

# El Nivel de Enlace

## Fundamentos de Redes de Ordenadores

Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones y  
Sistemas Telemáticos y Computación

Universidad Rey Juan Carlos

Septiembre 2022



©2022 GSyC  
Algunos derechos reservados.  
Este trabajo se distribuye bajo la licencia  
Creative Commons Attribution Share-Alike  
disponible en <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/deed.es>

- 1 Introducción
- 2 Latencia y Ancho de Banda
- 3 Transmisión de bits por un medio de transmisión
- 4 Acceso a un medio compartido
- 5 Gestión de Errores de Transmisión
- 6 Protocolo Ethernet
- 7 Referencias

# Contenidos

- 1 Introducción
- 2 Latencia y Ancho de Banda
- 3 Transmisión de bits por un medio de transmisión
- 4 Acceso a un medio compartido
- 5 Gestión de Errores de Transmisión
- 6 Protocolo Ethernet
- 7 Referencias

# Misiones del Nivel de Enlace

- Misiones principales:
  - Transformar los bits a transmitir por el medio en una señal, y extraer de una señal del medio los bits que se han transmitido.
  - Gestionar el acceso al medio si dicho medio es compartido.
  - Gestionar los errores de transmisión
- Recuerda que el Nivel de Enlace en la arquitectura TCP/IP engloba a los niveles físico (N1) y de enlace (N2) de OSI.

# Contenidos

- 1 Introducción
- 2 Latencia y Ancho de Banda**
- 3 Transmisión de bits por un medio de transmisión
- 4 Acceso a un medio compartido
- 5 Gestión de Errores de Transmisión
- 6 Protocolo Ethernet
- 7 Referencias

# Velocidad de Transmisión, *Throughput* y Ancho de Banda

## Velocidad de Transmisión

Cantidad de información **transmitida** por unidad de tiempo. Se mide en bits/segundo.

Unidades: bps, Kbps, Mbps, Gbps... o bien: bit/s, KBit/s, MBit/s, GBit/s...

En inglés: *rate*, *bitrate*.

## Throughput

Cantidad de información **entregada** por unidad de tiempo. Se podría medir también en bits/segundo, pero suele medirse en Bytes/segundo.

Unidades: B/s, KB/s, MB/s, GB/s... o bien: Byte/s, KiByte/s, MiByte/s, GiByte/s...

## Ancho de Banda

Diferencia entre las frecuencias máxima y mínima que es capaz transmitir un determinado medio de transmisión.

Unidades: Hz, MHz, GHz

En inglés: *bandwidth*

- La **velocidad de transmisión** suele usarse referida a la capacidad de un medio de transmisión (ej: características de un acceso a Internet ofertado por un proveedor)
- El **throughput** suele usarse referido a todo un sistema de transmisión o a la velocidad de una aplicación (ej: velocidad de descarga de un fichero por un navegador)
- El término **ancho de banda** es frecuentemente utilizado, informalmente, como sinónimo de los otros dos términos.

# Latencia, Retardo de Propagación y RTT

## Latencia o Retardo de Propagación

Tiempo que tarda 1 bit en llegar de un extremo a otro de un medio o sistema de transmisión

Unidades: s, ms,  $\mu$ s, ns

En inglés: *latency, delay, propagation delay*

## Round Trip Time (RTT)

Tiempo en que se tarda en llegar a un extremo **y volver**.

Unidades: s, ms,  $\mu$ s, ns


- El **RTT** suele calcularse como el doble de la **latencia**.
- Cualquiera de estos términos puede referirse tanto a un medio de transmisión como a un sistema o a una aplicación.
- Cuando se refieren estrictamente a un medio de transmisión, están directamente relacionados con la **velocidad de propagación** de las señales que se envían por dicho medio:  $latencia = distancia / velocidad_{propag}$ 
  - $v_p$  de una onda en el vacío (límite teórico): 300.000 km/s
  - $v_p$  de las señales por una Ethernet de cable o fibra actuales: aprox. 200.000 km/s




