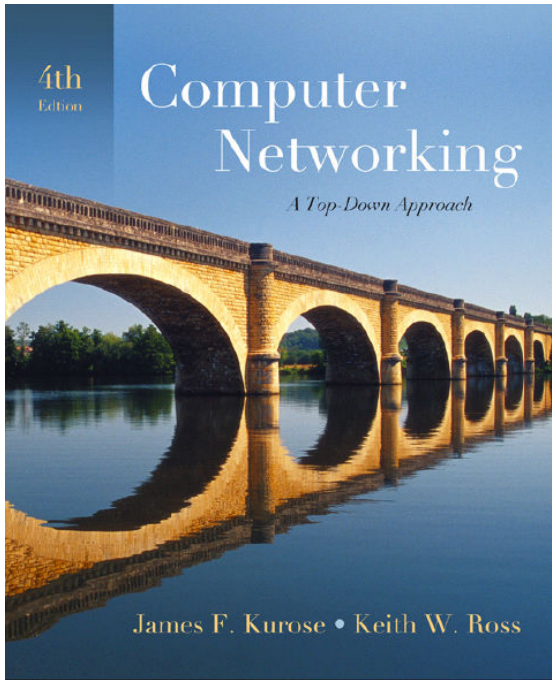
Introducción a las Redes de Computadores

Capítulo 5
Capa de Enlace y LANs

Nota acerca de las transparencias del curso:

Estas transparencias están basadas en el sitio web que acompaña el libro y han sido modificadas por los docentes del curso.



Computer Networking: A Top Down Approach 4th edition. Jim Kurose, Keith Ross Addison-Wesley, July 2007.

Capítulo 5: La Capa de Enlace de Datos

Objetivos:

- Entender los principios detrás de los servicios de la capa de enlace de datos:
  - detección de errores; corrección
  - compartir un canal de *broadcast*: acceso múltiple
  - direccionamiento de capa de enlace
  - transferencia de datos confiable, control de flujo

- Algunas tecnologías de Capa de Enlace

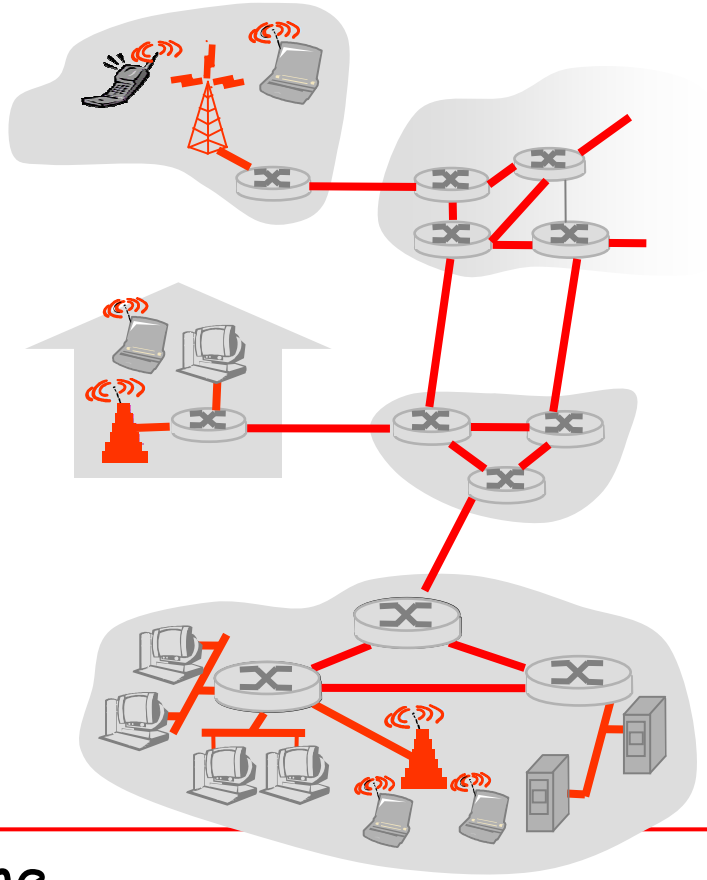
Capa de Enlace

- 5.1 Introducción y servicios
- 5.2 Detección y corrección de errores
- 5.3 Protocolos de acceso múltiple
- 5.4 Direccionamiento de Capa de Enlace
- 5.5 Ethernet
- 5.6 Switches de Capa de Enlace
- 5.7 PPP

Capa de Enlace: Introducción

Algo de terminología:

- hosts y routers son ***nodes***
- los canales de comunicación que conectan nodos adyacentes a través de caminos de comunicación son ***links***
  - enlaces cableados
  - enlaces inalámbricos
  - LANs
- la PDU de capa 2 es el ***frame***, que encapsula un datagrama



la capa de enlace de datos tiene la responsabilidad de transferir datagramas desde un nodo a otro nodo adyacente, a través de un *link*

Capa de enlace: contexto

- los datagramas son transferidos por diferentes protocolos de enlace sobre diferentes enlaces:
  - p.e., Ethernet en el primer enlace, Frame Relay en los enlaces intermedios, 802.11 en el último enlace
- cada protocolo de enlace brinda diferentes tipos de servicios
  - p.e., puede o no proveer **rdt** (*reliable data transfer*) sobre el enlace

Analogía transporte

- Viaje desde Montevideo a Mar del Plata
  - remise: Montevideo a Carrasco
  - avión: Carrasco a Aeroparque
  - ómnibus: Aeroparque a Mar del Plata
- turista = datagrama
- segmento de transporte = enlace de comunicación
- modo de transporte = protocolo de capa de enlace
- agencia de viaje = algoritmo de enrutamiento

