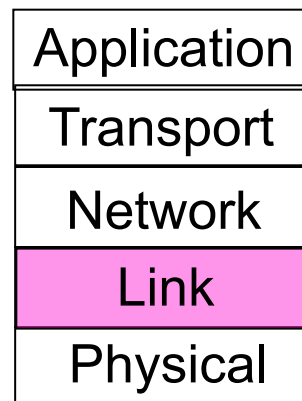


Capítulo 5

Capa de Enlace de Datos (Redes Inalámbricas)



Capa de Enlace de Datos

- **Funciones de la Capa de Enlace de Datos (CED)**
 - **Control de flujo** → control de **buffer receptor**
 - Parada y espera, Go-back-N, Selectiva
 - **Entramado (framing)** → **inicio y fin de trama**
 - Preámbulo, Bandera de inicio
 - **Detección y corrección de errores** → c/Penazzi
 - Checksum, CRC
 - **Colisiones** → **Subcapa de Control de Acceso al Medio (SCAM o MAC)** (canales de difusión *cableados/inalámbricos*)
 - CSMA/CD (Acceso Múltiple con Detección de Portadora y Detección de Colisiones) (Ethernet)

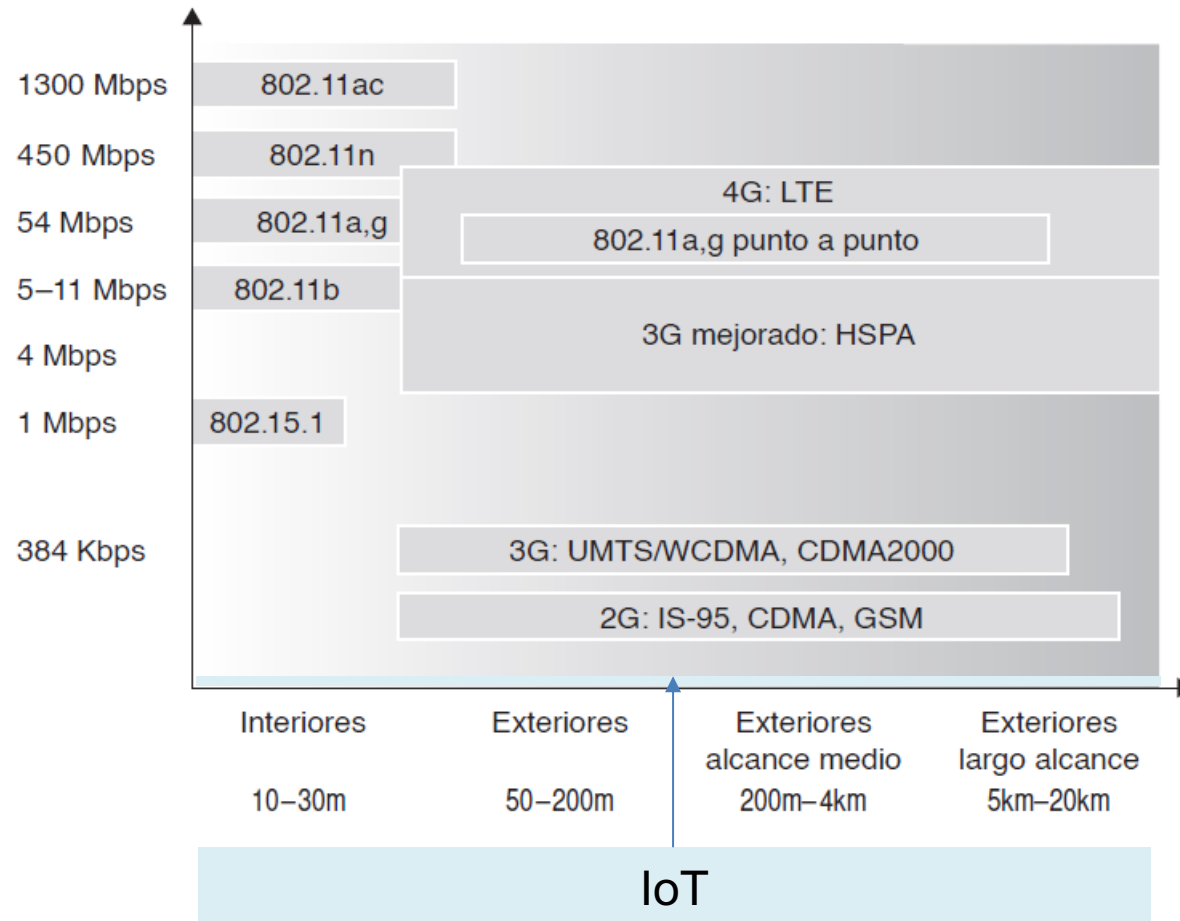


Redes Inalámbricas y Móviles

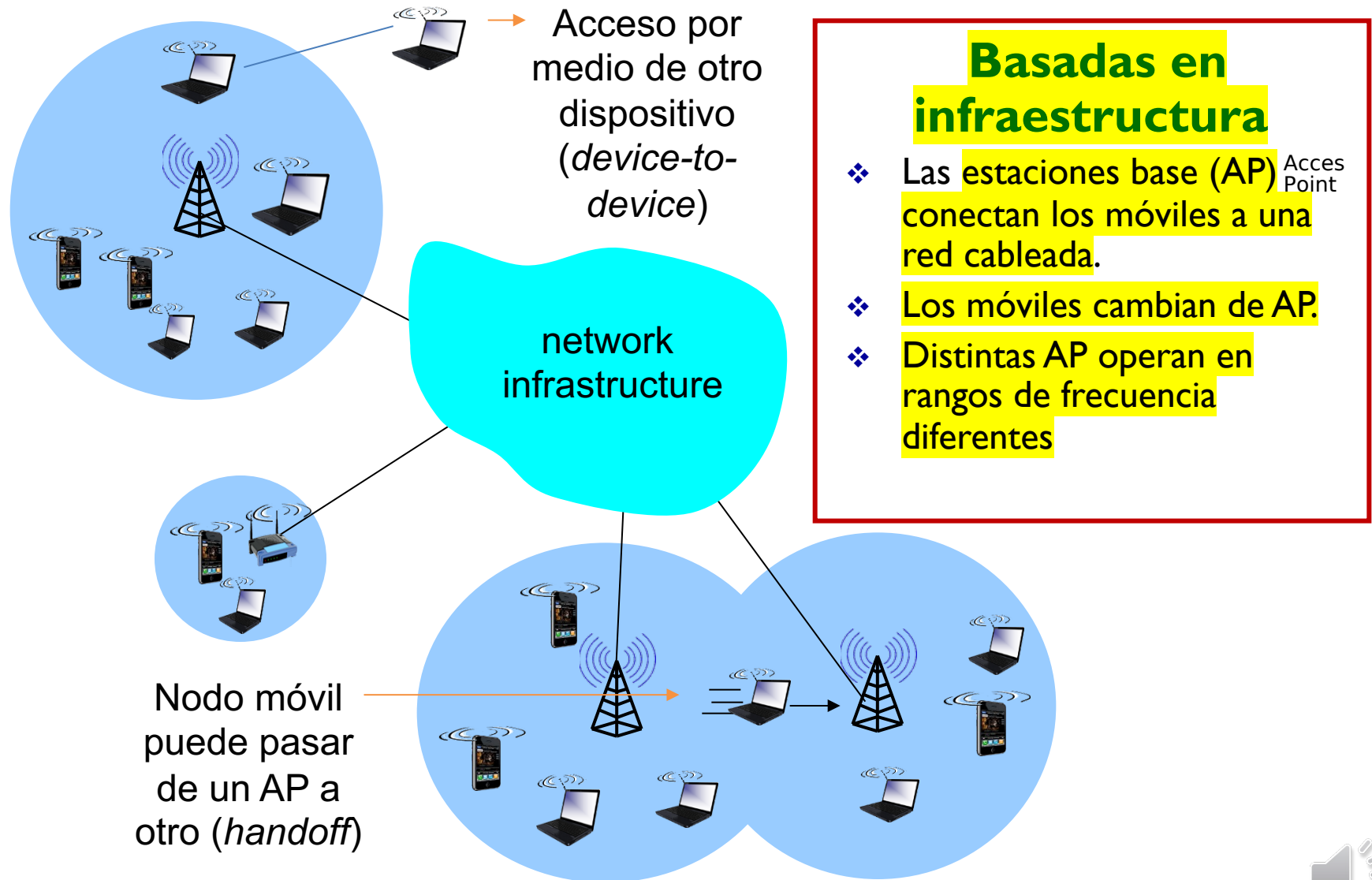
- → 34 mill. de celulares en 1993
→ +3.000 mill. de smartphones hoy
→ +30.000 mill. de dispositivos IoT en 2025
- Desafíos:
 - La naturaleza *inalámbrica* del canal
 - La *movilidad* de los nodos
- Uso: *acceso* en la frontera de la red



