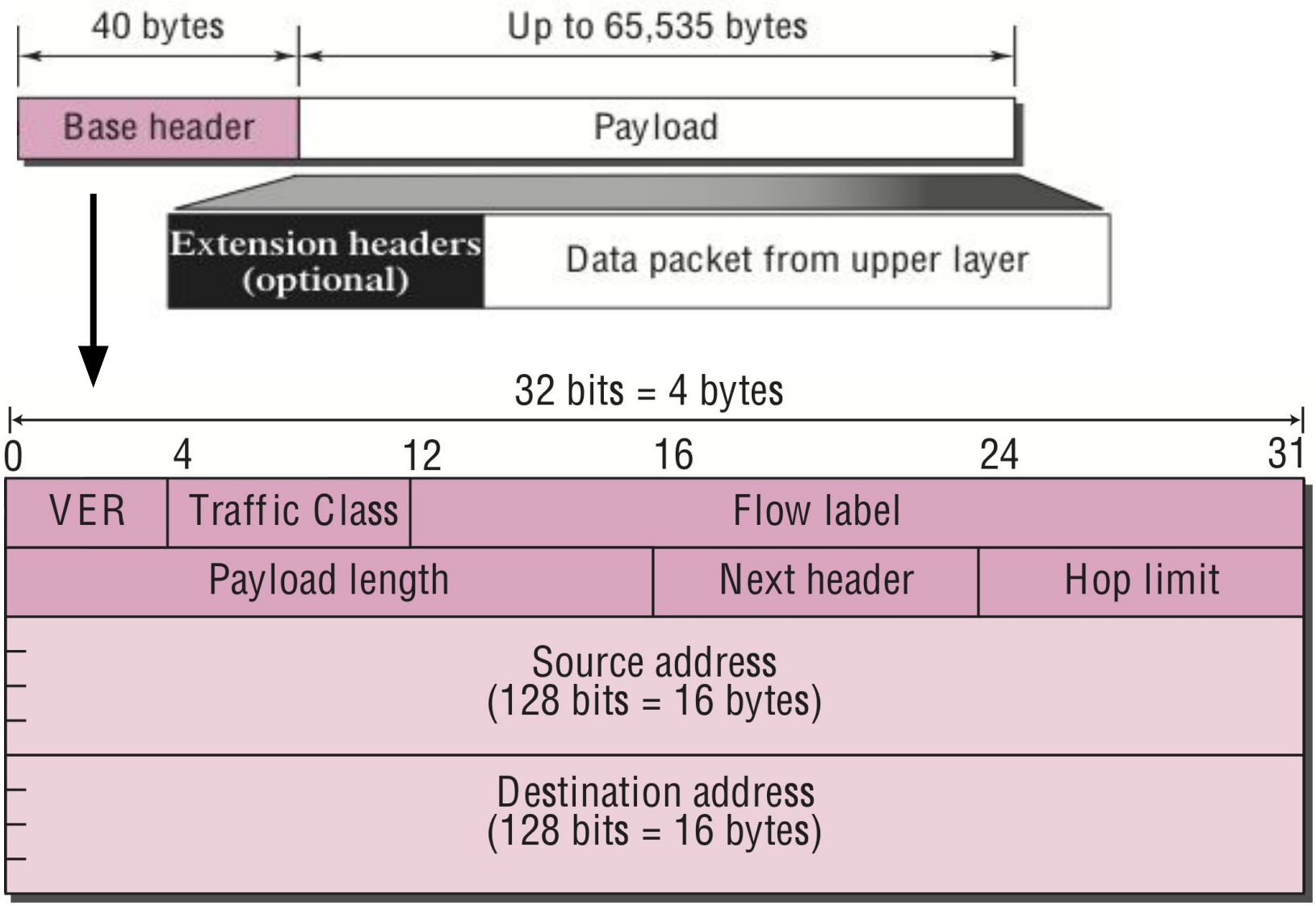
- Dirección de enlace local para cada interfaz
- Direcciones unicast o anycast configuradas para los interfaces
- Dirección de loopback

Además, responde a las direcciones multicast:

- Dirección multicast de todos los nodos
- Dirección multicast de nodo solicitado para cada dirección configurada
- Direcciones multicast de otros grupos a los que pertenezca el nodo

