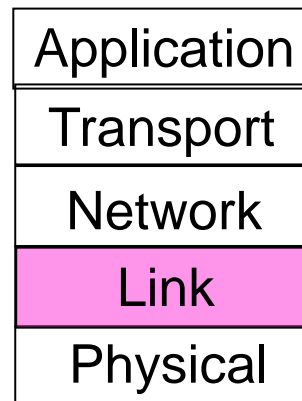


# Capítulo 5

## 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/Parazzi
    - 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)

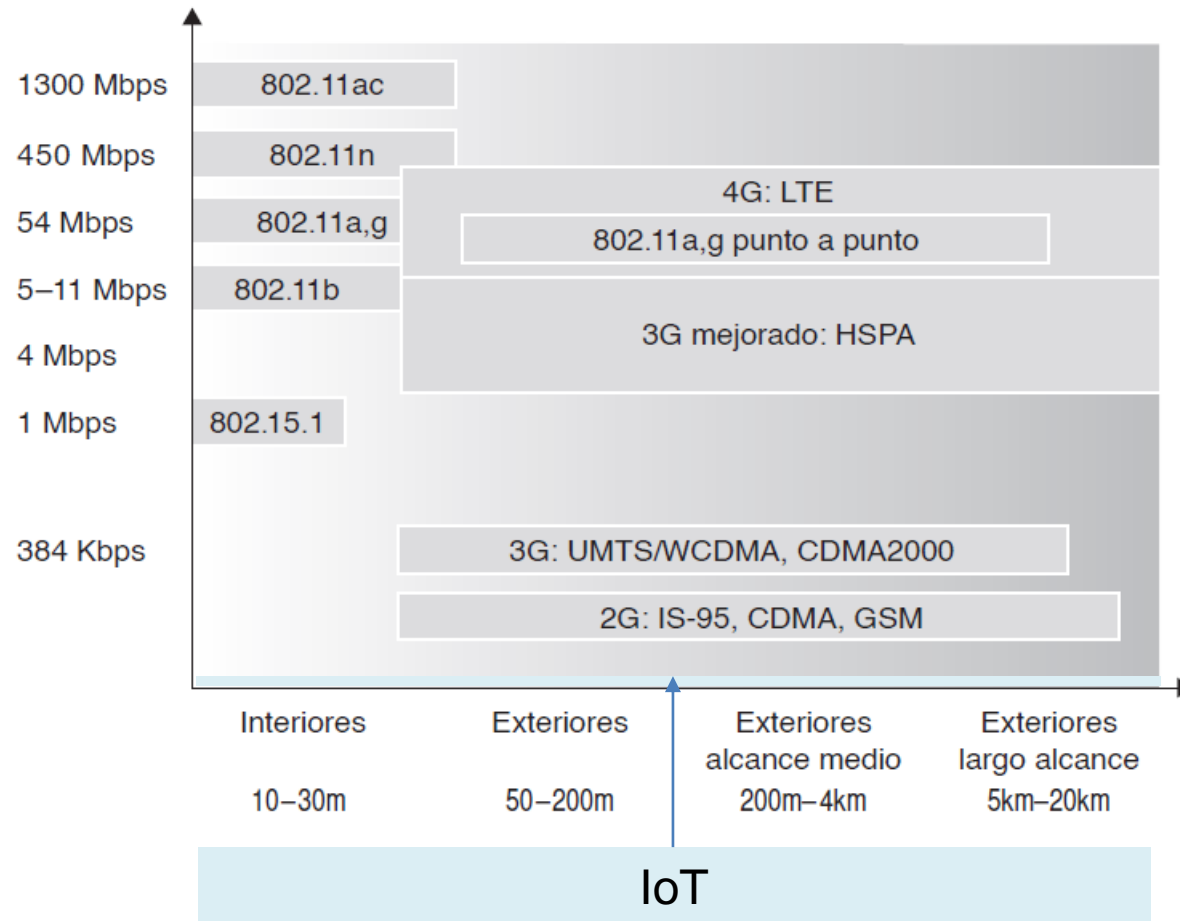


# Redes Inalámbricas y Móviles

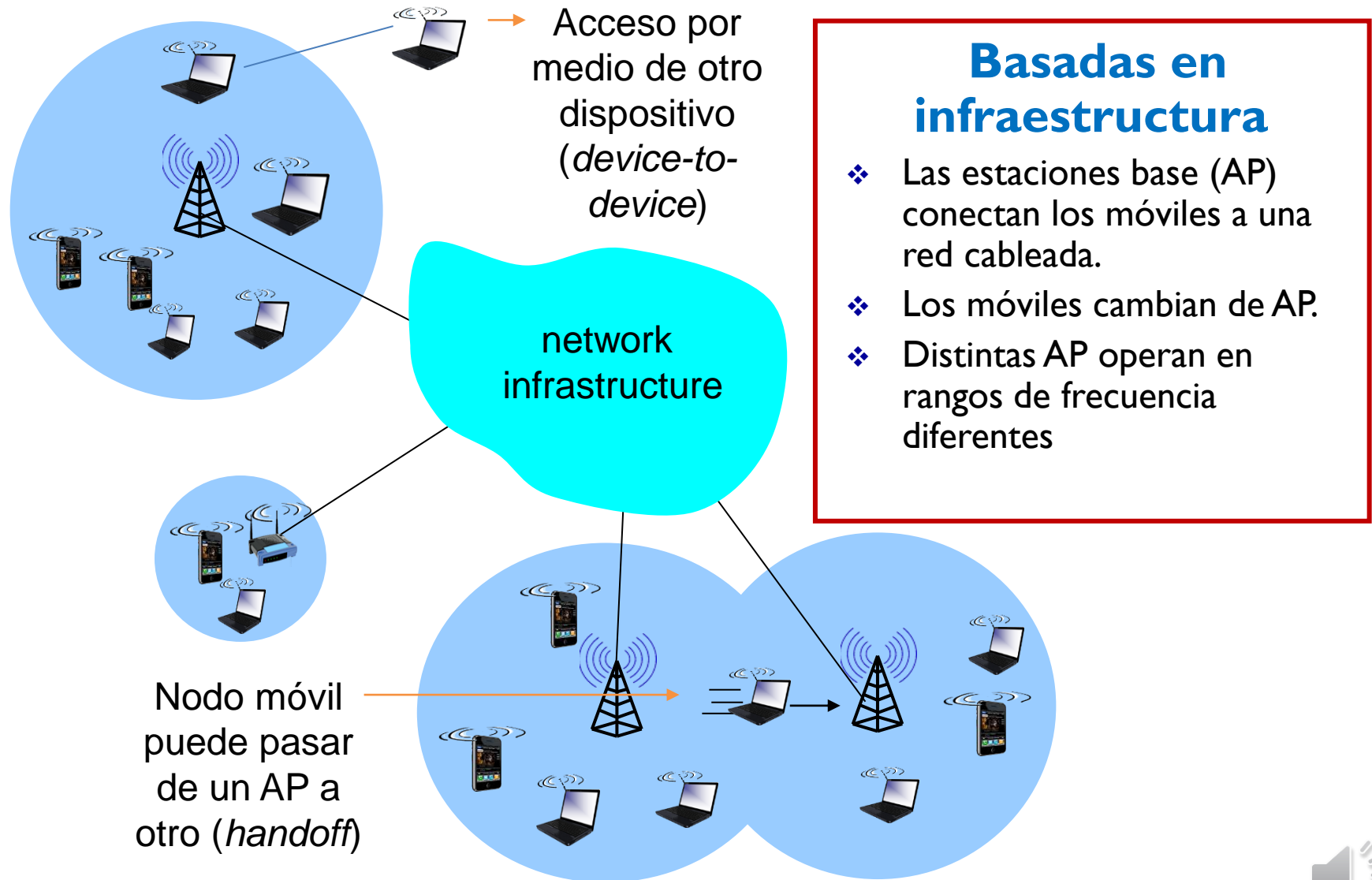
- → 34 mill. de celulares en 1993  
→ +3.000 mill. de smartphones hoy  
→ +30.000 mill. de dispositivos IoT en 2025
- Desafíos:
  - La naturaleza *inalámbrica* del canal
  - La *movilidad* de los nodos
- Uso: *acceso* en la frontera de la red