Redes Inalámbricas y Móviles

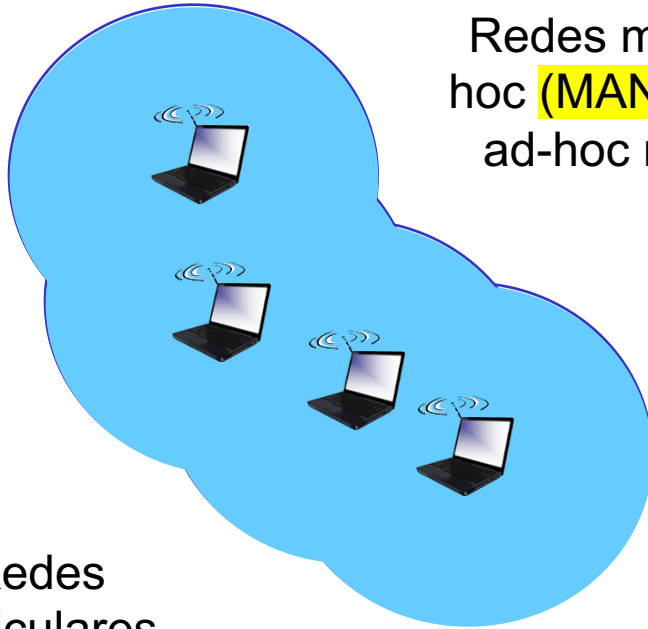


Redes Inalámbricas y Móviles



Redes Inalámbricas y Móviles

Redes móviles ad-hoc (MANET, mobile ad-hoc networks)



Redes vehiculares ad-hoc (VANET, vehicular ad-hoc networks)



Redes ad hoc

- ❖ No hay estaciones base
- ❖ Los nodos sólo pueden transmitir a otros nodos dentro de su alcance
- ❖ Los nodos se organizan entre ellos en una red: rutas entre ellos.



Señales

- Intensidad decreciente de la señal
 - Dispersión, atenuación
- Interferencias de otros orígenes
 - Ruido electromagnético, bandas abiertas ISM
- Propagación multi-camino (*multipath*)
 - Rebotes en objetos

Mayor tendencia a errores en el bit que redes cableadas
por lo que...

Usan técnicas de detección y recuperación de errores más robustas



SNR y BER

- Señal electromagnética (no eléctrica)
- Necesario **1)** sensibilidad del receptor (RSSI)
 - Que el receptor pueda detectar a señal
- Necesario **2)** relación señal a ruido (SNR)
 - Que el receptor pueda entender la señal
- Esquema de Modulación (ya vemos esto)
- → Tasa de error (BER)

Se
miden
en dB y
dBm
(log)