Servicios de Capa de Enlace

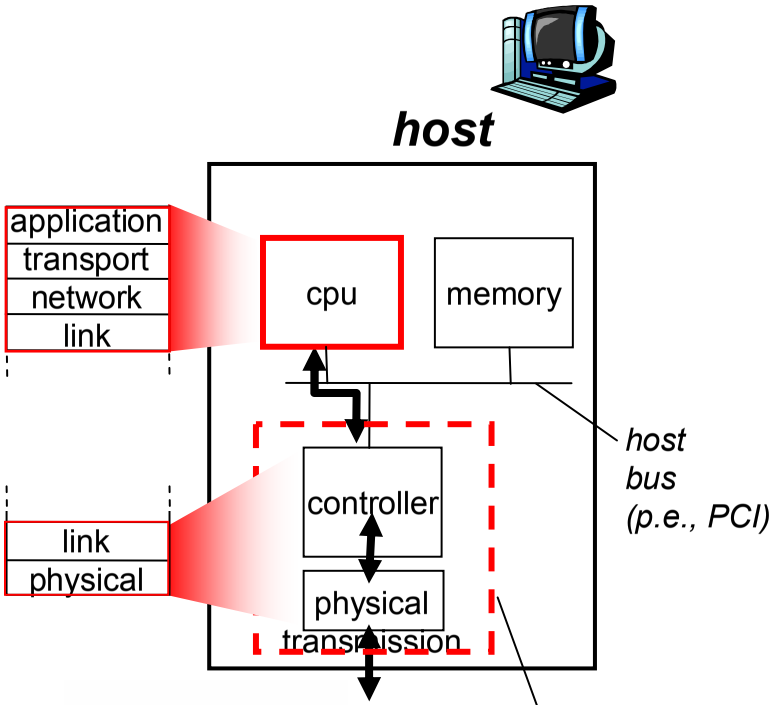
- *entramado (framing):*
  - encapsulado del datagrama en la trama, agregando encabezado (*header*) y cola (*trailer*)
- *acceso al enlace:*
  - acceso al canal si es un medio compartido (*Medium Access Control*)
  - direcciones "MAC" *addresses* utilizadas en los encabezados de las tramas para identificar el origen y el destino
    - distintas de las direcciones IP
- *entrega confiable:*
  - entre nodos adyacentes
  - ¡ya aprendimos cómo hacer ésto (teo Capa de Transp.)!
  - rara vez utilizados en enlaces de pocos errores (fibra óptica, algunos pares trenzados)
  - enlaces inalámbricos: alta tasa de error
    - **P**: ¿Por qué confiabilidad a nivel de enlace y *end-end*?

Servicios de Capa de Enlace (más)

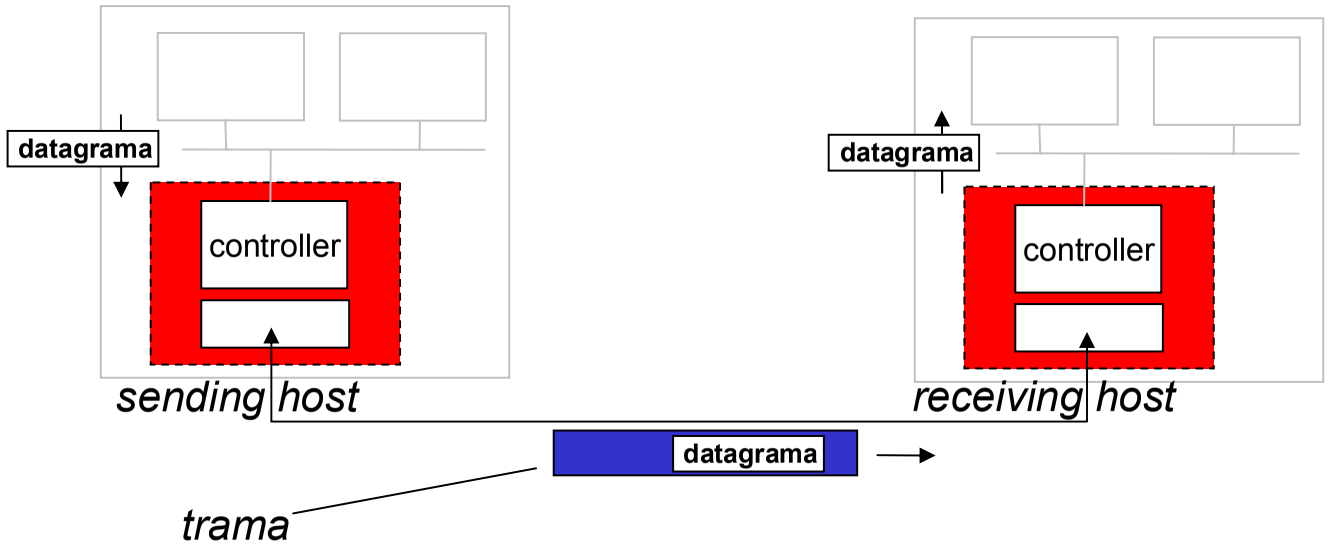
- *control de flujo:*
  - acuerdo entre los nodos emisor y receptor (aquí, adyacentes)
  - Recordar: *buffers* y capacidad de procesamiento
- *detección de errores:*
  - errores causados por atenuación de la señal, por ruido.
  - el receptor detecta presencia de errores:
    - señaliza al emisor para una retransmisión o descarta la trama
- *corrección de errores (FEC: Forward Error Correction):*
  - el receptor identifica *y corrige* el/los error/es en bit/s sin necesidad de retransmisión
- *half-duplex and full-duplex:*
  - con *half-duplex*, los nodos en los extremos del enlace pueden transmitir, pero no al mismo tiempo

¿Dónde está implementada la Capa de Enlace?

- En todos los *hosts*
- En el adaptador de red (*Network Interface Card*: NIC)
  - Tarjetas Ethernet, PCMCIA, 802.11
  - Implementa las capas de Enlace y Física (como mínimo)
- Incorporadas a los buses del sistema de los *hosts*
- combinación de *hardware, software, firmware*



Comunicación de adaptadores



- lado emisor:
  - encapsula el datagrama en una trama
  - agrega bits de chequeo de error, rdt, control de flujo, etc.
- lado receptor:
  - busca por errores, rdt, control de flujo, etc
  - extrae el datagrama y lo pasa a las capas superiores