# Latencia y “Ancho de Banda”

- Ambos conceptos son totalmente independientes: puede haber sistemas de transmisión con un buen ancho de banda y mala latencia, o totalmente al revés.
- Ambos conceptos participan en el cálculo del **Tiempo que se tarda en transmitir una cierta cantidad de bits**:

$$\text{Tiempo} = \text{Latencia} + \frac{\text{Cantidad de bits}}{\text{Velocidad de Transmisión}}$$

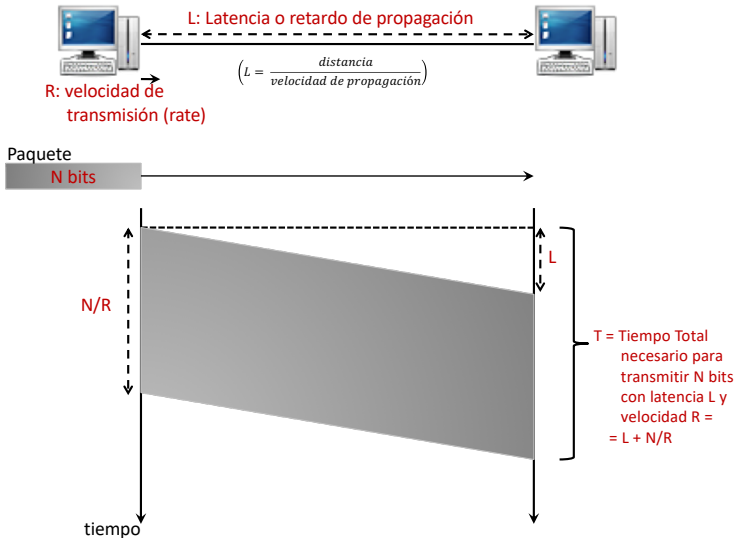


lo que tarda en llegar el primer bit

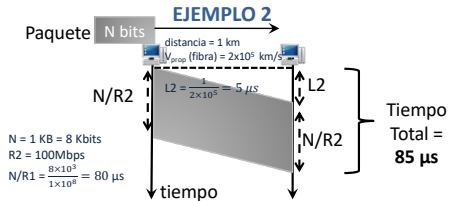
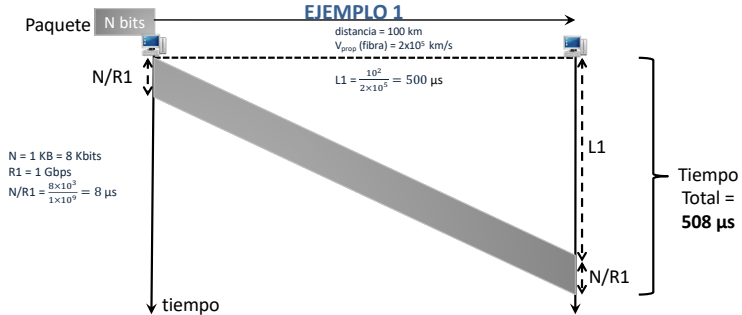


lo que tarda en llegar el resto de bits a partir de llegar el primero

# Envío de un paquete de N bits



# Ejemplos de envío de un paquete



# Contenidos

- 1 Introducción
- 2 Latencia y Ancho de Banda
- 3 Transmisión de bits por un medio de transmisión**
- 4 Acceso a un medio compartido
- 5 Gestión de Errores de Transmisión
- 6 Protocolo Ethernet
- 7 Referencias

# Medios de Transmisión

- **Magnéticos:** Camión cargado de DVDs o discos duros (a veces es la forma más rápida de llevar a otro lugar cantidades ingentes de información: ¡piensa en la fórmula!).
- **Cable de Pares Trenzado:** UTP-5
- **Cable coaxial:** Fino, grueso
- **Fibra Óptica:** Fibras monomodo, multimodo
- **Inalámbricos:** Wi-Fi, 4G, 5G, Bluetooth, Satélite

# Transmisión Digital y Transmisión Analógica

- Los ordenadores tienen la información que quieren transmitir ya en binario (digital).
- Pueden transmitirla por medios diseñados para transmitir información digital o por medios diseñados para transmitir información analógica:
  - **Transmisión Digital:** Se transmiten los datos binarios directamente por el medio de transmisión. Distintos niveles de tensión (voltios) indican los ceros o los unos.
  - **Transmisión Analógica:** La información binaria se “modula” para transmitirla por un medio analógico: se transmite siempre una senoide que se va variando en amplitud y/o frecuencia y/o fase para indicar los ceros y unos.