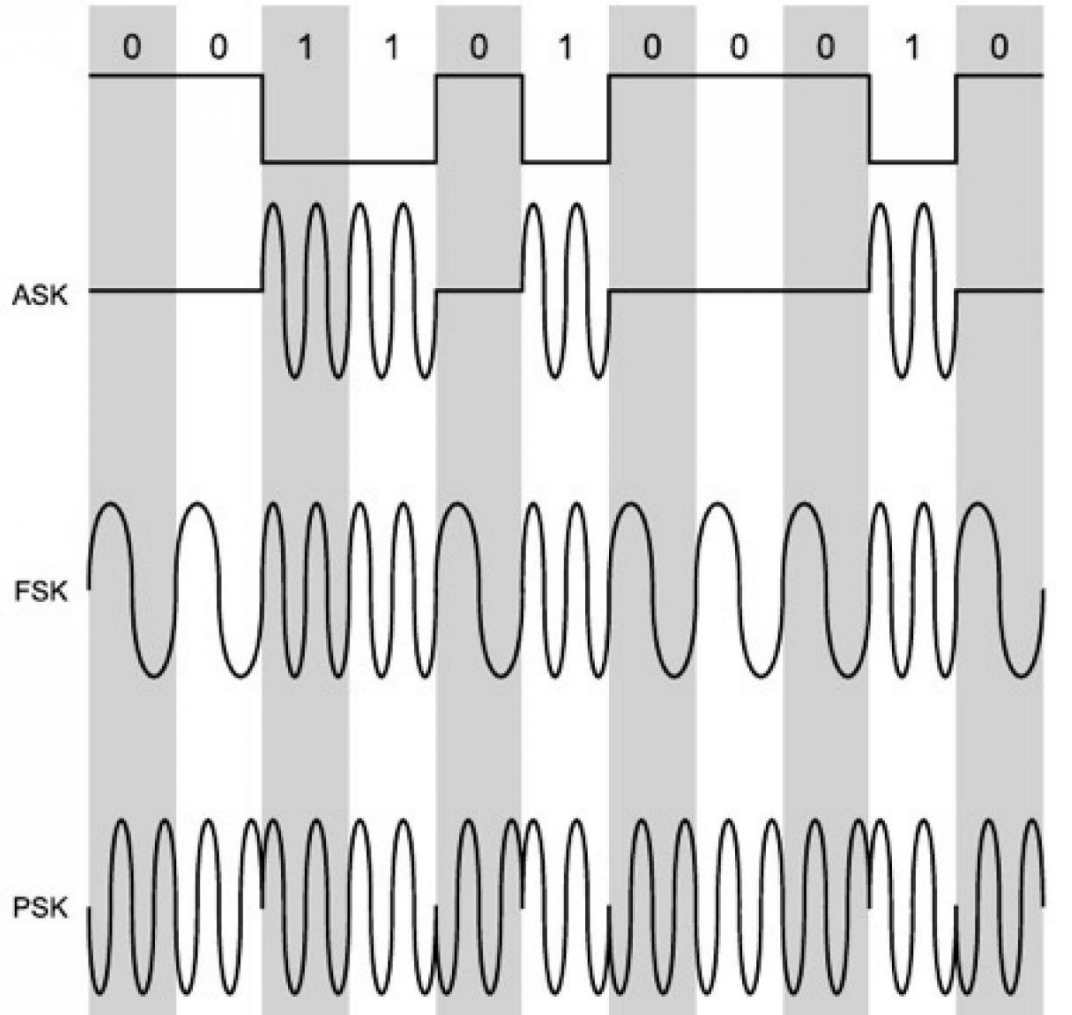
Modulación

Datos
digitales

Amplitude
Shift Keying

Frequency
Shift Keying

Phase Shift
Keying



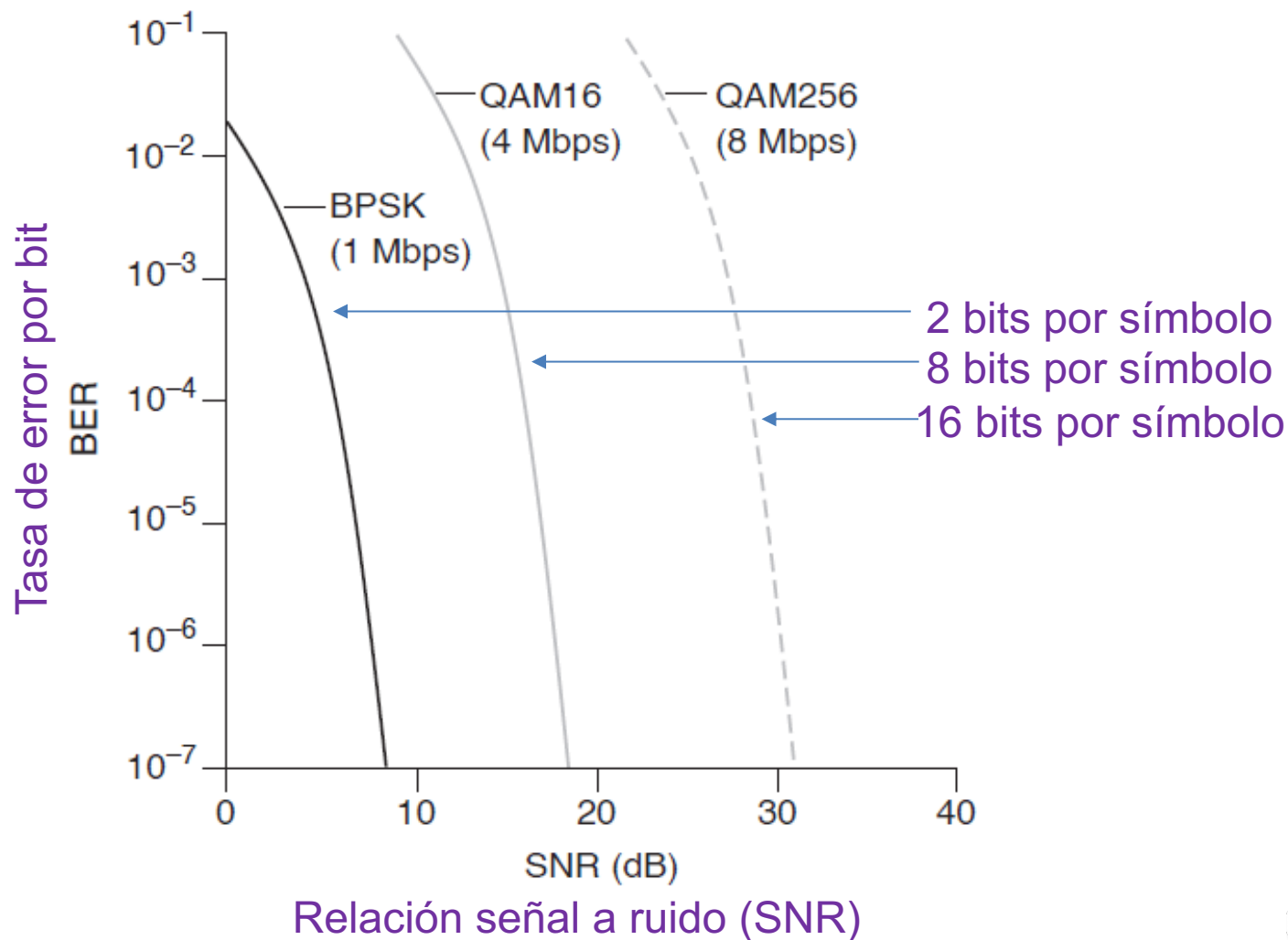
QAM16

QAM256

BPSK



Modulación, SNR y BER



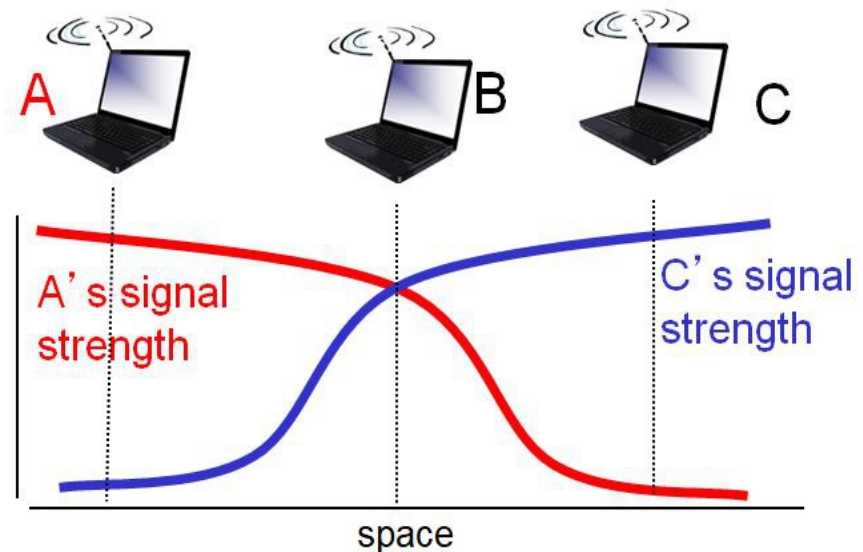
Modulación, SNR y BER

- Para un esquema de modulación, cuanto mayor es la SNR, menor BER
- Para una SNR dada, una modulación con tasa de bit más alta tendrá un mayor BER
- Puede utilizarse una selección dinámica del esquema de modulación y de la potencia de transmisión adaptativas para cumplir con un BER objetivo (WiFi, 4G...)



Problemas de la comunicación inalámbrica

- Los nodos inalámbricos usualmente no pueden transmitir y recibir al mismo tiempo.
- La potencia generada por el emisor es mucho más alta que lo que probablemente será una señal recibida y así se satura el circuito receptor.

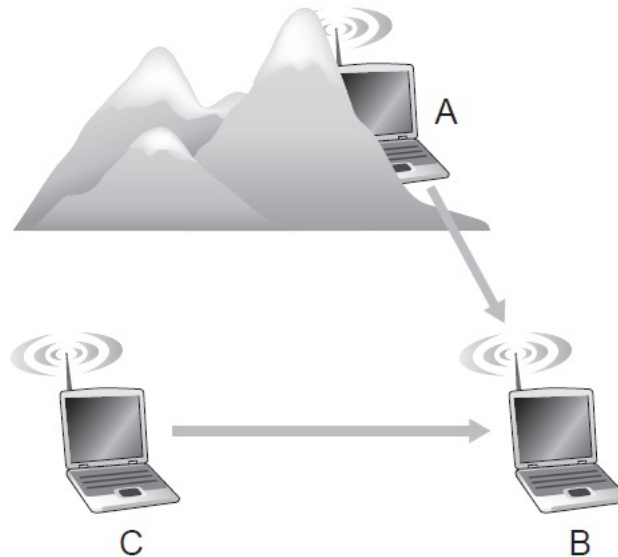


- No se puede comparar lo que se transmite con lo que se escucha para detectar colisiones. Carrier sense multiple access with collision detection
- En lugar de CSMA/CD (Acceso Múltiple con Detección de Portadora y Detección de Colisiones) (Ethernet) se usa CSMA/CA (Acceso Múltiple con Detección de Portadora y Evitación de Colisiones) (WiFi 802.11)

Carrier sense multiple access with collision avoidance



Problemas de la comunicación inalámbrica

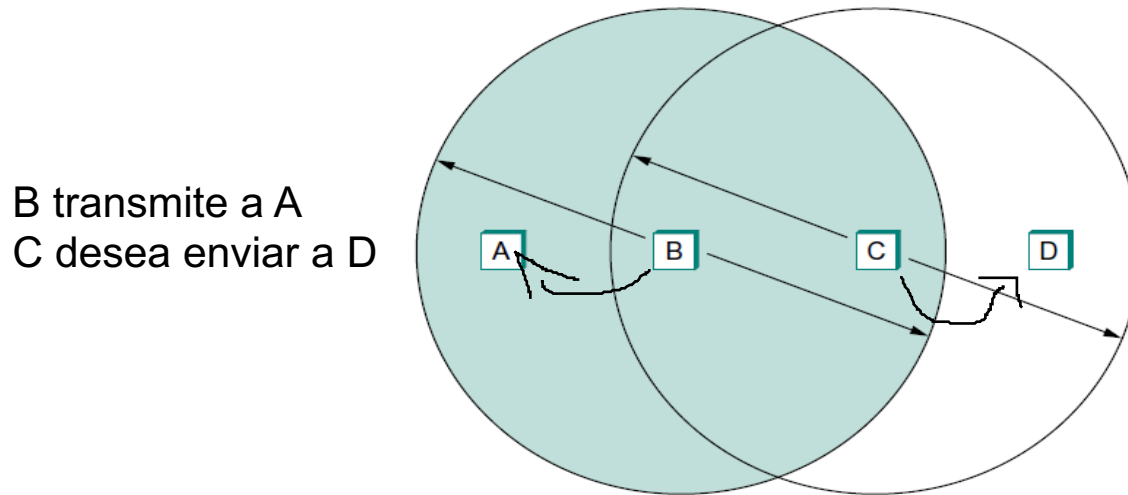


— Problema de la estación oculta

- La estación C transmite a la estación B.
- ¿Qué pasa si A detecta el canal?
- Si A detecta el canal no escuchará nada y concluirá erróneamente que ahora puede comenzar a transmitir a B – si lo hace, ¡colisión!



Problemas de la comunicación inalámbrica



■ **FIGURE 2.31** The exposed node problem. Although B and C are exposed to each other's signals, there is no interference if B transmits to A while C transmits to D. (A and D's reaches are not shown.)

— Problema de la estación expuesta

- Supongamos que *B* transmite a *A*, y que *C* desea enviar a *D* por lo que escucha el canal.
- Cuando *C* escucha una transmisión concluye erróneamente que no debería transmitir a nadie porque escucha la transmisión de *B*.
- Pero no hay problema si *C* transmite a *D*, porque no va a interferir con la habilidad de *A* de recibir de *B* (si puede interferir con *A* enviando a *B*, cosa que no pasa en nuestro ejemplo).