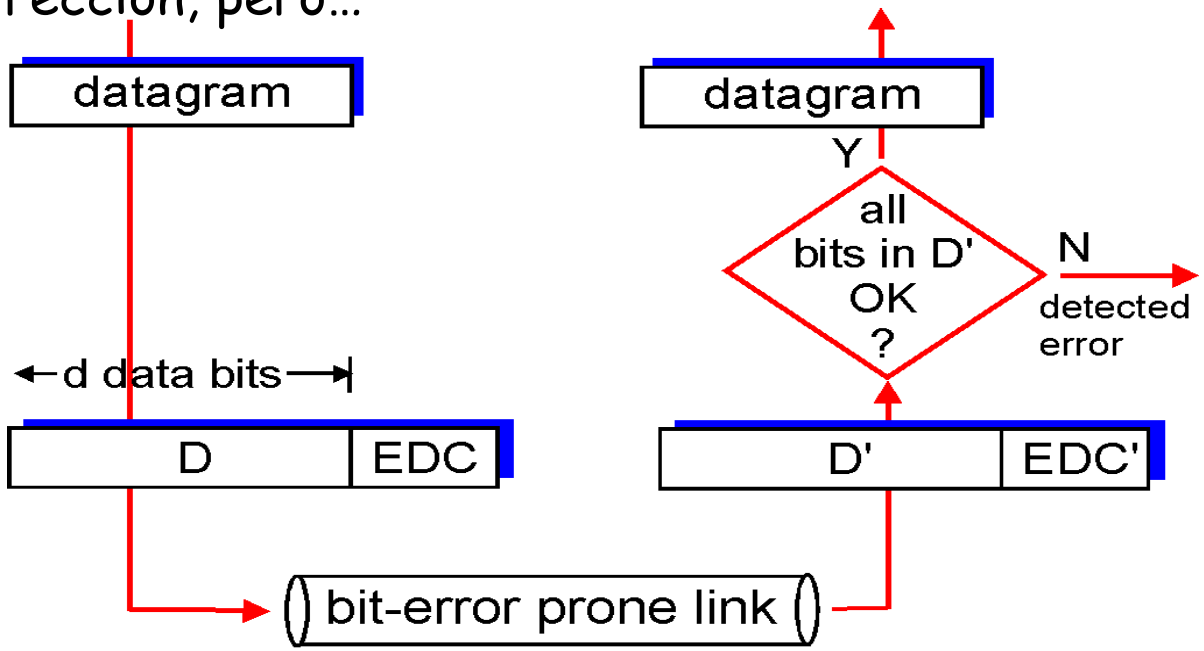
Capa de Enlace

- 5.1 Introducción y servicios
- 5.2 Detección y corrección de errores
- 5.3 Protocolos de acceso múltiple
- 5.4 Direccionamiento de Capa de Enlace
- 5.5 Ethernet
- 5.6 Switches de Capa de Enlace
- 5.7 PPP

Detección de errores

EDC= Error Detection and Correction bits (**redundancia**)
D = Datos protegidos por chequeo de errores; puede incluir campos del encabezado
¡La detección de errores no es 100% confiable!

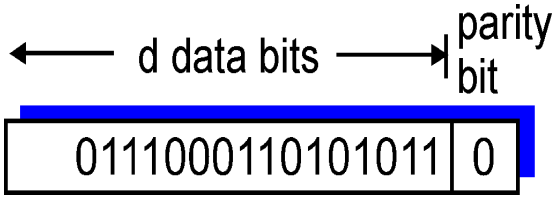
- el protocolo puede perder algunos errores
- un campo de EDC mayor proporciona mejor detección y corrección, pero…



Chequeo de paridad

Paridad de un bit:

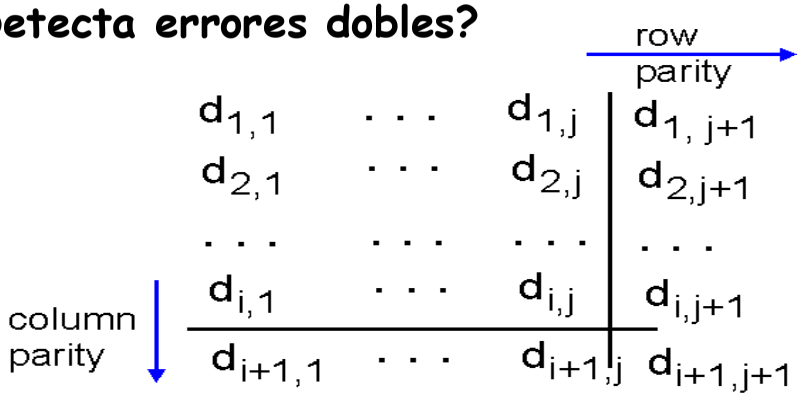
Detecta errores en 1 bit

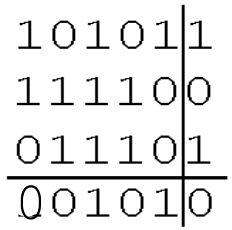


Paridad en dos dimensiones:

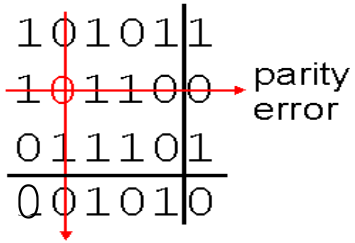
Detecta *y corrige* errores en 1 bit

¿Detecta errores dobles?





no errors



correctable single bit error

Internet checksum (suma de comprobación)

- Objetivo: detectar "errores" (bits cambiados) en el paquete transmitido (nota: *generalmente* utilizado en la capa de transporte)

- Recordar lo visto en Capa de Transporte

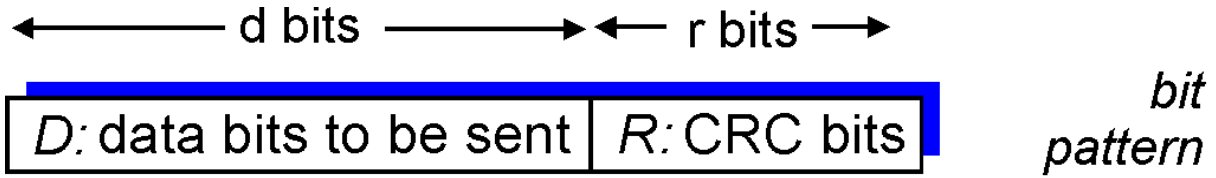
- En general es un método menos potente que el próximo que veremos

Cyclic Redundancy Check

- códigos CRC o códigos polinómicos
- ampliamente utilizado en la práctica (Ethernet, 802.11 WiFi, ATM)
- ver a los bits de datos, D, como los coeficientes de un polinomio
  - por ejemplo: 110001 es x^5+x^4+1
- Toda la aritmética que se utiliza es módulo 2 sin *carry* en las operaciones (sumas y restas equivalentes a XOR)
- elegimos un patrón de **r+1 bits** (polinomio **generador**), G, de grado **r**, que conocen el transmisor y el receptor

Cyclic Redundancy Check

- objetivo: **determinar r CRC bits, R**, tal que
  - <D,R> (concatenado) es divisible exactamente por *G*
    - D x 2^r es desplazar hacia la izquierda r bits y agregando 0s
    - D x 2^r + R es concatenarlos
  - el receptor divide <D,R> entre *G*. Si el resto es distinto de cero: ¡error detectado!



bit pattern

$D * 2^r$ XOR R

mathematical formula

Ejemplo CRC

- El emisor busca R, tal que exista Q que cumpla:

$D \cdot 2^r$ XOR R = Q . G

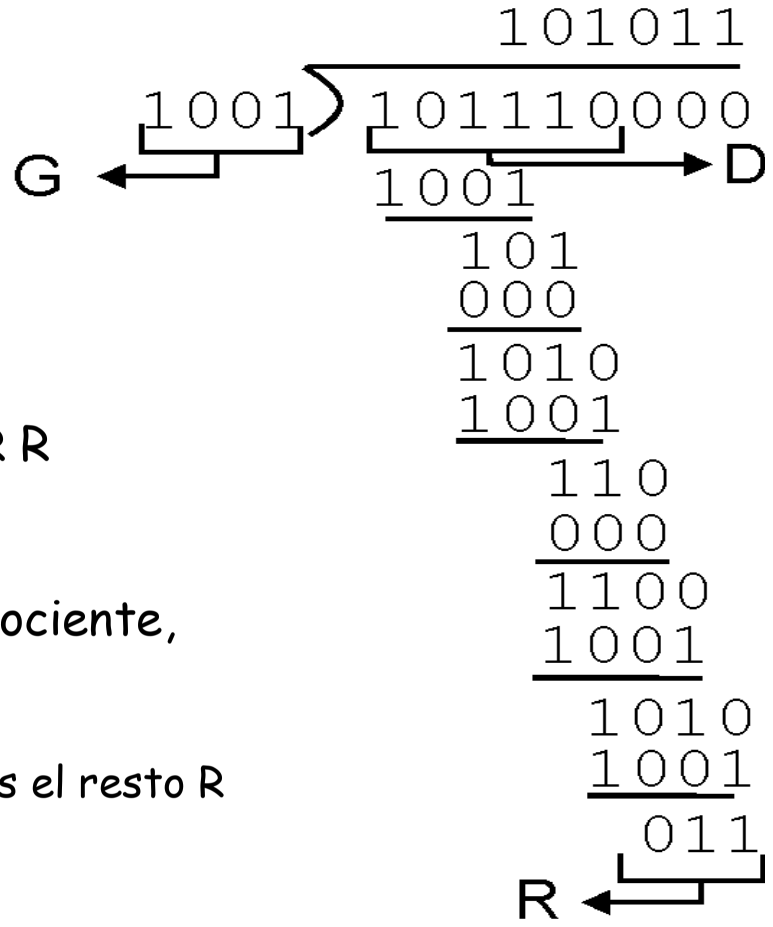
Que G divida a $D \cdot 2^r$ - R
sin resto

$D \cdot 2^r$ XOR R= Q . G
$D \cdot 2^r$ XOR R XOR R = Q . G XOR R
$D \cdot 2^r = nG + R$

$D \cdot 2^r$: dividendo, G: divisor, Q: cociente,
R: resto

- si dividimos $D \cdot 2^r$ por G, buscamos el resto R

$$R = \text{resto}\left[\frac{D \cdot 2^r}{G}\right]$$



Estándares CRC

- Existen diferentes estándares de polinomios CRC
  - CRC-8
  - CRC-12
  - CRC-16
  - CRC-32
- Pueden detectar todas las ráfagas de errores menores a r+1 bits
- Si es divisible entre x+1, detecta todos los errores impares
- Para las mayores, el poder de detección es muy alto

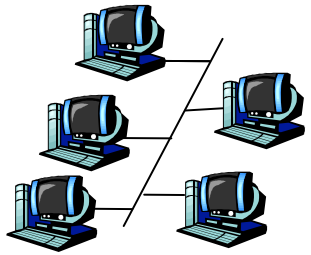
Capa de Enlace

- 5.1 Introducción y servicios
- 5.2 Detección y corrección de errores
- 5.3 Protocolos de acceso múltiple
- 5.4 Direccionamiento de Capa de Enlace
- 5.5 Ethernet
- 5.6 Switches de Capa de Enlace
- 5.7 PPP

Protocolos y enlaces de acceso múltiple

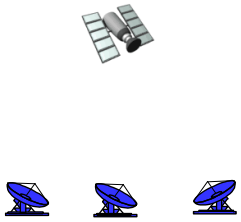
Dos tipos de enlaces:

- punto a punto
  - PPP para acceso discado
  - Enlace punto a punto entre switch Ethernet y *host*
- *broadcast* (cable o medio compartido)
  - Ethernet "legacy"
  - HFC: *Hybrid Fiber Cable*
  - 802.11: LAN inalámbrica



cable compartido (p.e., cable Ethernet)

RF compartida (p.e., 802.11 WiFi)



RF compartido (satélite)

personas en una fiesta (aire compartido)

Protocolos de acceso múltiple

- Único canal *broadcast* compartido
- Dos o más transmisiones simultáneas: interferencia
  - Colisión
    - si un nodo recibe dos o más señales al mismo tiempo
    - simultaneidad en el tiempo y en la frecuencia de dos o más tramas en el mismo medio físico

Protocolo de Acceso Múltiple

- Algoritmo distribuido que determina cómo los nodos comparten el canal, y determina cuándo el nodo puede transmitir
- La comunicación acerca de compartir el canal debe utilizar el mismo canal
  - no canal *out-of-band* para coordinación

Protocolo de acceso múltiple **ideal**

Canal *Broadcast* con velocidad R bps

1. cuando un nodo quiere transmitir, lo hará a una velocidad R.
2. cuando M nodos quieren transmitir, cada uno enviará a una velocidad promedio de R/M
3. completamente descentralizado:
   - no hay un nodo especial para coordinar las transmisiones
   - no hay sincronización de relojes, *slots*
4. simple

Protocolos MAC: taxonomía

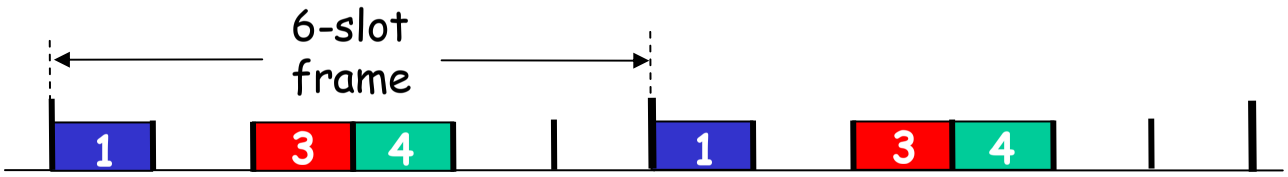
Tres grandes clases:

- Particionado del canal
  - Protocolos de arbitraje
  - divide el canal en pequeñas "piezas" (ranuras de tiempo, frequencia, código)
  - asigna una pieza a un nodo para su uso exclusivo
  - estrategia estática
  - equitativo
- Acceso Randómico
  - el canal no se divide, permite colisiones
  - "recuperación" de colisiones
  - estrategia dinámica
- "Toma de turnos"
  - Los nodos toman turnos, pero los nodos con más tramas para enviar podrían tomar turnos más largos
  - estrategia dinámica
  - estrategias de reserva o centralizada