Datagrama

Datagrama IPv6: Formato



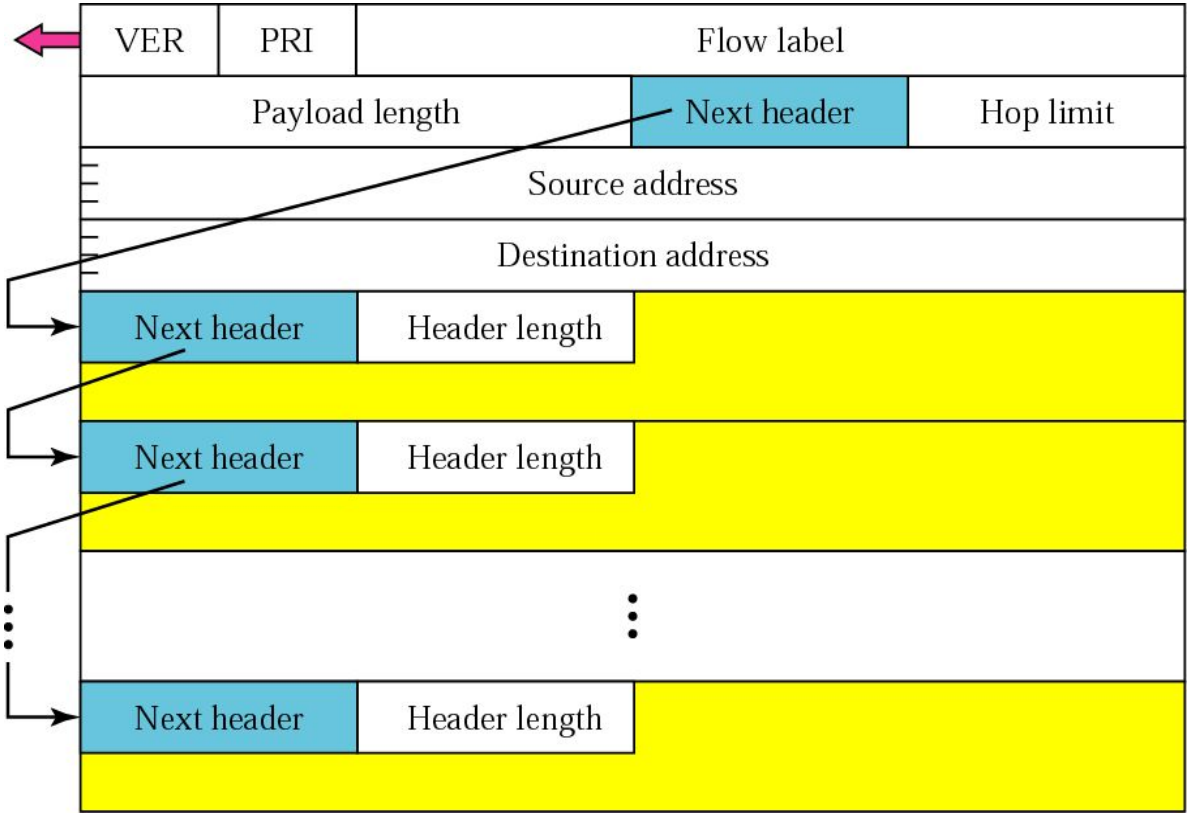
Datagrama IPv6: Formato

- **Version** (4 bits)**:** 6
- **Traffic Class** (8 bits): distingue diferentes requisitos de entrega del datagrama, es similar al campo DS (antes ToS) de IPv4
  - DSCP (*Differentiated Services Code Point*, 6 bits): Clasificación del tráfico en grupos con distintos requisitos de calidad de servicio
  - ECN (*Explicit Congestion Notification*, 2 bits): Permite detectar situaciones de congestión en la red sin descartar paquetes
- **Flow Label** (20 bits): Etiqueta el paquete como perteneciente a un flujo para mejorar el procesamiento realizado por los encaminadores de la red
  - Un flujo comparte las mismas características (origen/destino, requisitos…)
  - Para ser usado por protocolos de tiempo real y reserva (RTP/RSVP)
  - Todavía experimental (predecesor de MPLS)
- **Payload Length** (16 bits): Longitud sin contar la cabecera (máx. 64 Kbytes)
- **Next Header** (8 bits): Define la siguiente cabecera del datagrama, encapsulada en la sección de datos (ver siguiente transparencia)
- **Hop Limit** (8 bits): Similar al campo TTL de IPv4
- **Source/Destination Address** (128 bits): Direcciones origen y destino