Arquitectura IEEE 802.11 (WiFi)

- IEEE 802.11 = WiFi, varias familias

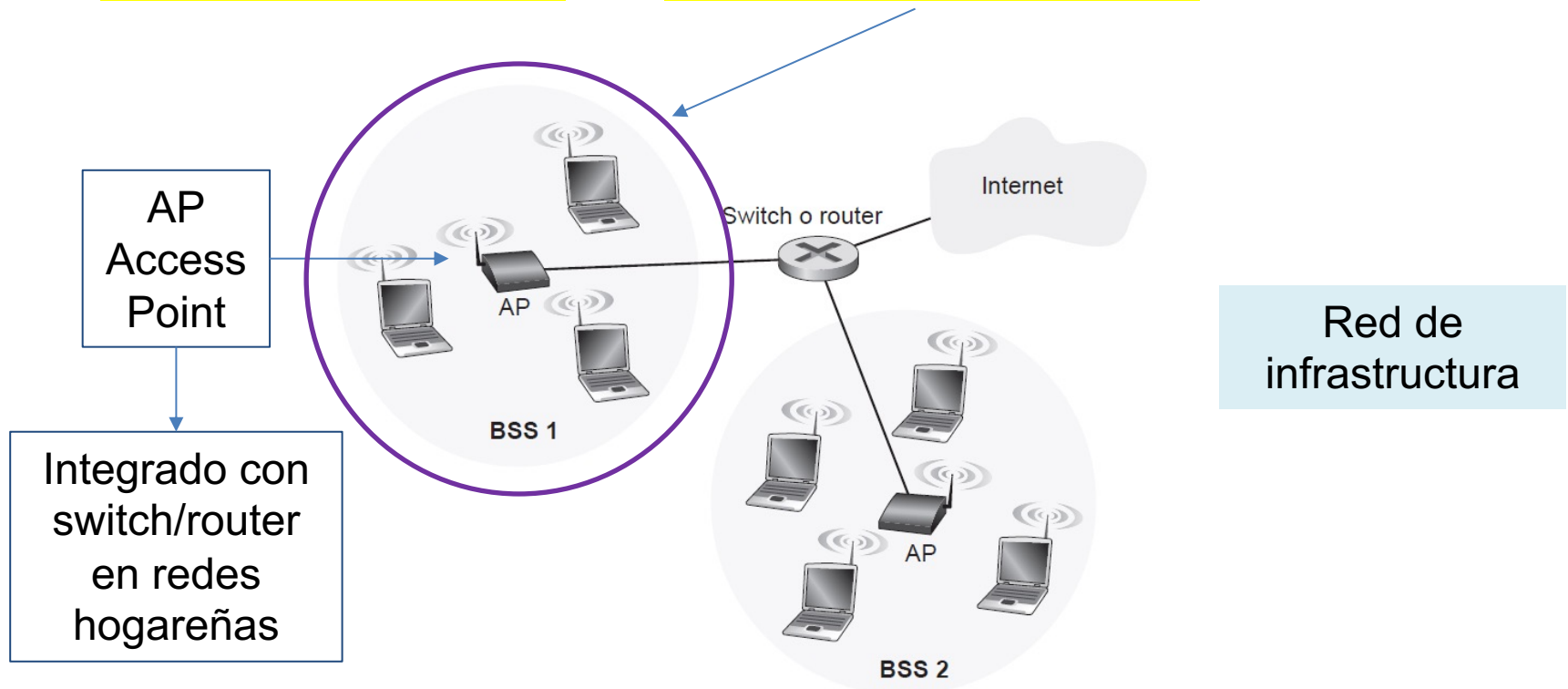
	Estándar	Rango de frecuencias	Velocidad de datos
	802.11b	2,4 GHz	hasta 11 Mbps
	802.11a	5 GHz	hasta 54 Mbps
	802.11g	2,4 GHz	hasta 54 Mbps
MIMO	802.11n	2,5 GHz y 5 GHz	hasta 450 Mbps
Beam-forming	802.11ac	5 GHz	hasta 1300 Mbps

- Todos usan el mismo formato de trama y el control de acceso al medio (MAC o SCAM), cambia la capa física, y hay compatibilidad hacia atrás en todos los casos



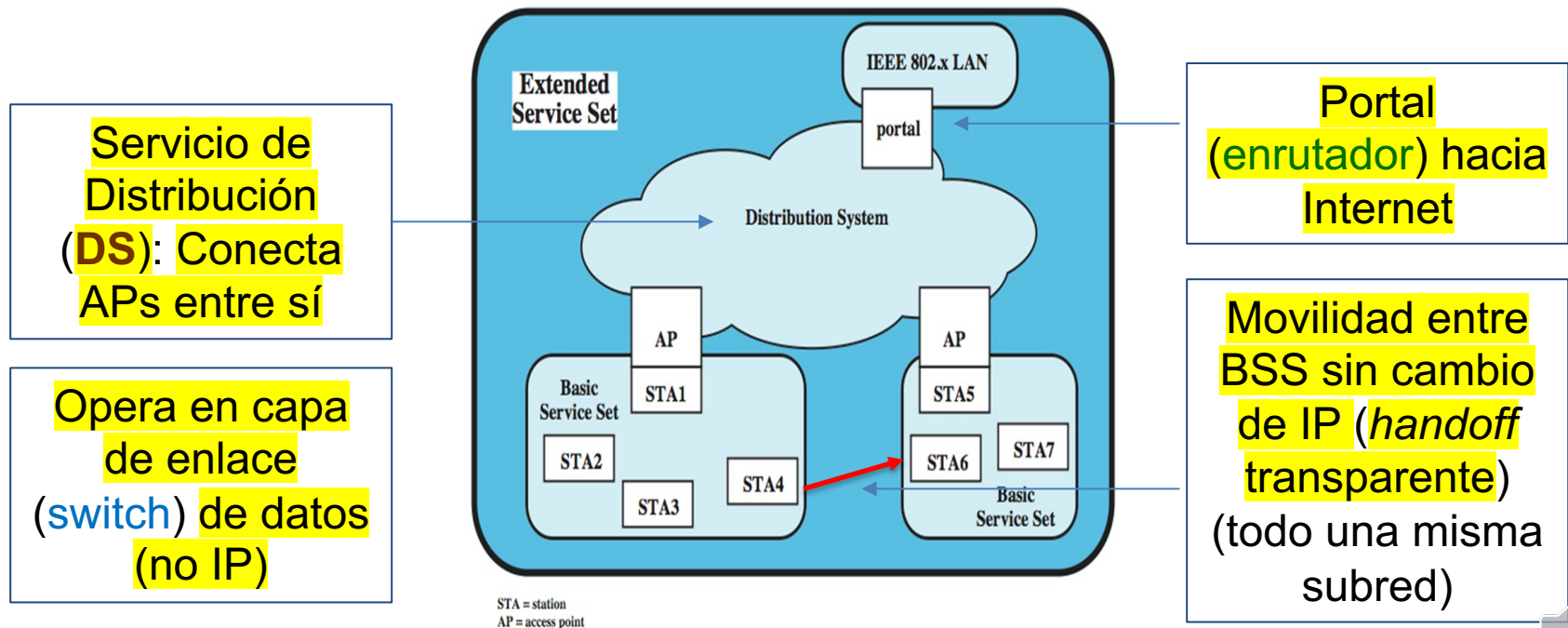
BSS

- Componente fundamental: **Conjunto de Servicio Básico** (o **Basic Service Set**, BSS)