Protocolos MAC de **particionado del canal**: TDMA

TDMA: *Time Division Multiple Access*

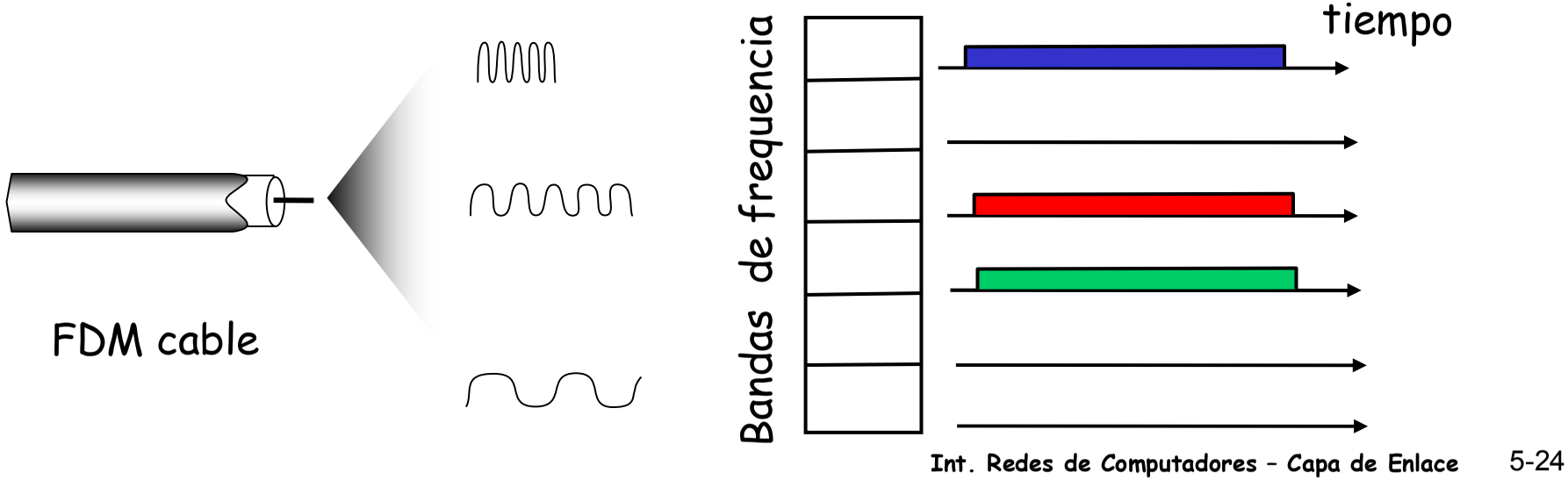
- acceso al canal rotativo
- cada estación tiene un *slot* de longitud fija (longitud = tiempo de transm. de la trama) en cada vuelta
- los *slots* sin usar quedan libres
- ejemplo: LAN con 6 estaciones, 1,3 y 4 tiene trama; los *slots* 2,5 y 6 quedan libres



Protocolos MAC de **particionado del canal**: FDMA

FDMA: *Frequency Division Multiple Access*

- el espectro del canal se divide en bandas de frecuencia
- a cada estación se le asigna una banda de frecuencia fija
- el tiempo de transmisión no utilizado en las bandas de frecuencia queda libre
- ejemplo: LAN con 6 estaciones, 1,3 y 4 tienen trama; las bandas de frequencia 2,5 y 6 están libres



Protocolos de **acceso randómico**

- cuando un nodo tiene un paquete para enviar
  - transmite a la velocidad total del canal, R
  - no existe *a priori* coordinación entre nodos
- dos o más nodos transmitiendo □ "colisión"
- protocolos MAC de acceso randómico especifican:
  - cómo detectar colisiones (directa o indirecta)
  - cómo recuperarse de las colisiones (p.e., a través de re-transmisiones retrasadas)
- ejemplos de protocolos MAC de acceso randómico:
  - ALOHA ranurado, ALOHA
  - CSMA, CSMA/CD, CSMA/CA
  - También se les conoce como sistemas de contención o sistemas de contienda

ALOHA ranurado: (Roberts 1972)

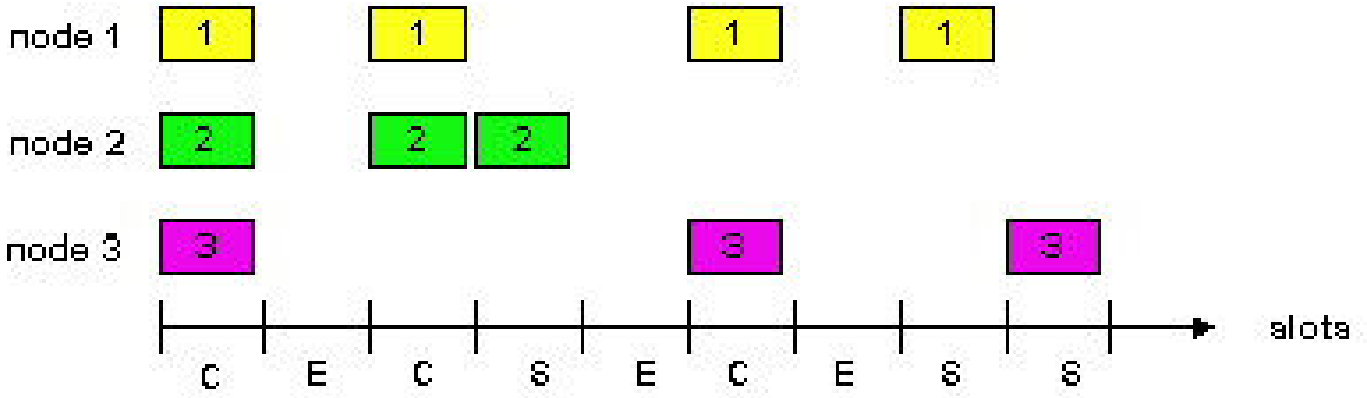
Hipótesis:

- canal de R bps
- todas las tramas tienen el mismo tamaño (L bits)
- el tiempo está dividido en *slots* de igual tamaño (L/R segundos: el tiempo para transmitir 1 trama)
- los nodos comienzan a transmitir sólo al comienzo de cada *slot*
- los nodos están sincronizados (saben cuando comienza cada *slot*)
- si 2 o más nodos transmiten en un *slot*, todos los nodos detectan la colisión antes que termine el *slot*

Operación:

- Cuando un nodo obtiene una trama nueva, la transmite en el *slot* siguiente
  - *si no hay colisión:* el nodo puede enviar una nueva trama en el siguiente *slot*
  - *si hay colisión:* el nodo retransmite la trama en cada *slot* siguiente con probabilidad **p** hasta el éxito. Ésto lo hace cada nodo involucrado en la colisión

ALOHA ranurado



Ventajas

- Un único nodo activo (con tramas para enviar) puede transmitir continuamente a la velocidad máxima del canal (R bps)
- Altamente descentralizado: sólo los *slots* necesitan estar sincronizados; cada nodo decide por sí mismo
- Muy simple

Desventajas

- colisiones, desperdicio de *slots*
- *slots* vacíos (política de transmisión probabilística)
- los nodos deberían ser capaces de detectar colisión en un tiempo menor al tiempo de transmisión del paquete
- sincronización de reloj