Datagrama IPv6: Cabeceras de extensión

- El campo **Next Header** puede ser:
  - La cabecera del protocolo de nivel superior (6=TCP, 17=UDP, 58=ICMPv6…), similar al campo Protocol de IPv4
  - Una cabecera de extensión IPv6, similar al campo Options de IPv4

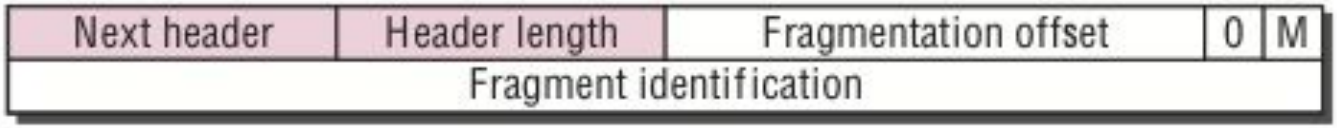
Código	Next Header
0	Hop-by-hop Options
43	Routing
44	**Fragment**
50	Encapsulating Security Payload
51	Authentication
59	No Next Header
60	Destination Options



Header Length (8 bits): Longitud de la cabecera en unidades de 8 bytes

Datagrama IPv6: Fragmentación

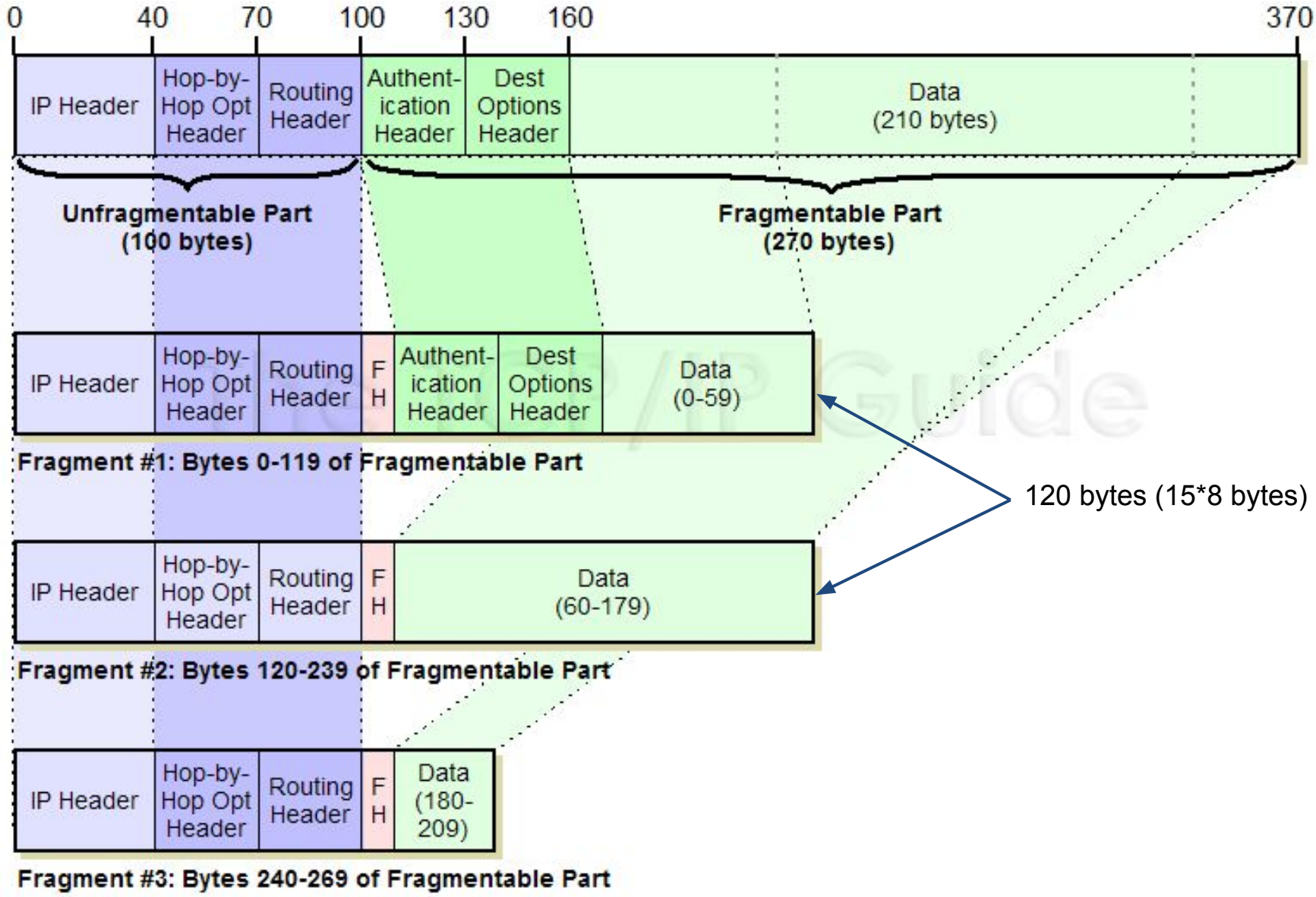
- En IPv6, la fragmentación se realiza en origen (nunca en los encaminadores)
- Se recomienda que los nodos IPv6 implementen el algoritmo Path MTU Discovery (RFC 1981), para descubrir y aprovechar MTUs de camino (la mínima MTU de todos los enlaces del camino) mayores de 1280 bytes (MTU mínima en IPv6, aunque se recomienda que sea de 1500 bytes)
- El protocolo de nivel superior limita el tamaño de los datos según la MTU
  - No obstante, si no es capaz de hacerlo y genera un paquete mayor que la MTU del camino, el emisor lo dividirá en fragmentos
- **Formato** de la cabecera de fragmentación:



  - **Header Length** (8 bits): Reservado, inicializado a 0s
  - **Offset** (13 bits): desplazamiento respecto al inicio de la parte fragmentable del datagrama original en unidades de 8-bytes (el desplazamiento del primer fragmento es 0)
  - **Flags:** M (*More fragments*) indica si hay más fragmentos o no
  - **Identification**: permite identificar a los fragmentos del mismo datagrama

Datagrama IPv6: Fragmentación

Ejemplo (MTU=230 bytes)



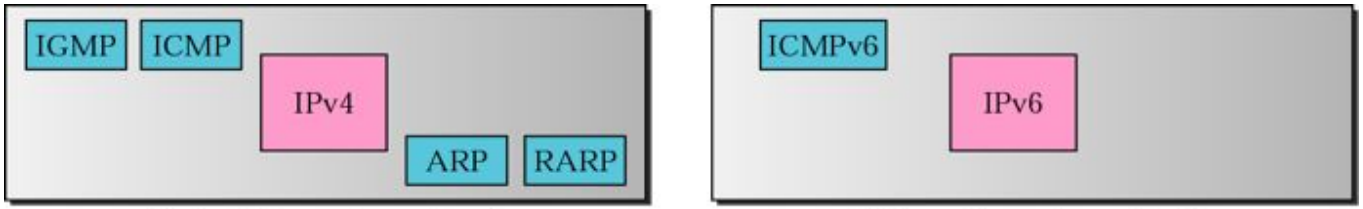
Datagrama IPv6: Comparativa IPv4

- El campo Header Length se ha eliminado, ya que la longitud es fija
- El campo ToS se ha eliminado y sustituido por el campo Traffic Class (en IPv4, se sustituyó por el campo DS)
- Se ha añadido el campo Flow Label
- El tamaño del datagrama no incluye la cabecera
- El campo TTL se sustituye por Hop Limit
- No hay campo Checksum, ya que se realiza por los protocolos superiores
- El campo Option se realiza como cabeceras de extensión
- Los campos de fragmentación se eliminan de la cabecera y se implementan en cabeceras de extensión
- El campo Protocol se sustituye por Next Header