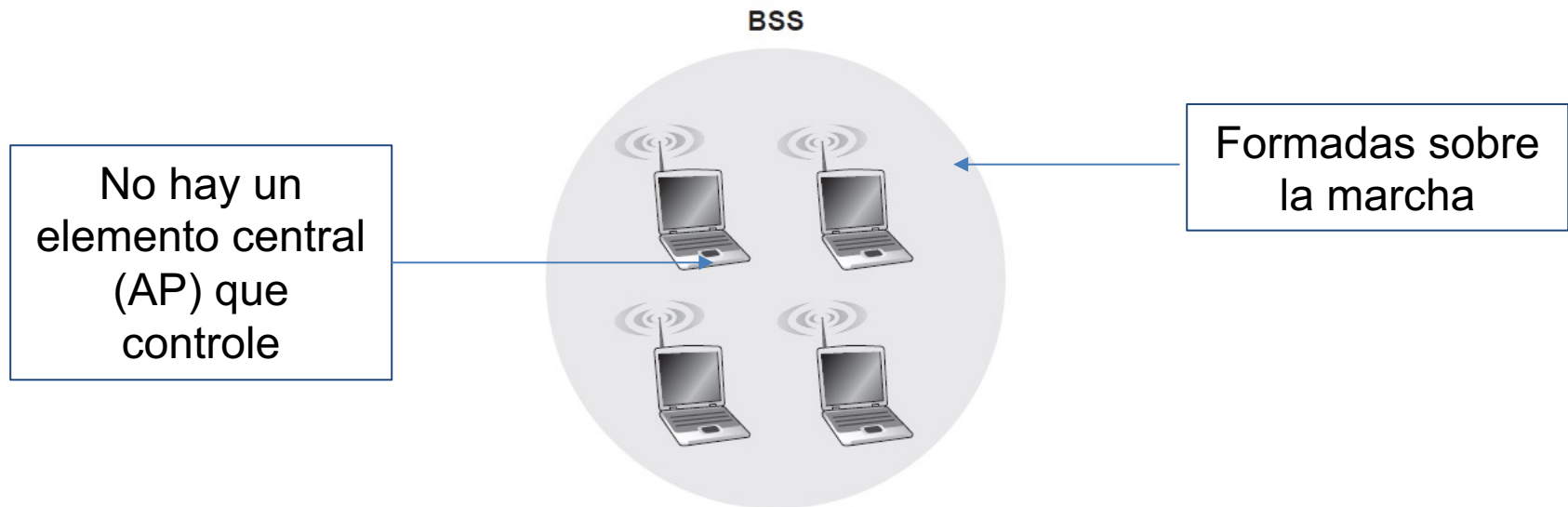
ESS

- Componente extendido: **Conjunto de Servicio Extendido** (o **Extended Service Set**, ESS)
 - Compuesto de 2 o más BSS y un **DS**



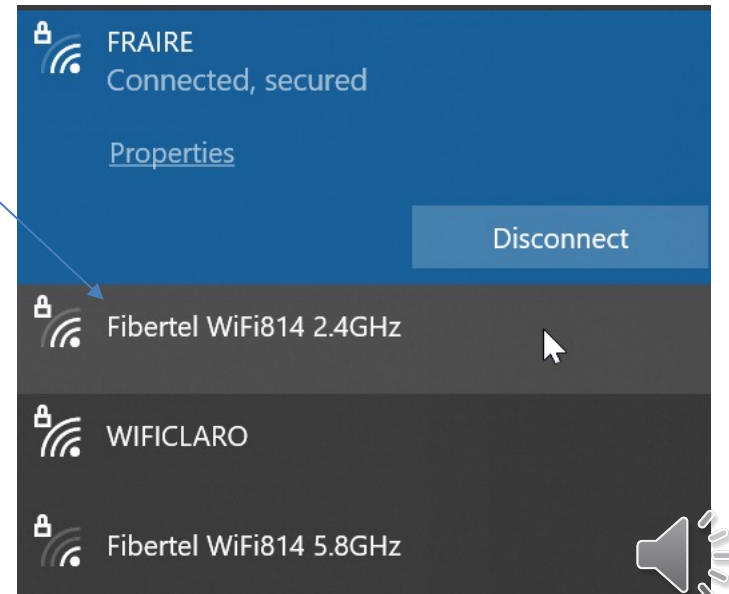
Ad Hoc

- IEEE 802.11 sin infraestructura



Canales y Asociación

- Cada host necesita **asociarse** con un AP antes de poder enviar o recibir datos de la capa de red
 - Puede haber más de 1 AP
 - Se crea un “cable virtual” entre el host y el AP
- **AP** → Identificador (**SSID, Service Set Identifier**)
- **AP** → 11 canales parcialmente solapados
 - Depende del estándar:
i.e., 85 Mhz dentro de la banda 2,4 GHz a 2,4835 GHz



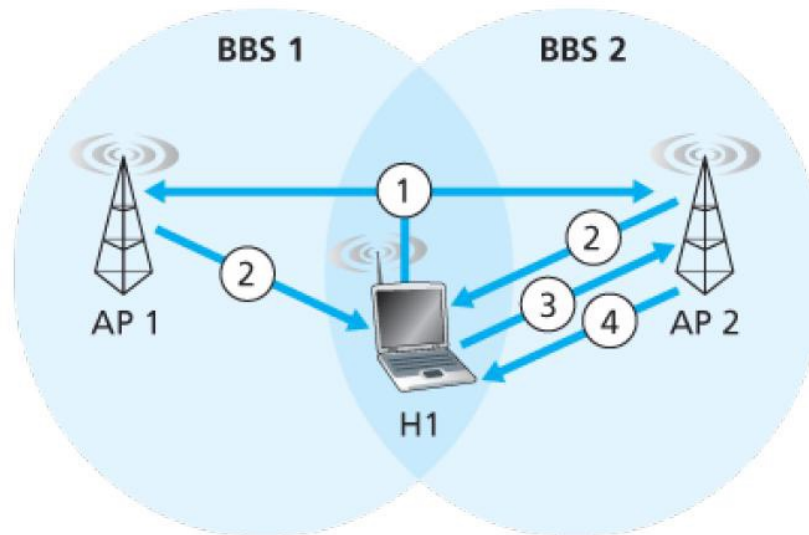
Canales y Asociación

- El estándar 802.11 no especifica un algoritmo para elegir con cual de las AP disponibles (re)asociarse
- **Situación 1:** Un nodo puede no estar asociado a ninguna AP y necesita asociarse a alguna
- **Situación 2:** Un nodo puede pasar a estar insatisfecho con su AP y quiere cambiar
 - Calidad de la señal del AP actual insuficiente (RSSI o SNR)
 - Red muy cargada (tráfico)
 - Otros (tema de investigación)



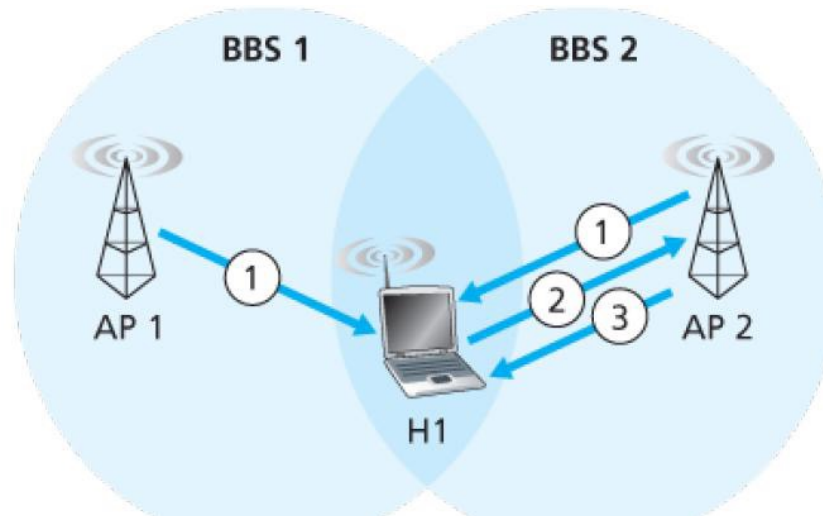
Canales y Asociación

- **Escaneo Activo:** iniciado por el host
 1. El nodo manda una trama de prueba
 2. Los AP al alcance responden con una trama de respuesta
 3. El nodo elige el AP y envía trama de pedido de asociación
 4. El AP responde con una trama de respuesta de asociación
 - Re-asociación: el nuevo AP notifica al AP anterior del cambio.