# Redes Inalámbricas y Móviles

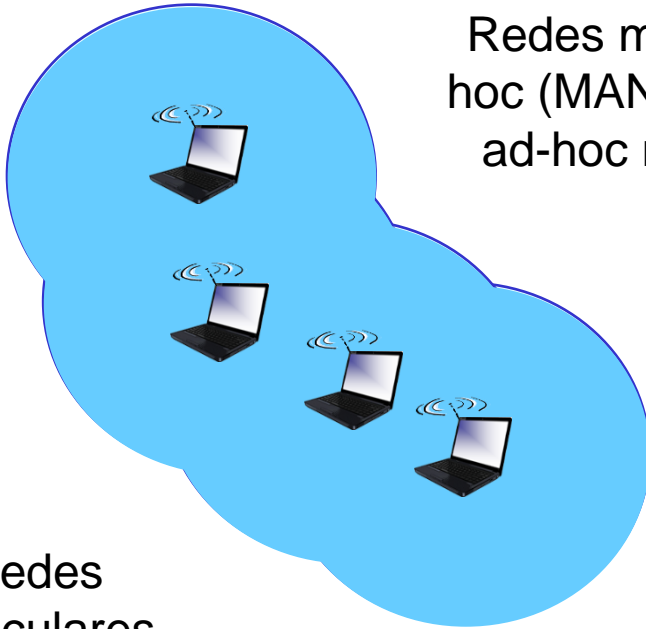


# Redes Inalámbricas y Móviles



# 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)





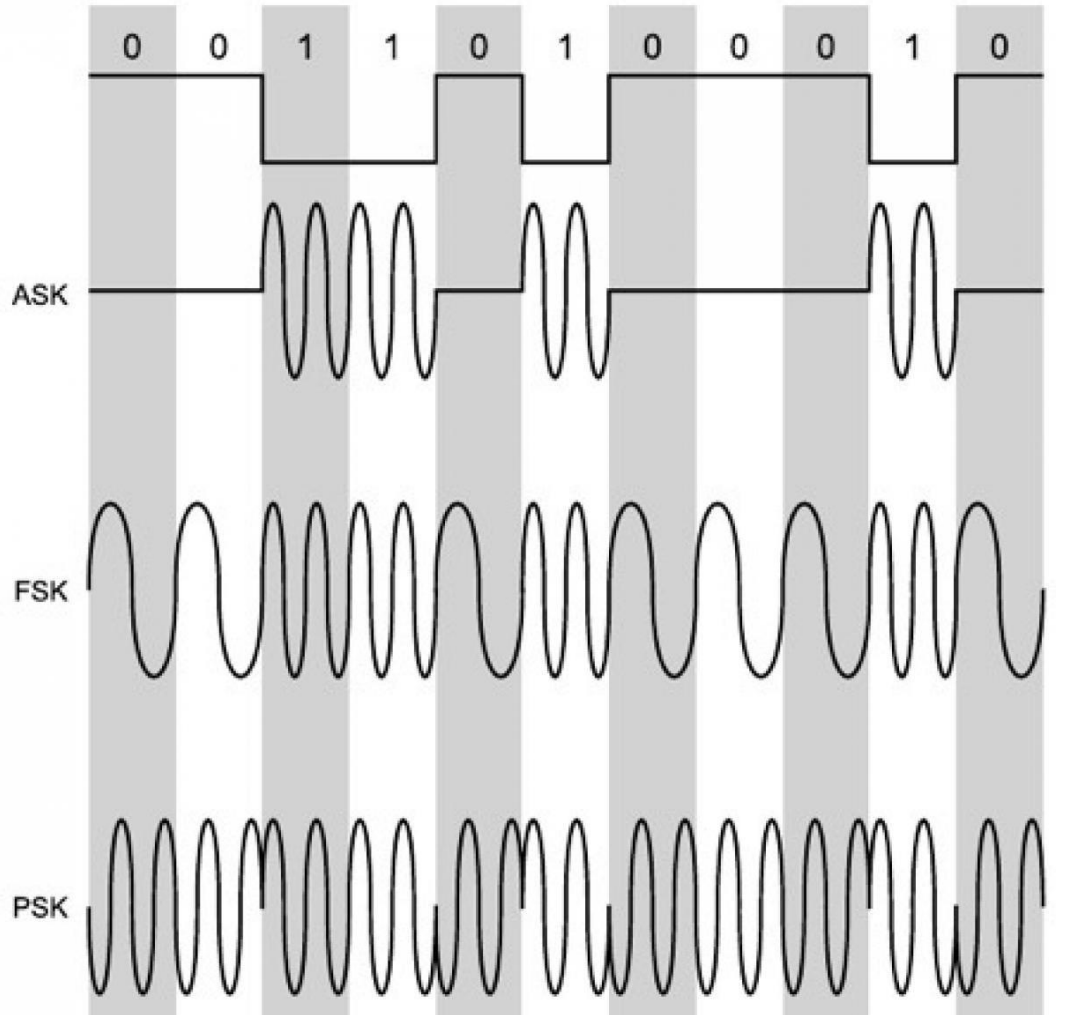
# Modulación

Datos  
digitales

Amplitude  
Shift Keying

Frequency  
Shift Keying

Phase Shift  
Keying