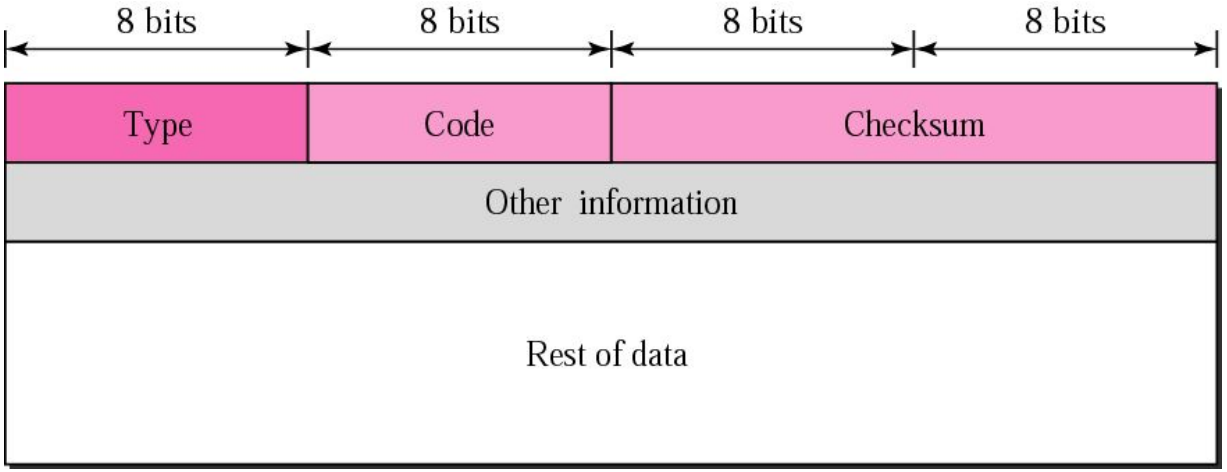
ICMPv6

ICMPv6: Introducción

- ICMPv6 (RFC 4443) asume el papel de varios protocolos auxiliares en IPv4

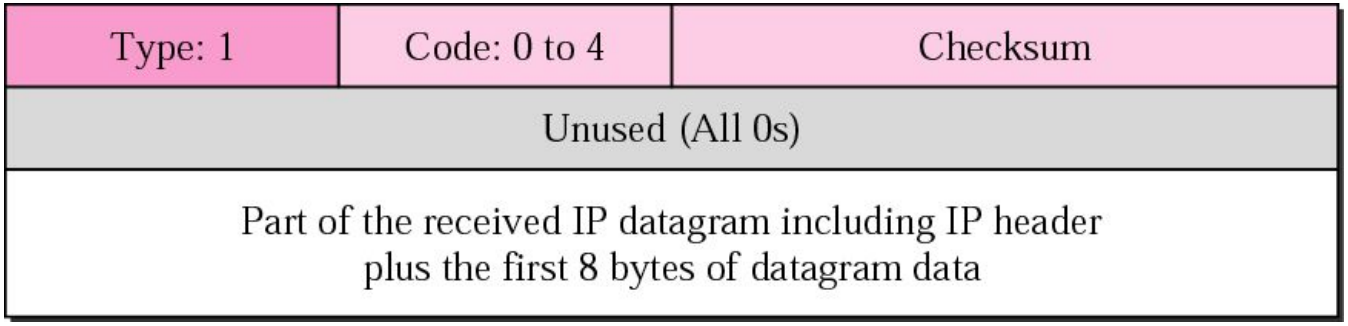


- Protocolo orientado a mensajes
  - Mensajes de error
  - Mensajes de información, incluyendo
    - Protocolo de descubrimiento de vecinos (RFC 4861)
    - Protocolo de gestión de grupos multicast (RFC 3810)
- Los mensajes ICMPv6 tienen un formato común:



ICMPv6: Mensajes de Error

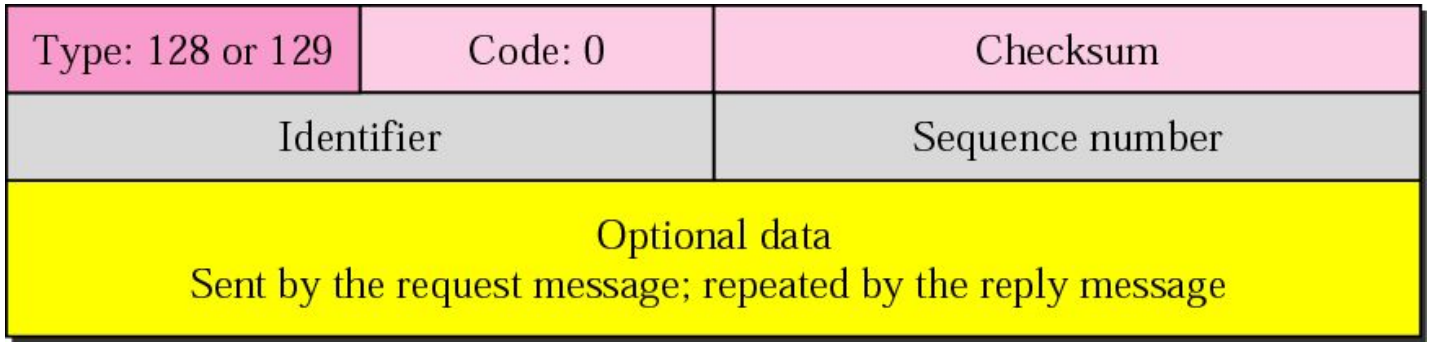
- Incluye errores relativos a (tipos de 0 a 127):
  - Destino inalcanzable (1)
  - Datagrama demasiado grande (2) → Path MTU Discovery, indica la MTU
  - Tiempo excedido (3)
  - Problema de parámetros (4)
- Ejemplo: Destino inalcanzable (1)
  - Si el datagrama no se puede encaminar o entregar al destino (salvo si es por congestión), se descarta y se envía este mensaje ICMP