Canales y Asociación

- **Escaneo Pasivo:** iniciado por el AP
 1. AP difunde una trama guía periódicamente
 - Capacidades (i.e., tasas de transmisión) e identificador del AP, la hora, cuánto falta para la próxima trama guía, etc.
 2. El nodo elige el AP y envía trama de pedido de asociación
 3. El AP responde con una trama de respuesta de asociación



Canales y Asociación

- Otras responsabilidades de AP:
 - **Asociación**: establece asociación inicial entre nodo y AP
 - **Reasociación**: para transferir una asociación a otro AP (handoff)
 - **Desasociación**: notificación por nodo o AP que una asociación existente terminó

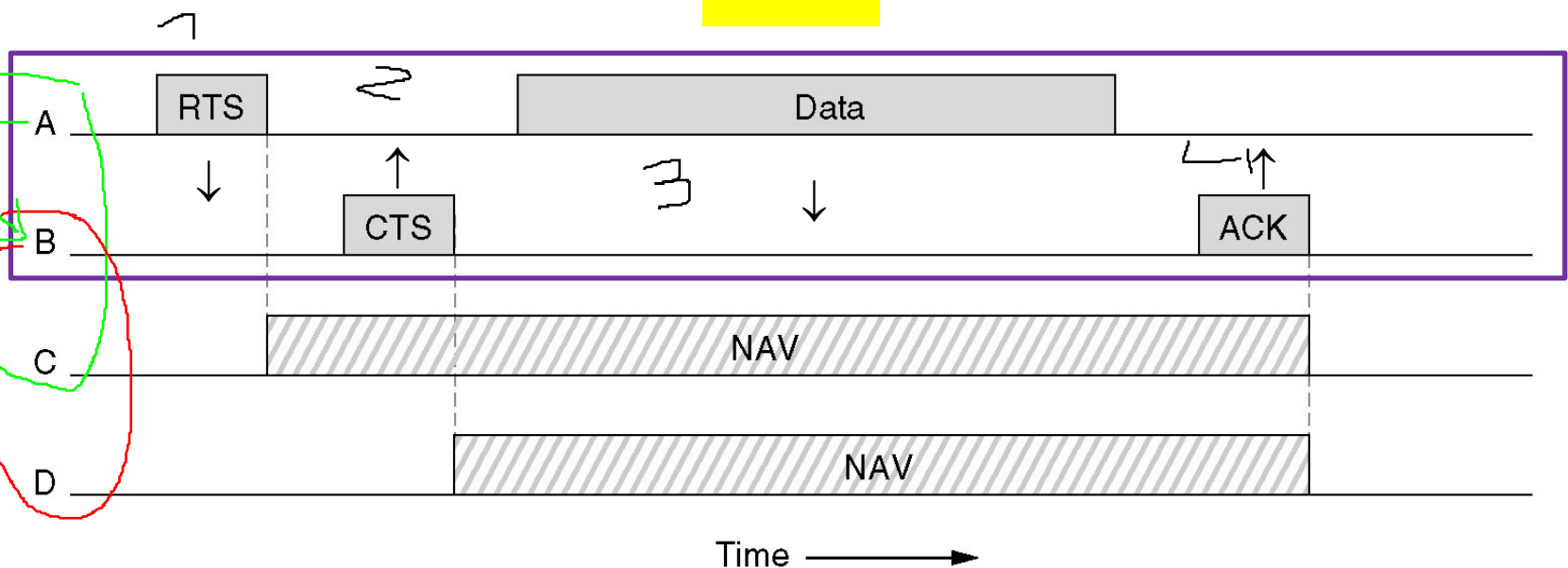


Subcapa MAC 802.11

- 802.11 usa **CSMA/CA** Carrier sense multiple access with collision avoidance
 - Acceso Múltiple con Detección de Portadora y Evitación de Colisiones
- Soporta dos modos:
 - **DCF (función de coordinación distribuida)**
Distributed coordination function
 - Es para redes ad-hoc
 - **PCF (función de coordinación puntual)**
Point coordination function
 - Es para redes basadas en infraestructura (AP)



DCF

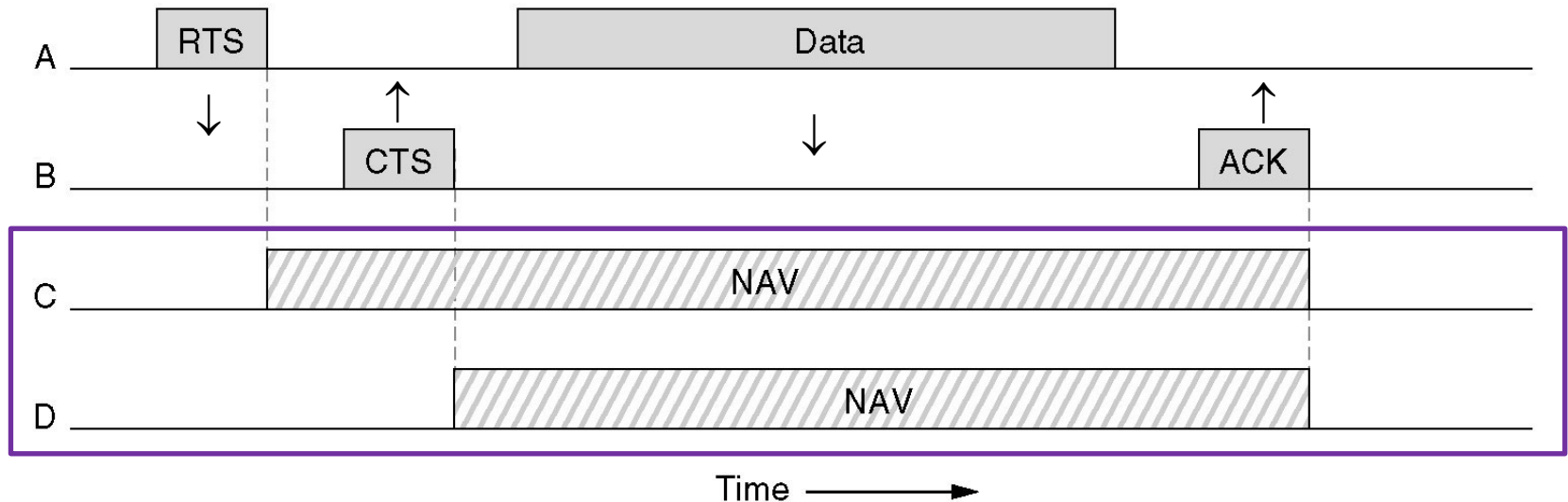


A desea enviar a **B**; **C** es una estación que está dentro del alcance de **A**; y **D** esta dentro del alcance de **B** pero no dentro del de **A**. Entonces:

1. **A**: envía una trama **RTS** a **B** (permiso para enviarle una trama)^{Request To Send}
2. **B**: recibe esta solicitud, y decide otorgarle el permiso: envía una trama **CTS**^{Clear To Send}
3. **A**: recibe **CTS** y envía su trama. Comienza su temporizador de **ACK**. Si termina antes de que el **ACK** regrese, todo el protocolo se ejecuta de nuevo.
4. **B**: al recibir correctamente la trama, responde con una trama de **ACK**