# Contenidos

- 1 Introducción
- 2 Latencia y Ancho de Banda
- 3 Transmisión de bits por un medio de transmisión
- 4 Acceso a un medio compartido**
- 5 Gestión de Errores de Transmisión
- 6 Protocolo Ethernet
- 7 Referencias

# Subnivel MAC

- En la terminología OSI, el nivel de enlace se dividía en 2 partes:

Nivel de Red
LLC (Subnivel de Control del Enlace Lógico)
MAC (Subnivel de Control de Acceso al Medio)
Nivel Físico

MAC: se encarga del acceso a un medio de transmisión compartido por varias máquinas.

LLC: se encarga de la gestión de los errores de transmisión.

- El término MAC ha trascendido al propio modelo OSI y se utiliza muchas veces de forma informal para referirse a las tarjetas de red o a sus direcciones.



# El problema del acceso al medio

¿Cómo y cuándo asignar el canal físico a las distintas máquinas que lo comparten y quieren acceder a él?

Soluciones:

- **Asignación estática**: Se reparte el canal en el **tiempo** (TDM) o en **frecuencia** (FDM). Bueno para tráficos pesados y constantes, pero malo para ráfagas (lo habitual).
- **Asignación dinámica**: No está prefijado el reparto. Trata de aprovechar mejor el canal:
  - **Acceso por contienda**: Las máquinas compiten por usar el medio. Si coinciden dos o más a la vez: **colisión**. Ej: **CSMA/CD**, utilizado en Ethernet.
  - **Acceso por reserva**: Las máquinas pueden hacer reservas para poder usar el canal en exclusiva durante un tiempo.

# Contenidos

- 1 Introducción
- 2 Latencia y Ancho de Banda
- 3 Transmisión de bits por un medio de transmisión
- 4 Acceso a un medio compartido
- 5 Gestión de Errores de Transmisión**
- 6 Protocolo Ethernet
- 7 Referencias

# Tipos de Errores de Transmisión

- Dos tipos de errores:
    - al menos un bit de una trama ha cambiado
    - una trama entera se ha perdido
  - Las tramas que contienen bits erróneos:
    - Obligatoriamente tienen que **detectarse** en este nivel
    - Opcionalmente pueden **corregirse** en este nivel:
      - de forma **automática**
      - mediante **retransmisión**
- (pero en Ethernet sobre cable o fibra no se hace)

# Contenidos

- 1 Introducción
- 2 Latencia y Ancho de Banda
- 3 Transmisión de bits por un medio de transmisión
- 4 Acceso a un medio compartido
- 5 Gestión de Errores de Transmisión**
  - Detección de errores
  - Corrección de errores
- 6 Protocolo Ethernet
- 7 Referencias

# Detección de errores

- Se **introduce redundancia** en los bits a transmitir con el objeto de poder detectar en recepción cuándo una trama ha llegado con errores.
- Primera aproximación: añadir a los datos un **Bit de Paridad**:
  - Se añade 1 bit a los datos de forma que el total de “unos” enviados en una trama sea siempre par (paridad par).

Bit de  
paridad par

0111000110101011 1

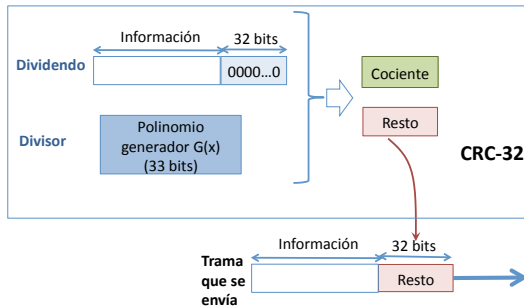
- Se detectarán errores de 1 solo bit en la trama, y hay un 50 % de probabilidades de detectar errores de más de 1 bit en la misma trama.