  - Códigos: Sin ruta al destino (0), Comunicación no permitida (1), Fuera del ámbito del origen (2), Dirección inalcanzable (3), Puerto inalcanzable (4), Fallo de la dirección origen (5), Ruta rechazada (6)

ICMPv6: Mensajes de Información

- Proporcionan información de diagnóstico (tipos de 128 a 255):
  - Echo request (128)
  - Echo reply (129)
  - Descubrimiento de vecinos
  - Gestión de grupos multicast
  - ...
- Ejemplo: Echo request/reply



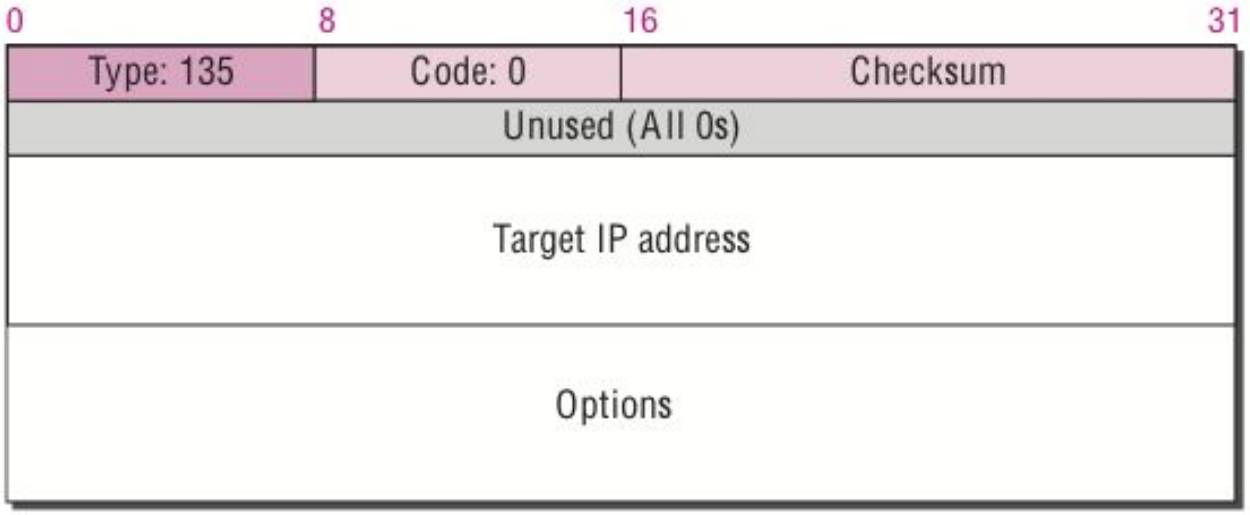
  - Identificador y Secuencia (16 bits cada uno): Sirven para identificar las respuestas, dependen de la implementación de `ping`
  - Datos: deben copiarse en la respuesta

ICMPv6: Descubrimiento de Vecinos

- Protocolo multifunción que permite realizar operaciones de configuración
- Opera sobre nodos y encaminadores en el mismo enlace
- **Descubrimiento de vecinos**
  - Resolución de direcciones, equivalente a ARP en IPv4 (IP nodo solicitado)
  - Detección de direcciones duplicadas (IP nodo solicitado)
  - Detección de vecino inalcanzable (IP unicast)
  - Anuncio de cambios en la dirección de enlace (IP todos los nodos del enlace)
  - Mensajes ICMPv6 Neighbor Solicitation (135) y Neighbor Advertisement (136)
- **Descubrimiento de encaminadores y prefijos**
  - Descubrimiento de encaminadores, prefijos y otra información de configuración de la red
  - Mensajes ICMPv6 Router Solicitation (133) y Router Advertisement (134)
- **Redirección**
  - Notificar una ruta más adecuada para alcanzar un determinado destino
  - Mensaje ICMPv6 Redirect (137)