Eficiencia del Aloha ranurado

Eficiencia : fracción de slots exitosos en un "tiempo largo", con muchos nodos y todos con muchas tramas para enviar

- *supuesto:* **N** nodos con varias tramas (nuevas y viejas) para enviar, cada uno transmite en un *slot* con probabilidad **p**
- probabilidad que un nodo dado tenga éxito en un *slot* = $p(1-p)^{N-1}$
- probabilidad de que un nodo arbitrario tenga éxito en un *slot* = $Np(1-p)^{N-1}$
- Eficiencia para N nodos activos es $Np(1-p)^{N-1}$

- máx eficiencia: encontrar p* que maximice $Np(1-p)^{N-1}$
- tomar límite de $Np^*(1-p^*)^{N-1}$ cuando N tiende a infinito, nos da:

  Máx eficiencia = 1/e = 0,37

  $(1-1/N)^N \rightarrow 1/e$ cuando $N \rightarrow \infty$

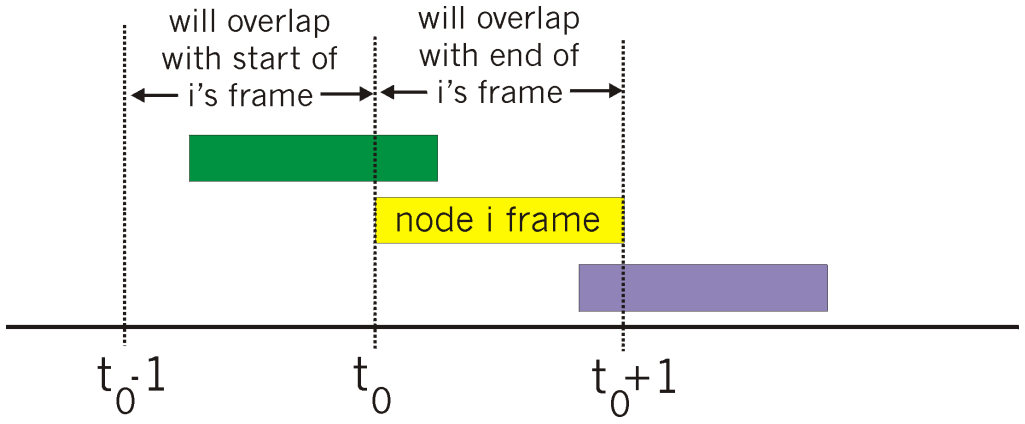
  Pasamos de R a 0,37R

- Se puede demostrar que 37% de los slots están vacíos y 26% tienen colisiones

Lo mejor posible: canal utilizado exitosamente el 37% del tiempo

ALOHA puro (no ranurado)

- Abramson (1970): ALOHAnet, ARPAnet
- Aloha sin *slots*: más simple, sin sincronismo
- Completamente descentralizado
- cuando la primer trama llega
  - transmite inmediatamente
- la probabilidad de colisión se incrementa:
  - la trama enviada en t_0 colisiona con otras tramas enviadas en $[t_0-1,t_0+1]$



Eficiencia del Aloha puro

P(éxito para un nodo dado) = P(nodo transmita) ·
P(otros nodos no transmitan en $[t_0-1,t_0]$ ·
P(otros nodos no transmitan en $[t_0,t_0+1]$

$= p \cdot (1-p)^{N-1} \cdot (1-p)^{N-1}$

$= p \cdot (1-p)^{2(N-1)}$

... calculando el p óptimo (p^*) y con N -> infinito ...

Eficiencia máx. = 1/(2e) = 0,18

Peor que el Aloha ranurado

CSMA (*Carrier Sense Multiple Access*)

CSMA: escuchar antes de transmitir

- Si el canal está libre: transmitir la trama entera
- Si el canal está ocupado: diferir la transmisión
  - volver a escuchar después de un tiempo
  - seguir escuchando hasta que quede libre y transmitir
  - seguir escuchando hasta que quede libre y transmitir con probabilidad **p**
- Analogía humana: ¡no interrumpir a los otros!

Colisiones CSMA

las colisiones pueden ocurrir:

el retardo de propagación tiene como consecuencia que dos nodos puedan no oir la transmisión del otro

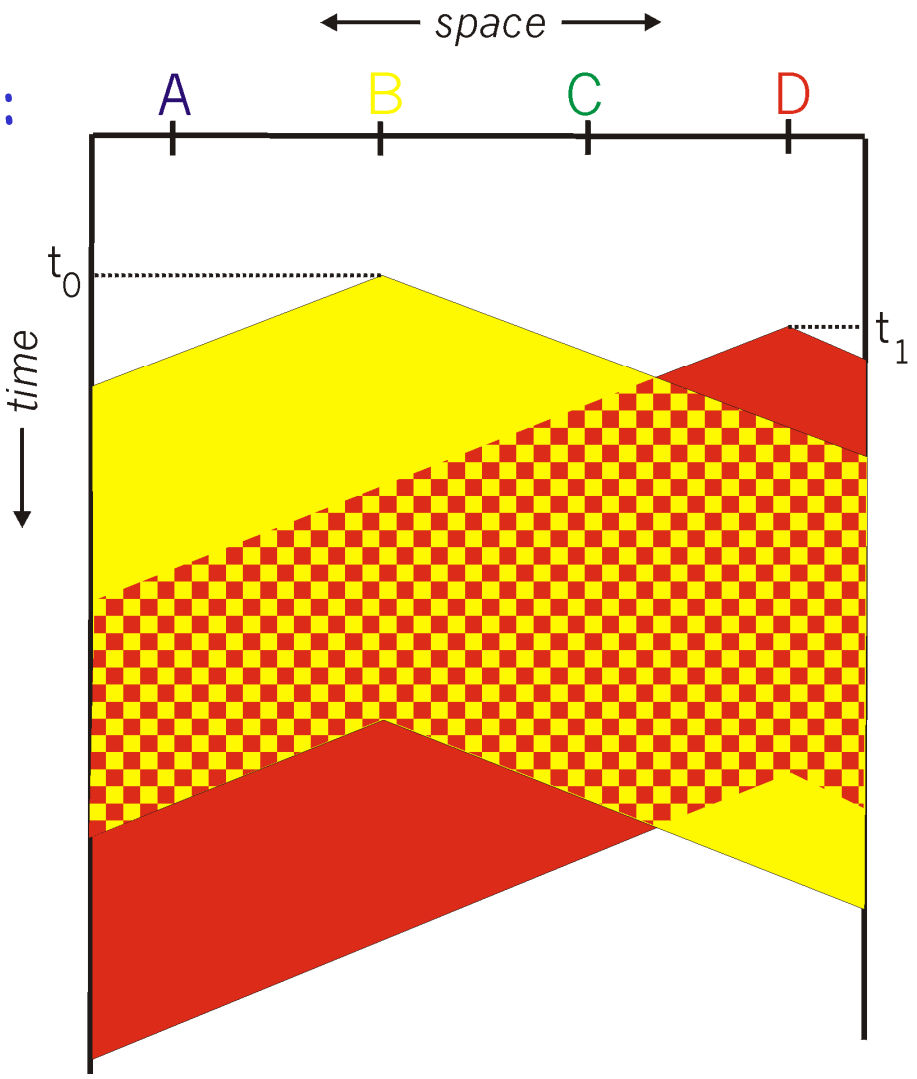
colisión:

El tiempo completo de transmisión de la trama se desperdicia

nota: factores relevantes

rol de la distancia y de la velocidad de propagación (ambos determinan el retardo de propagación) para inferir la probabilidad de colisión; además influyen la velocidad de transmisión y el largo del mensaje

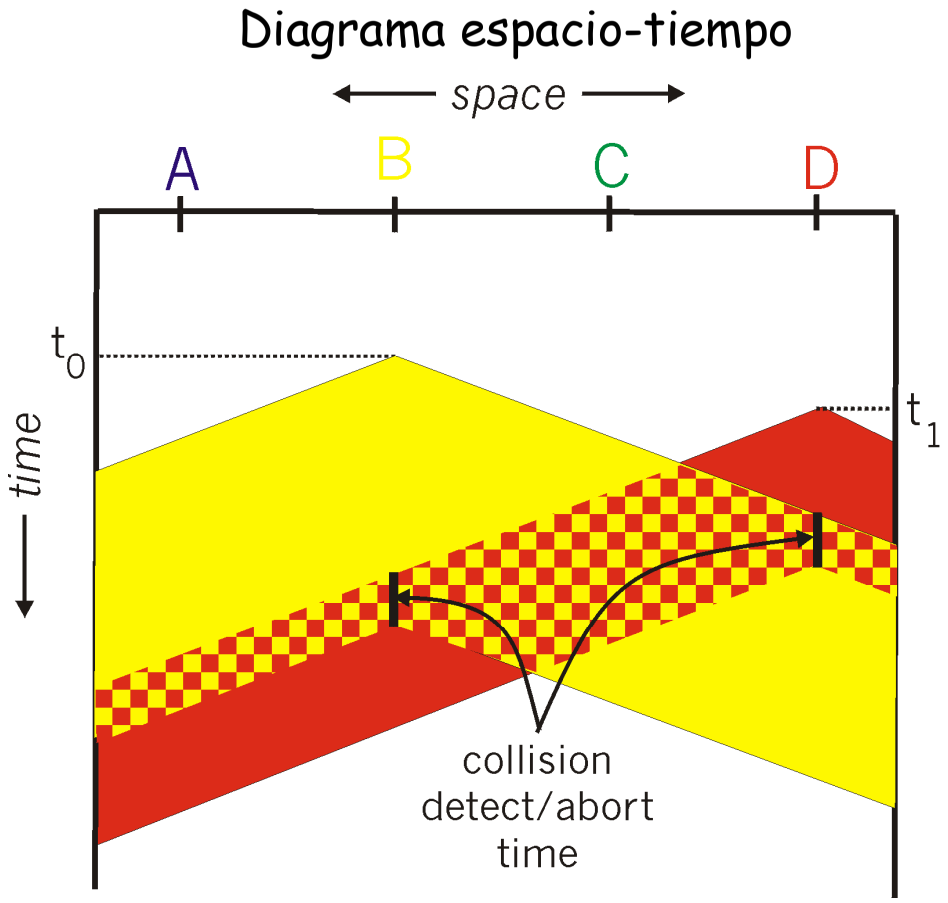
Diagrama espacio-tiempo



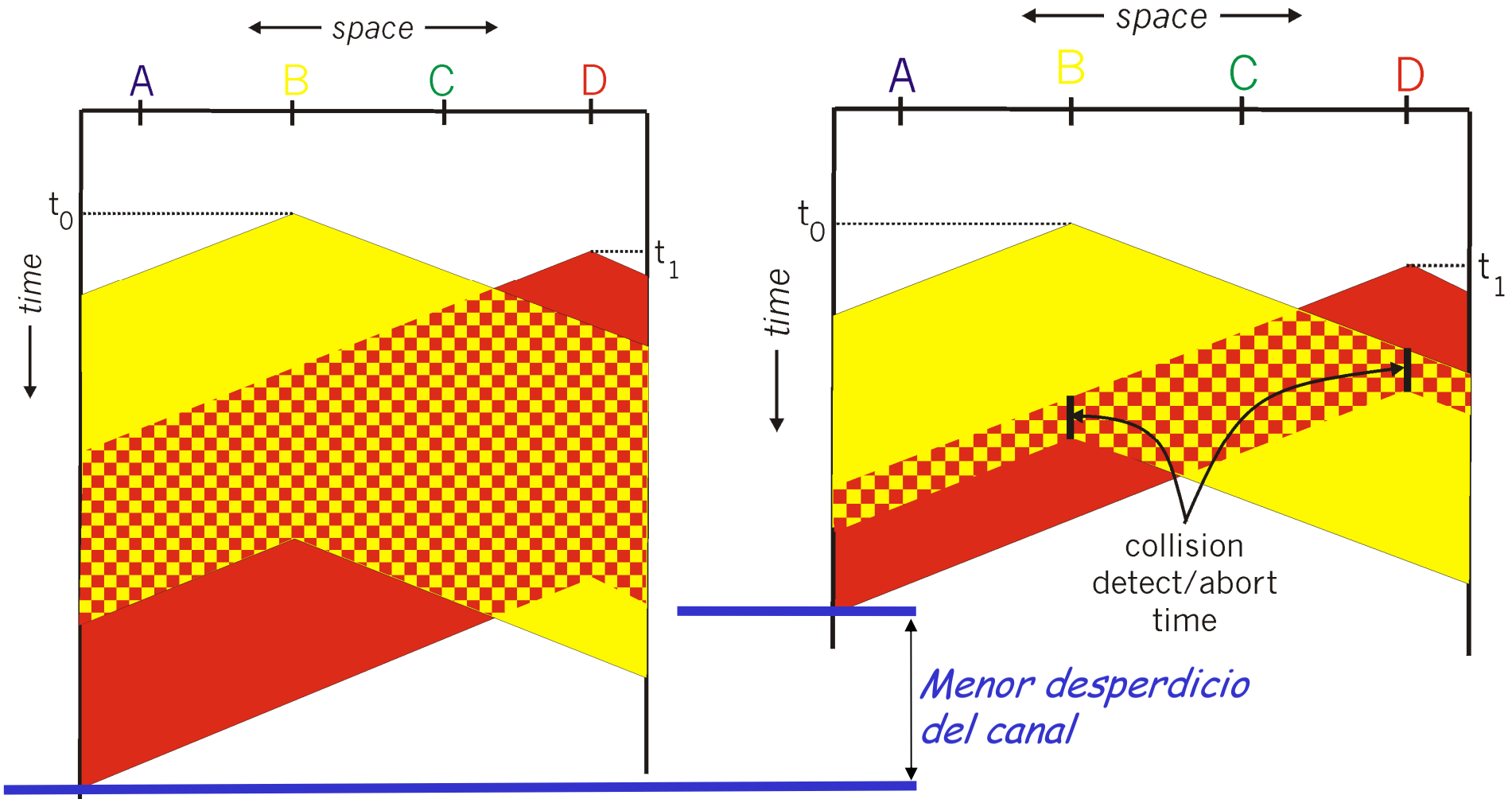
CSMA/CD (*Collision Detection*)