# Detección de errores

## Códigos de Redundancia Cíclica (CRC) (I)

- Se consideran los patrones de bits como polinomios, y se realizan operaciones aritméticas módulo 2 con ellos. Se implementa con circuitos *hardware* sencillos.
- En emisión:
  - se añaden n ceros al final de la trama.
  - se divide la trama resultante por un polinomio generador  $G(x)$
  - el resto de esa división será el CRC.
  - se sustituyen los n ceros concatenados al final de la trama por el valor del resto de la división.

### En Emisión

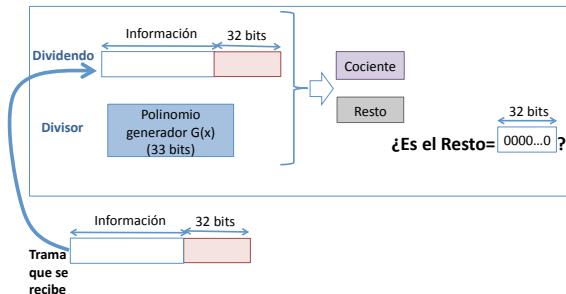


# Detección de errores

## Códigos de Redundancia Cíclica (CRC) (II)

- En recepción:
  - se divide la trama recibida por un polinomio generador  $G(x)$
  - se obtiene el resto de esa división. Si el resto es distinto de cero se considera que la trama es errónea.

### En Recepción



# Detección de errores

## Códigos de Redundancia Cíclica (CRC) (III)

En Ethernet se usa **CRC-32** (32 bits de CRC), generados con un  $G(x)$  de 33 bits:

1 0000 0100 1100 0001 0001 1101 1011 0111 = 0x104c11db7

Se demuestra que este CRC-32 detecta:

- Todos los errores simples y dobles (en 1 o 2 bits seguidos erróneos)
- Todos los errores en un número impar de bits
- Errores de 1 ráfaga de longitud  $\leq 32$  bits
- Errores de 1 ráfaga de longitud 33 bits, excepto la propia ráfaga del polinomio generador.
- Errores del 99.9999999767 % de patrones posibles en una ráfaga de longitud  $\geq 34$  bits



# Contenidos

- 1 Introducción
- 2 Latencia y Ancho de Banda
- 3 Transmisión de bits por un medio de transmisión
- 4 Acceso a un medio compartido
- 5 Gestión de Errores de Transmisión**
  - Detección de errores
  - Corrección de errores**
- 6 Protocolo Ethernet
- 7 Referencias

# Corrección de errores

## Corrección automática de errores (I)

- Puede introducirse **aún más redundancia** en los datos que se envían para, en caso de error, poder “suponer” cuáles eran los datos originales, y **corregir automáticamente los errores**.
- Idea Básica (códigos Hamming):
  - sólo ciertos patrones de bits son “posibles”
  - si se recibe un patrón “imposible”, se supone que el que se quería enviar es aquel “posible” que más se le parezca.

# Corrección de errores

## Corrección automática de errores (II)

Ejemplo:

- ❶ Patrones posibles: 0000000000, 0000011111, 1111111111, 1111100000
- ❷ Se envía: 0000011111
- ❸ Se recibe: 0000000111
- ❹ Se corrige a 0000011111

Si al transmitir 0000011111 hubiera habido 3 errores, y llegado 0000000011, se hubiera corregido incorrectamente a 0000000000.

Se desaprovecha mucho la capacidad del medio, pero esta técnica se utiliza cuando se da una de estas dos situaciones:

- no se puede pedir retransmisión
- “sobra” ancho de banda

# Corrección de errores

## Retransmisión de tramas

- La otra forma de resolver los errores de transmisión es:
  - detectar si una trama tiene errores (por ejemplo, con CRC)
  - descartar las tramas con errores
  - informar al emisor de alguna forma de las tramas descartadas
  - retransmitir (el emisor) las tramas errores descartadas
- Si el nivel de enlace es sobre un medio guiado (cable, fibra) las tramas erróneas se descartan pero no se retransmiten, dejando la retransmisión al nivel de transporte. En ese tema veremos cómo se hacen estas retransmisiones.