ICMPv6: Solicitud de Vecino

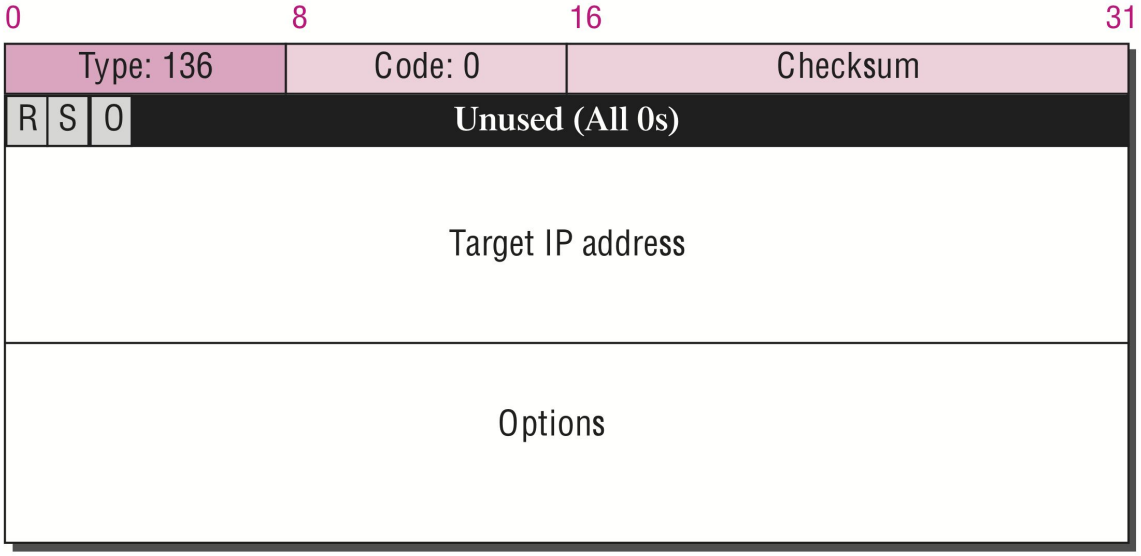
- Este mensaje se genera para:
  - Averiguar la dirección física asociada a una dirección IP (como una petición ARP en IPv4), usando la dirección multicast de nodo solicitado (`FF02:0:0:0:0:1:FF00::/104`) como destino
  - Determinar si un nodo vecino sigue siendo alcanzable, usando la dirección unicast del interfaz como destino
  - Detectar si la dirección IP está duplicada, en el proceso de autoconfiguración
- Formato:



  - Opciones: Dirección de enlace origen

ICMPv6: Anuncio de Vecino

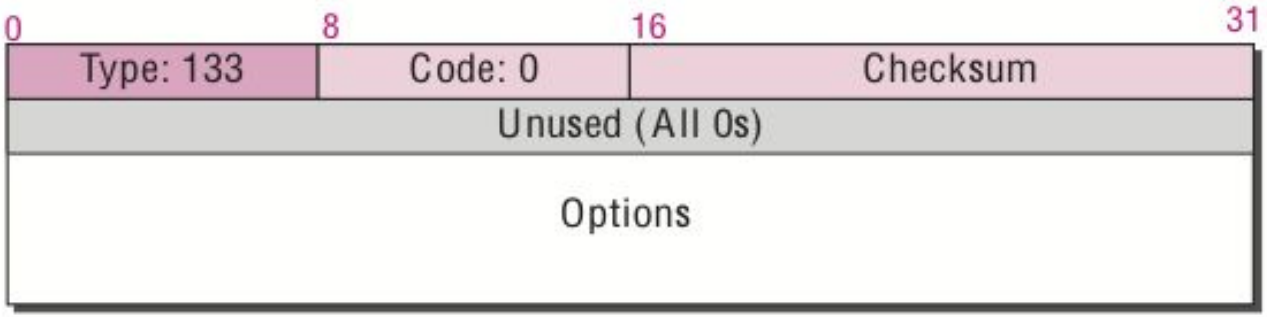
- Este mensaje se genera para:
  - Responder a un mensaje de solicitud de vecino (como una respuesta ARP en IPv4), con la dirección unicast del destinatario como destino
  - Anunciar un cambio en la dirección física de un interfaz, con la dirección multicast `FF02::1` (todos los nodos del enlace local) como destino
- Formato:



  - Flags: R (*Router*) indica si el emisor es un encaminador, S (*Solicited*) indica si el anuncio se envió como respuesta a una solicitud y O (*Override*) indica si se debe reemplazar la entrada existente en la *cache* (direcciones enlace local)
  - Opciones: Dirección de enlace del interfaz (*target*)

ICMPv6: Solicitud de Encaminador

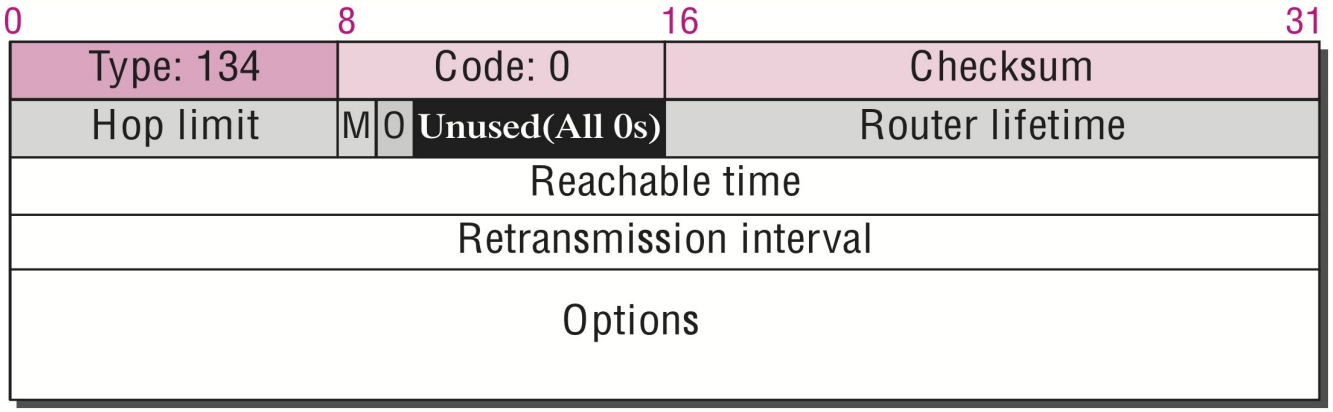
- Este mensaje se genera tras la activación de un interfaz para:
  - Detectar los encaminadores y realizar la autoconfiguración del interfaz, con la dirección multicast `FF02::2` (todos los encaminadores del enlace local) como destino
- Formato:



  - Opciones: Dirección de enlace origen

ICMPv6: Anuncio de Encaminador

- Los envían los encaminadores para anunciar su presencia en la red:
  - Periódicamente, con la dirección multicast `FF02::1` (todos los nodos del enlace local) como destino
  - Como respuesta a un mensaje de solicitud de encaminador, con la dirección multicast anterior o la dirección unicast del nodo solicitante como destino
- Formato:



  - Flags: M (*Managed address configuration*) indica que se usa DHCPv6 para asignar direcciones y O (*Other configuration*) indica que se usa DHCPv6 para proporcionar otra información de configuración (ej. servidores DNS)
  - Opciones: Dirección de enlace origen (interfaz del encaminador), MTU, prefijo de red, servidor DNS recursivo...

ICMPv6: Autoconfiguración

- *StateLess Address AutoConfiguration* (SLAAC)
- La autoconfiguración de un interfaz incluye:
  - El identificador de interfaz, generado según EUI-64 modificado o con las extensiones de privacidad
  - El prefijo anunciado por el encaminador
- Las opciones en los mensajes de anuncio de encaminador pueden incluir además información de DNS
- DHCPv6: Protocolo DHCP para IPv6

Ejemplos de Preguntas Teóricas

¿Para qué se usa la dirección de red IPv6 ff02::1:ff61:db90?

- ☐ Para resolver la dirección física asociada a una de las IP de la máquina.
- ☐ Para comunicarse con las máquinas del sitio local.
- ☐ Para comunicarse con las máquinas del enlace.

¿Cómo se realiza la resolución de direcciones en IPv6?

- ☐ Mediante el uso del protocolo ARPv6.
- ☐ A partir del identificador extendido de 64 bits (EUI-64).
- ☐ Mediante el uso del protocolo ICMPv6.

Respecto a las opciones en el datagrama de IPv6, ¿cuál de las siguientes afirmaciones es cierta?

- ☐ Las opciones se usan solo cuando se realiza la fragmentación en origen.
- ☐ Las opciones se codifican como una cabecera adicional.
- ☐ No soporta opciones para acelerar el procesamiento de los routers.