DCF

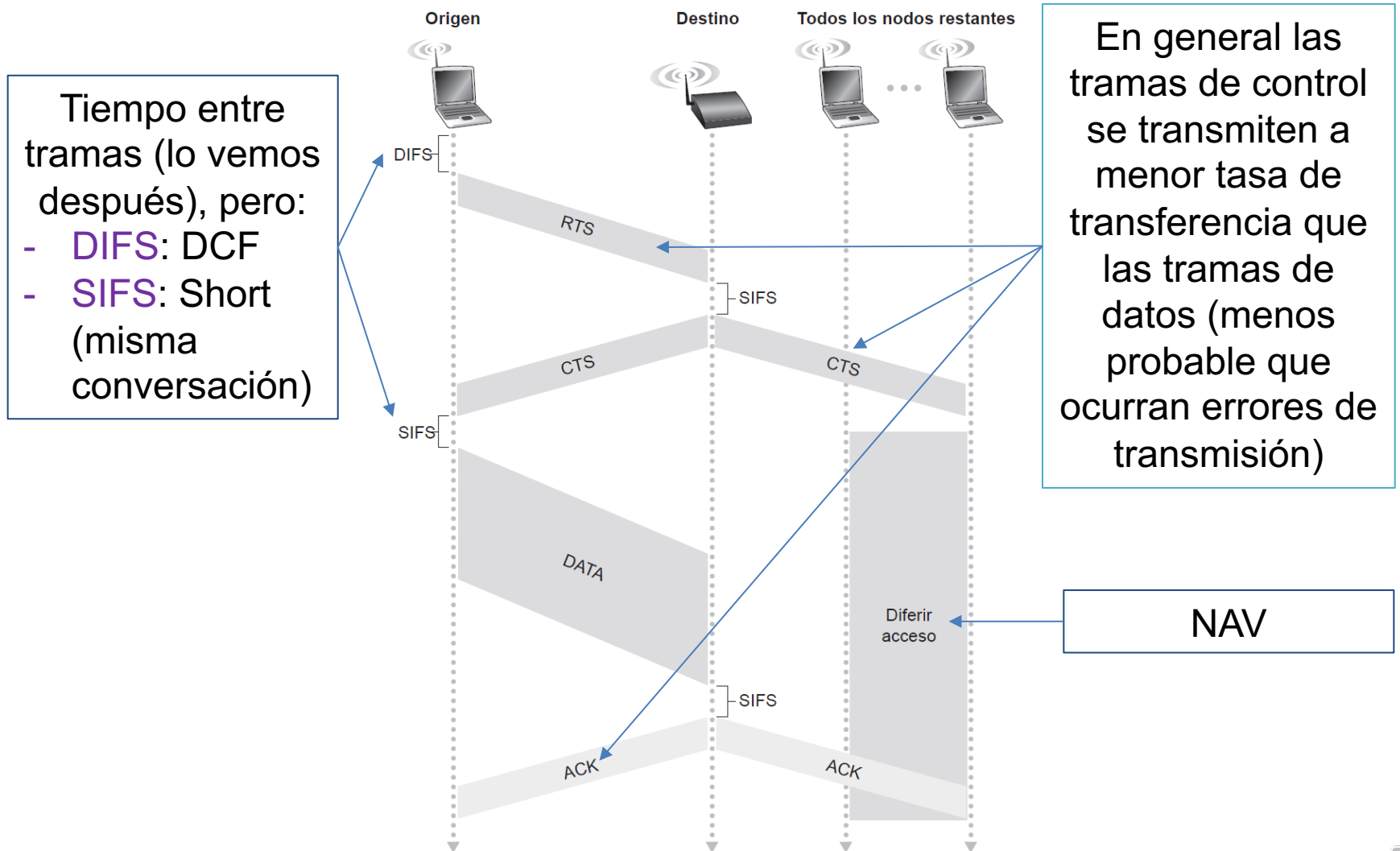


Comportamiento de los hosts **C** y **D**:

1. **C**: recibe la trama RTS y desiste de transmitir hasta que el intercambio esté completo. Con la información en RTS, **C** estima cuánto tardará la secuencia, incluyendo el ACK final, e inicia un NAV (vector de asignación de red).
Network Allocation Vector
2. **D**: D escucha el CTS y también impone un canal NAV para si misma.



DCF



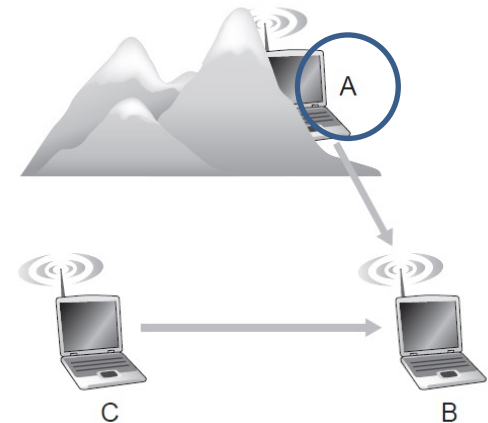
DCF

- **Colisiones:** Dos nodos pueden enviar RTS simultáneamente
 - Emisores asumen una colisión porque no reciben el CTS luego de un cierto intervalo de tiempo
 - Emisores esperan una cantidad de tiempo (algoritmo de retroceso exponencial binario) e intentan de nuevo



DCF

- Estación oculta: CTS es escuchado por una estación oculta (establece el NAV)
 - Tiempo incluido en el RTS y CTS
 - Luego de ese tiempo más un pequeño intervalo el canal puede ser asumido disponible
 - Pero no soluciona el problema de estación expuesta: por qué?



PCF

- Hay una relación uno a uno entre hosts y AP (asociación) → BSS
- **AP:** responsable de **enviar y recibir datos** (i.e. paquetes) desde y hacia hosts asociados con el AP
- **AP:** responsable para **coordinar la transmisión** de varios hosts inalámbricos asociados
- **AP:** sondea los nodos preguntándoles si tienen tramas para enviar
- **AP:** → **no ocurren colisiones**



PCF

- El tiempo en el medio se divide en
 - **Período sin (*contention*) disputa (PCF)**
 - Implementada en AP, quien coordina el acceso al medio
 - Nodos transmiten sólo si lo pide el AP
 - El AP tiene una lista de nodos “privilegiados”
 - Los nodos se registran para estar en la lista
 - **Período en (*contention*) disputa (DCF)**
 - Implementado en los nodos
 - Los nodos compiten por el medio

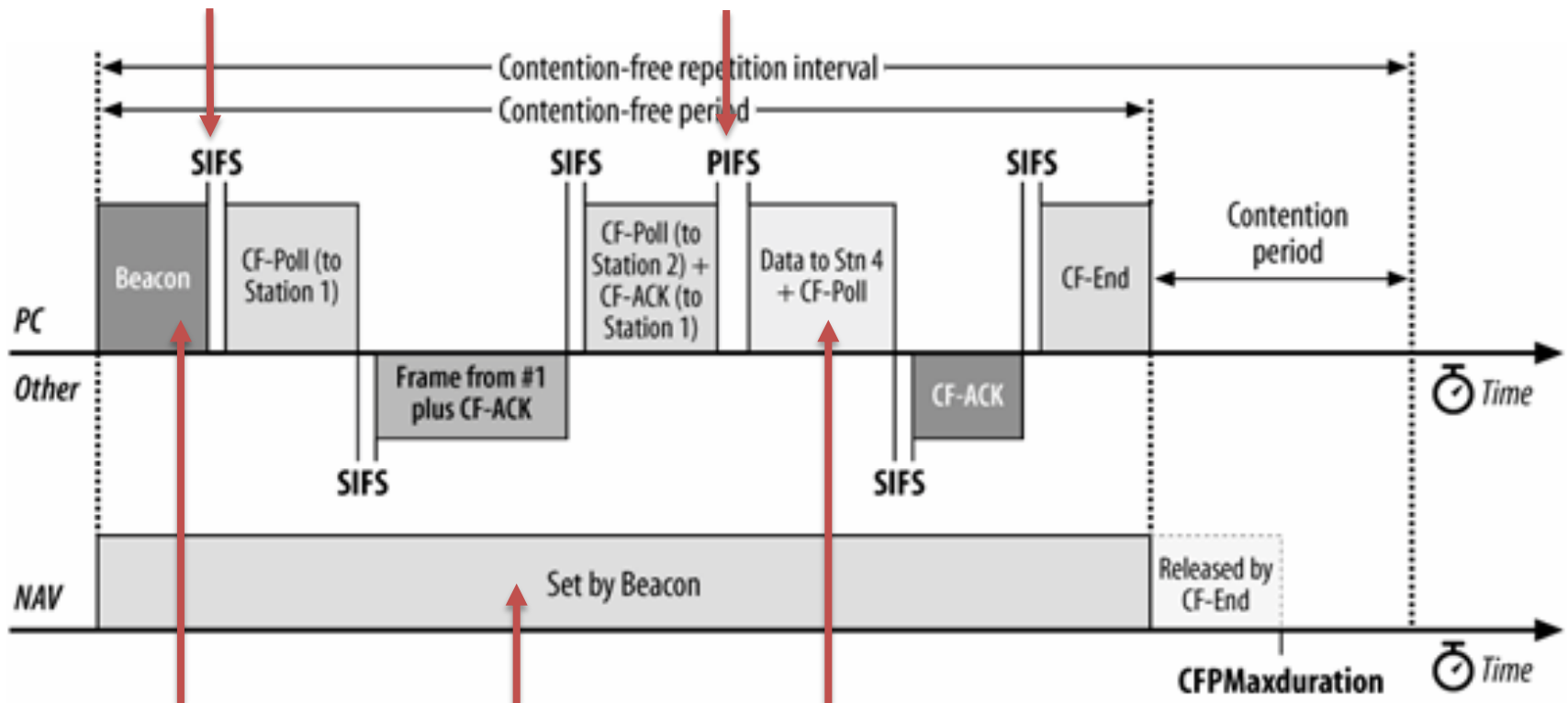


PCF

Short Inter-Frame Spacing (28us)

PC(F) Inter-Frame Spacing (78us)