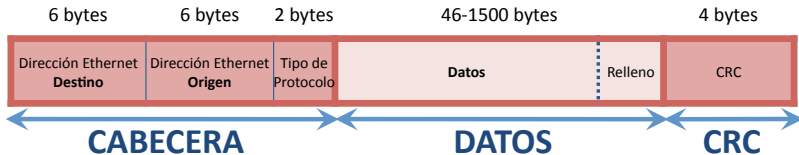
# Contenidos

- 1 Introducción
- 2 Latencia y Ancho de Banda
- 3 Transmisión de bits por un medio de transmisión
- 4 Acceso a un medio compartido
- 5 Gestión de Errores de Transmisión
- 6 Protocolo Ethernet**
- 7 Referencias

# Ethernet

- Diseñado originalmente por Xerox, DEC e Intel, 1973
- Normalizado en 1983. IEEE 802.3
- Originalmente pensada para medios compartidos con acceso mediante CSMA/CD y velocidades de hasta 10 Mbps
  - Nivel Físico: Código Manchester, niveles de  $+0.85V$  y  $-0.85V$ .
    - Cada bit codificado contiene una transición en la mitad del intervalo de duración de los bits. Una transición de negativo a positivo representa un 1 y una transición de positivo a negativo representa un 0.

# Formato de trama Ethernet



- Las unidad de datos que transmite Ethernet se llama **trama**, en inglés: *frame*
- Las tramas Ethernet tienen tamaño variable:
  - Tamaño mínimo: 64 bytes (con 46 bytes de datos + relleno)
  - Tamaño máximo: 1518 bytes (con 1500 bytes de datos)

# Campos de la trama Ethernet (I)

**Direcciones destino y origen:** 6 bytes.

- La dirección de destino es el primer campo de la trama Ethernet para que una estación sepa rápidamente si una trama es para ella o no.
- Se representan en hexadecimal, cada byte separado por el carácter ":". Ejemplo:

1001 1000	1110 0111	1111 0100	1110 1111	0010 0001	1101 1001
98	e7	f4	ef	21	d9

98:e7:f4:ef:21:d9

- Los tres primeros bytes identifican al fabricante de la tarjeta de red (OUI, Organizationally Unique Identifier) y los últimos 3 bytes identifican la tarjeta de red (NIC, Network Interface Card).

$\underbrace{98 : e7 : f4}_{\text{OUI}} : \underbrace{ef : 21 : d9}_{\text{NIC}}$



# Campos de la trama Ethernet (II)

Direcciones destino y origen: 6 bytes.

- Si todos los bits de destino son 1, la trama será entregada a todas las estaciones de la subred (*broadcast*):

ff:ff:ff:ff:ff:ff

- Bits con significado especial:

xxxx xx(U/L)(I/G)	xxxxxxxx	xxxxxxxx	xxxxxxxx	xxxxxxxx	xxxxxxxx
-------------------	----------	----------	----------	----------	----------

- Bit (U/L), si es 0 es una dirección universal (asignada por un fabricante con OUI), si es 1 es local (asignada de forma manual).
- Bit (I/G): si es 0 es una dirección individual, si es 1 es una dirección de grupo: la de broadcast (ff:ff:ff:ff:ff:ff) o una dirección de multicast

# Campos de la trama Ethernet (III)

- **Tipo:** Indica el Protocolo encapsulado dentro del campo de Datos:
  - **0x0800:** datagrama IP
  - **0x0806:** mensaje ARP
- **Datos:** Entre 0 y 1500 bytes.
- **Relleno:** La norma obliga a que toda trama sea  $\geq 64$  bytes, es decir, que contenga al menos 46 bytes de datos. Si hay menos de 46 bytes de datos para transmitir, dichos datos se acompañan de bytes de relleno: entre 0 y 46 bytes de relleno, para que entre Datos y Relleno haya al menos 46 bytes.

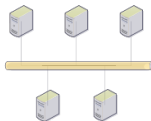
Ejemplo: el tamaño de los mensajes de ARP es fijo, 28 bytes. Por tanto es necesario que las tramas que los contengan lleven un relleno de 18 bytes, que el receptor descartará.