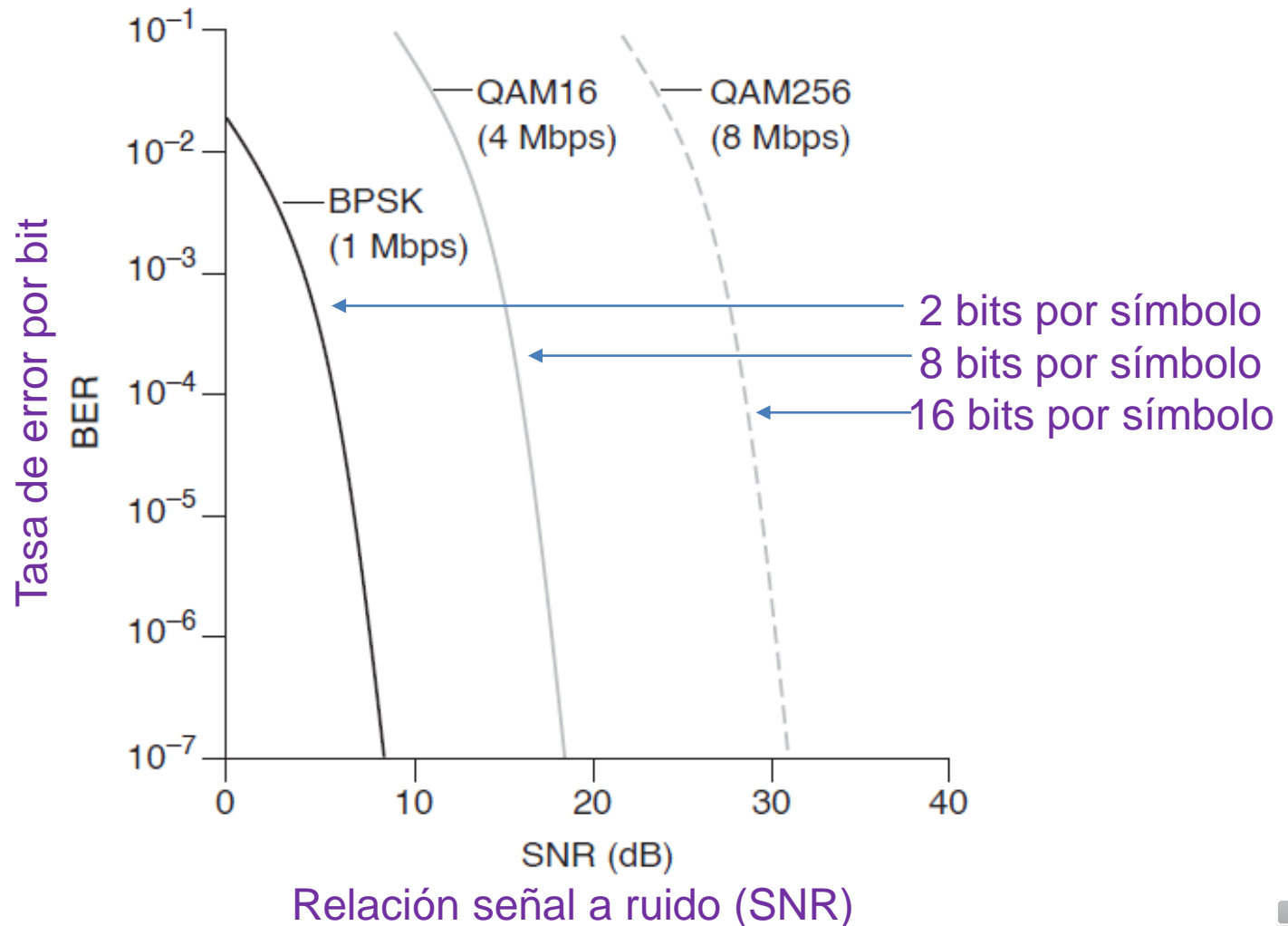
QAM16

QAM256

BPSK



# Modulación, SNR y BER



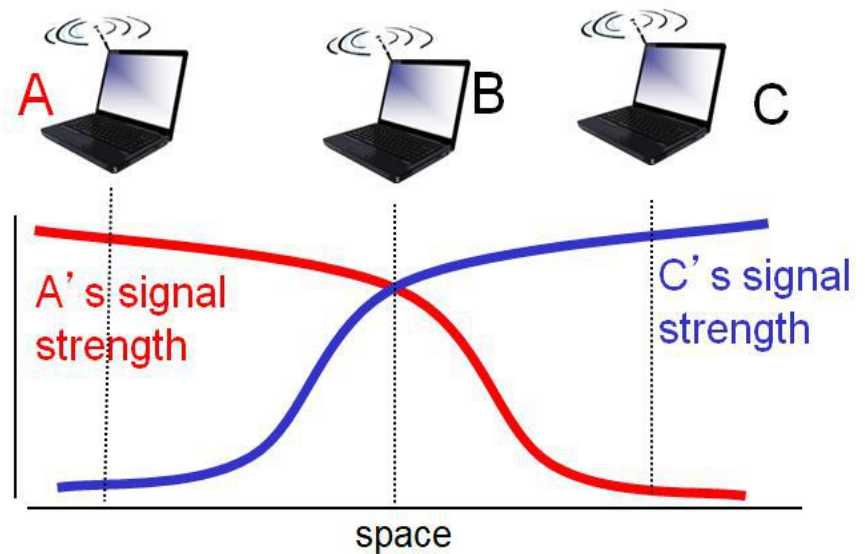
# Modulación, SNR y BER

- 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...)

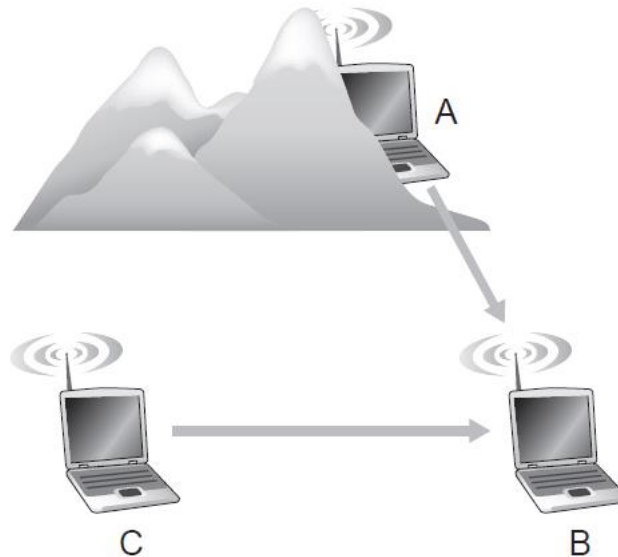


# Problemas de la comunicación inalámbrica

- 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.