Luego de PIFS, assume el nodo no utilizó su turno



Dice cuánto dura el período sin contention

Los nodos establecen el NAV

Data, polling, y ACKs se pueden combinar



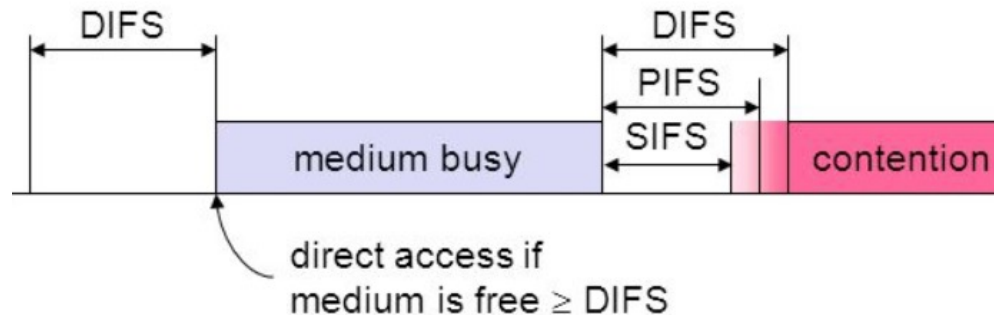
PCF

- **Beacon**: el AP demarca el inicio de la trama (i.e., baliza)
 - Contiene información de cuánto esperar para el próximo
 - Ese es el tiempo de un NAV, dentro del cual ocurren diálogos dentro del PCF
- **Poll**: el AP pide a la estación que transmita (i.e., sondeo)
 - Cuando esa estación termina de transmitir, termina su turno y el derecho a transmitir pasa a la siguiente estación
 - Ni el orden ni frecuencia son especificados en el standard



Tiempos Entre Tramas

- **SIFS (Short Inter Frame Space)** de 28 us
 - Intervalo entre tramas en un mismo dialogo (ACK, CTS, datos)
- **PIFS (Point Coordination IFS)** de 78 us
 - Intervalo entre tramas asumido por el AP (PCF)
- **DIFS (Distributed IFS)** de 128 us
 - Intervalo entre tramas asumido por nodos (DCF)



SIFS

- Dentro de un diálogo se usan intervalos **SIFS**.
 - Hacen falta los SIFS para cosas como calcular suma de verificación, entramado, de la próxima trama
 - Una estación usando SIFS para determinar la oportunidad de transmisión tiene la prioridad más alta
 - Hay solo una estación que puede responder luego de un intervalo SIFS



PIFS

- Entre dos diálogos diferentes se usa un **PIFS** (dentro de PCF)
 - Luego de un PIFS el AP puede mandar una trama beacon o poll
 - Dentro de un PIFS se impide uso de DCF
- El AP puede hacer sondeo en forma *round-robin* a todas las estaciones
 - Cuando se emite un sondeo, la estación responde usando un SIFS
 - Si el AP recibe una respuesta a un poll, puede hacer otro poll usando PIFS. Si no se recibe respuesta al poll, el AP puede hacer otro poll



DIFS

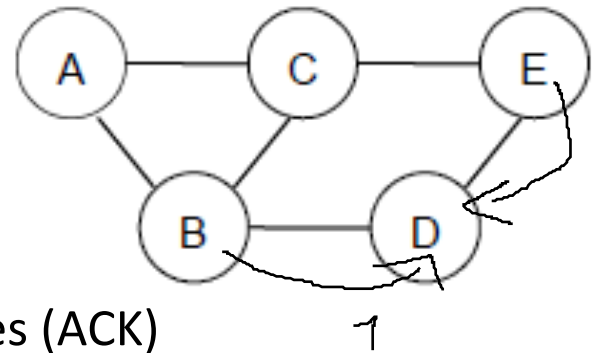
- Luego de un período de PCF, viene un DCF (con CSMA/CA), cuyas conversaciones se rigen por un DIFS
- Si el AP no tiene nada que decir y ocurre un tiempo DIFS, cualquier estación puede intentar adquirir el canal



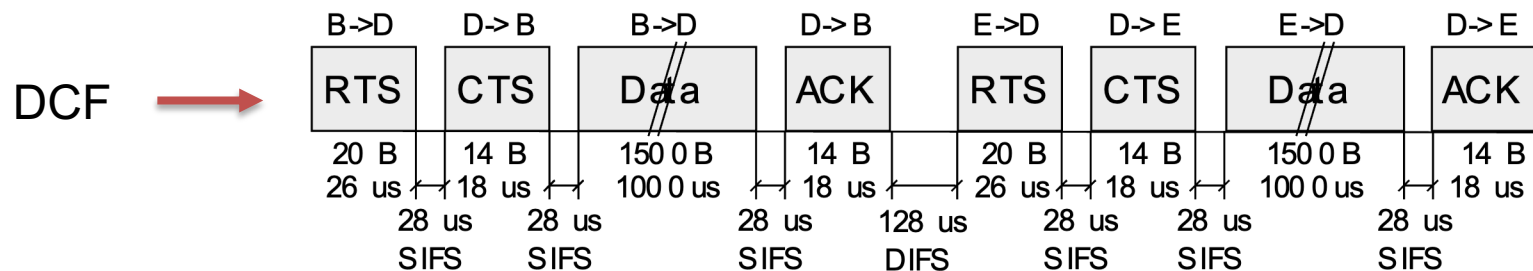
Ejercicio (DCF vs PCF)

Asuma hay datos desde B → D y E → D, donde B gana la fase de disputa, calcule la tasa de datos efectiva si se usa DCF.

- Tasa de transmisión
 - 6 Mbit/s para tramas de control
 - 12 Mbit/s para tramas de datos de 1500 Bytes
- Tramas de control son de
 - 20 Bytes (RTS), 14 Bytes (CTS) y 14 Bytes (ACK)
- Tiempo entre tramas
 - El SIFS es de 28 us y el DIFS es de 128 us.
- ¿Cuál sería la tasa efectiva si se trabajase en modo PCF?
 - Asuma beacon de 100 Bytes, poll de 20 Bytes y PIFS de 78 us.



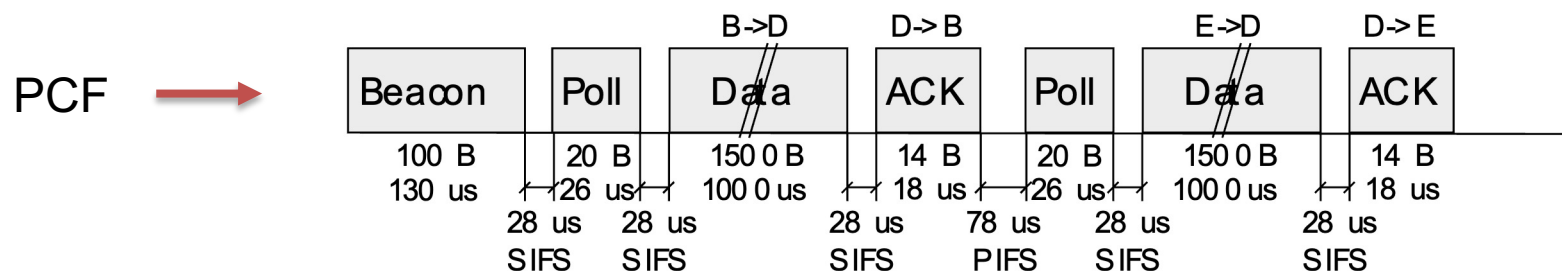
Ejercicio (DCF vs PCF)



Tasa de datos efectiva

$$T_{DE} = \frac{1500 * 2 [B]}{26 + 28 + 18 + 28 + 1000 + 28 + 18 + 128 + 26 + 28 + 18 + 28 + 1000 + 28 + 18 [us]}$$

$$T_{DE} = \frac{3000 [B]}{2420 [us]} = \frac{24000 [bits]}{0,002420 [s]} = 9,91 [Mbps]$$



Tasa de datos efectiva

$$T_{DE} = \frac{1500 * 2 [B]}{130 + 28 + 26 + 28 + 1000 + 28 + 18 + 78 + 26 + 28 + 1000 + 28 + 18 [us]}$$

$$T_{DE} = \frac{3000 [B]}{2436 [us]} = \frac{24000 [bits]}{0,002436 [s]} = 9,85 [Mbps]$$



Ejercicio (DCF vs PCF)

Notas sobre DCF y PCF

- A pesar de que la tasa de transmisión de la trama de datos era de 12 Mbps, la **tasa de datos efectiva** es cercana a 10 Mbps
- Los usuarios B y E, sin embargo, sólo han podido transmitir una trama en el intervalo de tiempo analizado, por lo que ellos verán una **tasa de datos de usuario** de 5 Mbps.
- Con pocas tramas de datos, DCF y PCF ofrecen tasa de datos efectivas similares.

¿Qué pasa con mayores cantidades de tramas?

- El Poll (20 B) es más eficiente que RTS/CTS (20 + 14 B + SIFS), por lo que para mayor tráfico, el modo PCF ofrecerá mejores tasa de datos efectivas que DCF.