# Campos de la trama Ethernet (IV)

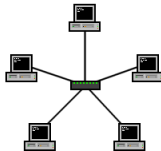
- **CRC:** 32 bits de Control de Redundancia Cíclica, para la detección de errores:
  - El transmisor calcula el CRC de los bits de datos, y lo coloca en la trama.
  - El receptor calcula el CRC de la trama recibida y decide si los datos han sido modificados por ruido en el cable y en ese caso, se descarta la trama.
  - Como en una Ethernet de cable los errores de transmisión son poco probables, no se solicita retransmisión de las tramas que se descartan. Estas tramas perdidas por errores de transmisión se recuperarán (junto con las que se pierden en el nivel de red por congestión) en el nivel de transporte si se usa un protocolo fiable como TCP.

# Topologías físicas de conexión en Ethernet

- **Ethernet en Bus**: todas las estaciones se conectan al mismo cable físico (utilizando conectores en forma de T).



- **Ethernet en Estrella**: las estaciones se conectan a través de un dispositivo de interconexión (hub o switch).



# Tecnologías Ethernet

Tecnología	Velocidad de transmisión	Tipo de cable	Distancia máxima	Topología
<b>ETHERNET</b>				
10Base2	10 Mbit/s	Coaxial	185 m	Bus (Conector T)
10BaseT	10 Mbit/s	UTP <sup>1</sup> cat3	100 m	Estrella (Hub/Switch)
10BaseF	10 Mbit/s	Fibra óptica	2000 m	Estrella (Hub/Switch)
<b>FAST ETHERNET (802.3u)</b>				
100BaseT4	100 Mbit/s	4 pares UTP cat3	100 m	Estrella (Hub/Switch)
100BaseTX	100 Mbit/s	2 pares UTP cat5	100 m	Estrella (Hub/Switch)
100BaseFX	100 Mbit/s	2 Fibras ópticas	2000 m	No hubs
<b>GIGABIT ETHERNET (802.3z)</b>				
1000BaseT	1 Gbit/s	UTP cat5e, cat6	100 m	Estrella (switch)
1000BaseSX	1 Gbit/s	Fibra óptica	550 m	Estrella (switch)
1000BaseLX	1 Gbit/s	Fibra óptica	5000 m	Estrella (switch)
<b>10GIGABIT ETHERNET (802.3ae)</b>				
10GBaseT	10 Gbit/s	UTP cat6, cat7	<100m	Estrella (switch)
10GBaseSR	10 Gbit/s	Fibra óptica	300m	Estrella (switch)
10GBaseLR	10 Gbit/s	Fibra óptica	10km	Estrella (switch)
10GBaseER	10 Gbit/s	Fibra óptica	40km	Estrella (switch)

- Otros incluso más rápidos: 40GBase, 100GBase, 200GBase, 400GBase

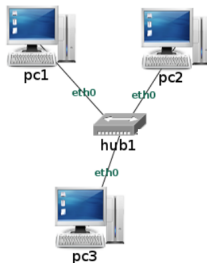
<sup>1</sup> Unshielded Twisted Pair

# Interconexión de dispositivos con Ethernet

- Actualmente no se utiliza la topología física en bus y la interconexión de redes se realiza en estrella a través de dispositivos de interconexión.
- La interconexión en el nivel de enlace TCP/IP se realiza a través de dos dispositivos:
  - **concentradores** (*hubs*)
  - **conmutadores** (*switches*)

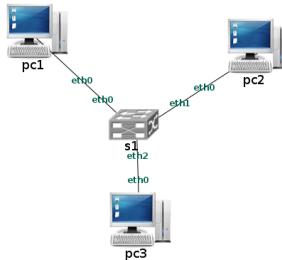
# Concentradores (hubs)

- Es un dispositivo que recibe una señal por un puerto y copia esa misma señal por el resto de puertos.
- El hub no puede gestionar 2 tramas que se reciban simultáneamente en 2 o más puertos. Por tanto, hay colisión si 2 estaciones transmiten a la vez.
- Físicamente el hub configura una red con topología en estrella pero desde el punto de vista de funcionamiento lógico el hub ofrece un servicio equivalente al bus, donde todas las estaciones conectadas a dicho bus reciben el mismo tráfico.