- CSMA/CD: si hay presencia de portadora, se difiere la transmisión, como en CSMA
  - las transmisiones que colisionan son abortadas, reduciendo el desperdicio de canal
  - colisión = desperdicio del canal
- detección de colisión:
  - relativamente fácil en LANs cableadas
  - dificil en LANs inalámbricas

CSMA/CD: Detección de Colisión



CSMA y CSMA/CD



Otro servicio de Capa de Enlace

- *En realidad, en canales tipo broadcast*
  - el uso de los medios multiacceso puede involucrar, entre otras cosas, gestionar las colisiones

Protocolos MAC "Toma de turnos"

protocolos MAC de particionado del canal:

- compartir el canal *justa* y *eficiente* a alta carga
- ineficiente a baja carga: retardo en el acceso al canal, ancho de banda 1/N asignado aún si hay un sólo nodo activo

protocolos MAC de acceso randómico

- eficiente a baja carga: un único nodo puede utilizar completamente el canal
- alta carga: *overhead* por colisión

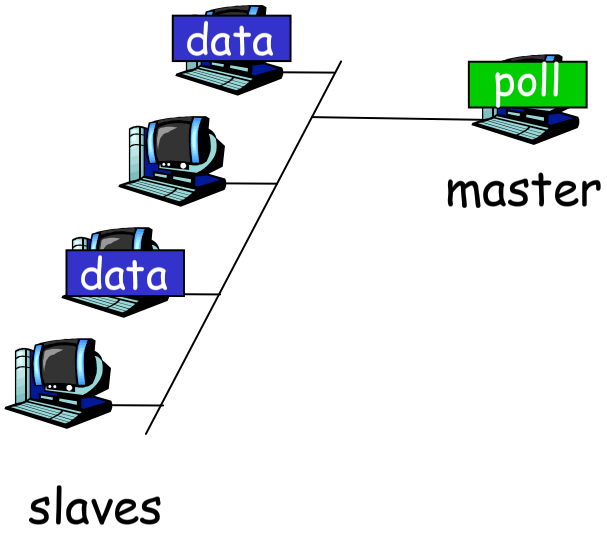
protocolos de "toma de turnos"

busca lo mejor de los dos mundos

Protocolos MAC "Tomando turnos"

Polling:

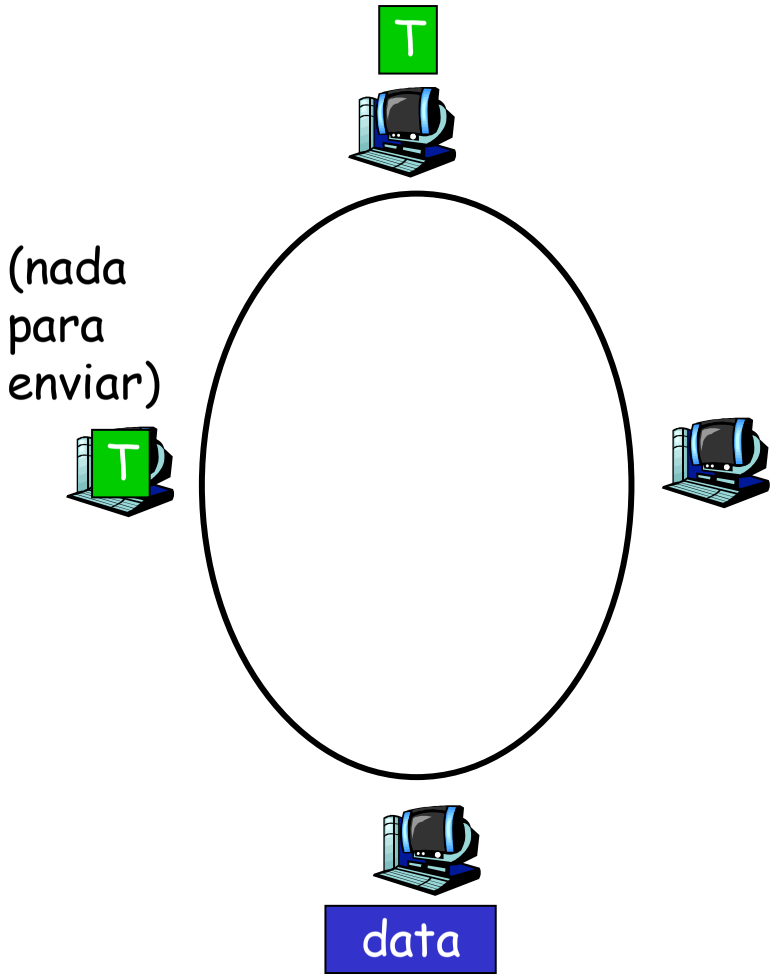
- el nodo *master* "invita" a los nodos *slaves* a transmitir en turnos
- típicamente utilizado con dispositivos *slaves* "tontos"
- sin colisiones
- determinístico
- involucra:
  - *overhead* por *polling*
  - latencia
  - único punto de falla (master)
- ejemplo
  - Bluetooth
    - IEEE 802.15
  - Un modo de operación de 802.11 (Wi Fi)



Protocolos MAC "Tomando turnos"

Paso de *token*:

- ***token*** (mensaje) de control pasado de un nodo a otro secuencialmente
- no existe un *master*
- involucra:
  - *overhead* por el *token*
  - latencia
  - único punto de falla (*token*)
- ejemplo:
  - Token Ring
    - IBM, IEEE 802.5



Resumen de protocolos MAC

- *particionado de canal,* en tiempo, frequencia
  - división en el tiempo, división en la frecuencia
- *acceso randómico* (dinámico),
  - ALOHA, S-ALOHA, CSMA, CSMA/CD
  - Escucha de portadora: fácil en algunas tecnologías (cableadas), dificil en otras (inalámbricas)
  - CSMA/CD utilizado en Ethernet
  - CSMA/CA (*Colission Avoidance*) utilizado en 802.11
- *toma de turnos*
  - *polling* desde un sitio central, pasaje de *token*
  - Bluetooth, Token Ring