# Conmutadores (switches)

- Exteriormente muy parecidos a los concentradores, pero de comportamiento muy diferente.
- Almacenan internamente las tramas entrantes en *buffers* (memoria), de los cuáles van sacando para su reenvío. No se producen colisiones.
- Un switch **reconoce el formato de trama Ethernet** y utiliza los campos de las tramas que recibe:
  - Utiliza la dirección Ethernet origen para aprender que una máquina se encuentra en un determinado puerto, dicho aprendizaje se almacena en la **tabla de direcciones aprendidas del switch**.
  - Utiliza la dirección Ethernet destino para reenviar la trama por un determinado puerto (si lo había aprendido previamente). Si el switch no había aprendido la dirección Ethernet destino previamente, deberá enviarlo por todos los puertos (en este caso se comporta como un hub).



- El comportamiento de un switch es muy diferente al hub. El switch no ofrece un comportamiento de bus lógico.



# Switch: Aprendizaje de direcciones (1)

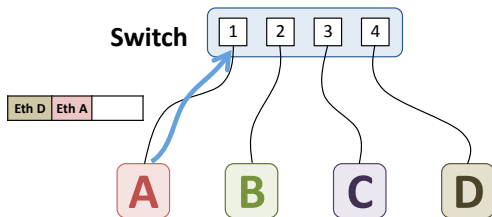


Tabla de direcciones aprendidas por el switch

Ethernet	Puerto

- El *switch* está recién arrancado
- A envía una trama a D

# Switch: Aprendizaje de direcciones (2)

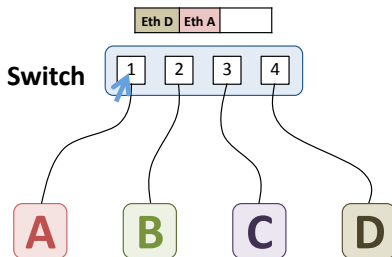
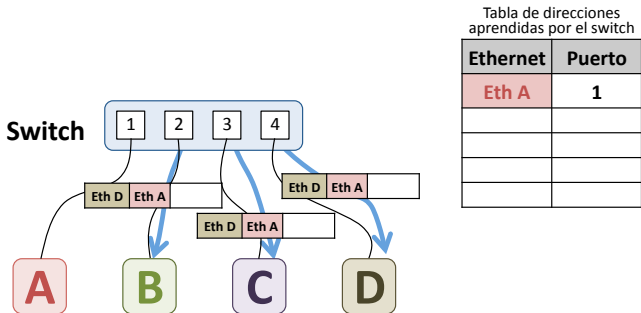


Tabla de direcciones aprendidas por el switch

Ethernet	Puerto
Eth A	1

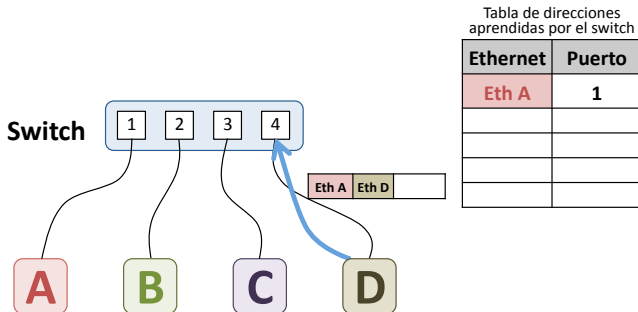
- El *switch* aprende que A está en el puerto 1
- Aún no sabe dónde está D

# Switch: Aprendizaje de direcciones (3)



- El *switch* envía la trama por los puertos 2, 3 y 4
- B y C descartarán la trama por no ser para ellos.

# Switch: Aprendizaje de direcciones (4)



- D envía ahora una trama a A

# Switch: Aprendizaje de direcciones (5)

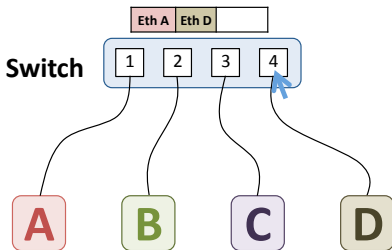
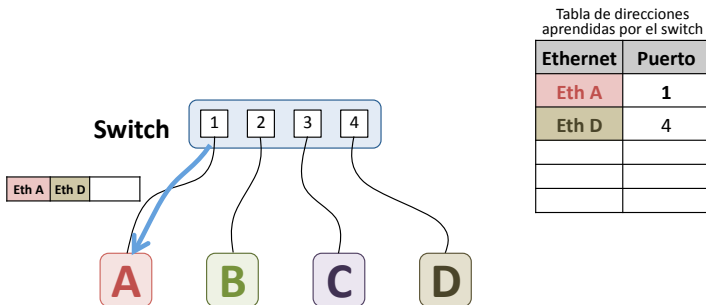


Tabla de direcciones aprendidas por el switch

Ethernet	Puerto
Eth A	1
Eth D	4

- El *switch* aprende que D está en el puerto 4

## Switch: Aprendizaje de direcciones (6)



- Como el *switch* ya sabe dónde está A, reenvía la trama sólo por el puerto 1.

# Aprendizaje y reenvío del switch

- Las entradas en la **tabla de direcciones aprendidas** caducan si no se utilizan durante un tiempo. El tiempo que una dirección Ethernet lleva almacenado en la tabla se guarda en un contador *ageing timer* (como máximo 5 minutos, valor por defecto).
- Funciones principales del switch:
  - **Aprendizaje**: el switch aprende las direcciones Ethernet origen en las tramas que recibe asociándolas a una de sus interfaces y guardando esta información en su tabla de direcciones aprendidas. Si esa dirección ya la tiene aprendida, reinicia el contador *ageing timer*.
  - **Reenvío**: el switch reenvía en función de la tabla de direcciones aprendidas. Si la dirección Ethernet destino de la trama es Broadcast o no la tiene en su tabla, reenvía la trama por todas las interfaces salvo por donde le ha llegado.

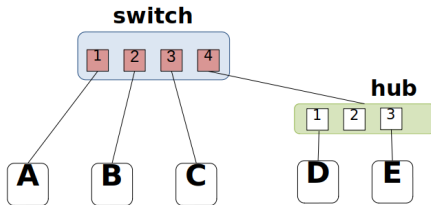
# Tabla de direcciones aprendidas

- Las direcciones aprendidas se mantienen un determinado tiempo en la tabla de direcciones aprendidas, transcurrido dicho tiempo la entrada se borra (por defecto el temporizador es de 5 minutos):
  - Si se recibe una trama cuya dirección Ethernet origen ya se encuentra en la tabla de direcciones aprendidas, se reinicia el temporizador de dicha entrada.
  - Si se recibe una trama cuya dirección Ethernet origen ya se encuentra en la tabla de direcciones aprendidas pero el puerto aprendido es diferente al puerto por el que se ha recibido, se borra la entrada antigua y se añade la nueva información.

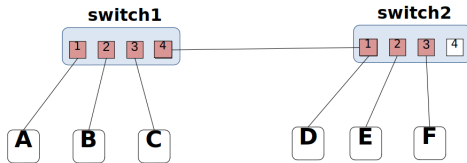


# Aprendizaje de más de una dirección Ethernet por puerto

- Switch conectado a hub



- Switch conectado a switch



# Contenidos

- 1 Introducción
- 2 Latencia y Ancho de Banda
- 3 Transmisión de bits por un medio de transmisión
- 4 Acceso a un medio compartido
- 5 Gestión de Errores de Transmisión
- 6 Protocolo Ethernet
- 7 Referencias**

# Referencias

- A. Tanenbaum, **Redes de Computadores (4ª ed.)**: Cap. 3, Cap. 4 (4.1, 4.2, 4.3, 4.3, 4.7).
- J. F. Kurose, K. W. Ross, **Computer Networking: A Top-Down Approach (4th ed)**: Cap. 5 (5.1, 5.2, 5.3, 5.4, 5.5, 5.7), Cap. 6 (6.1, 6.2, 6.3.1, 6.3.2, 6.3.3).