- 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](#))



# Problemas de la comunicación inalámbrica

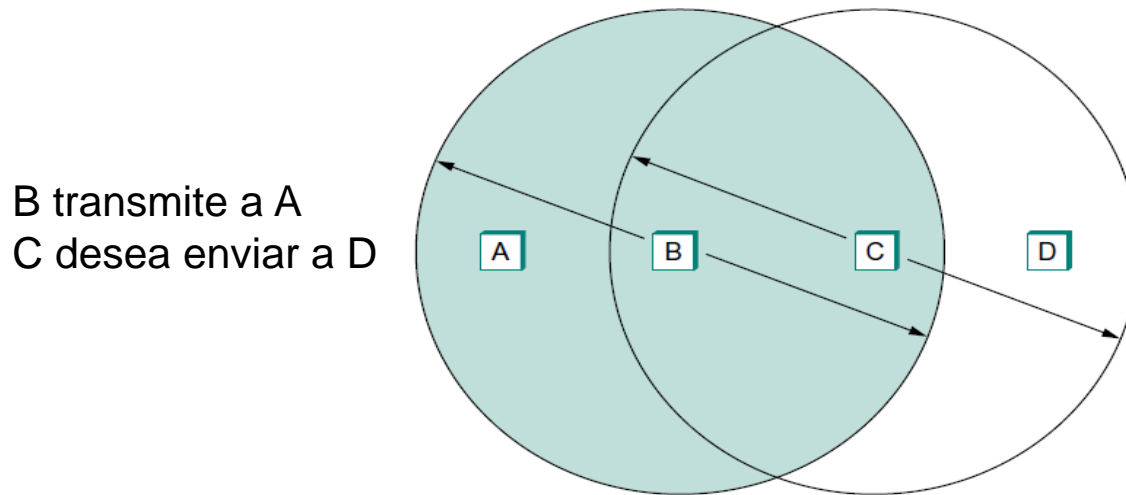


## — Problema de la estación oculta

- 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 *D* 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

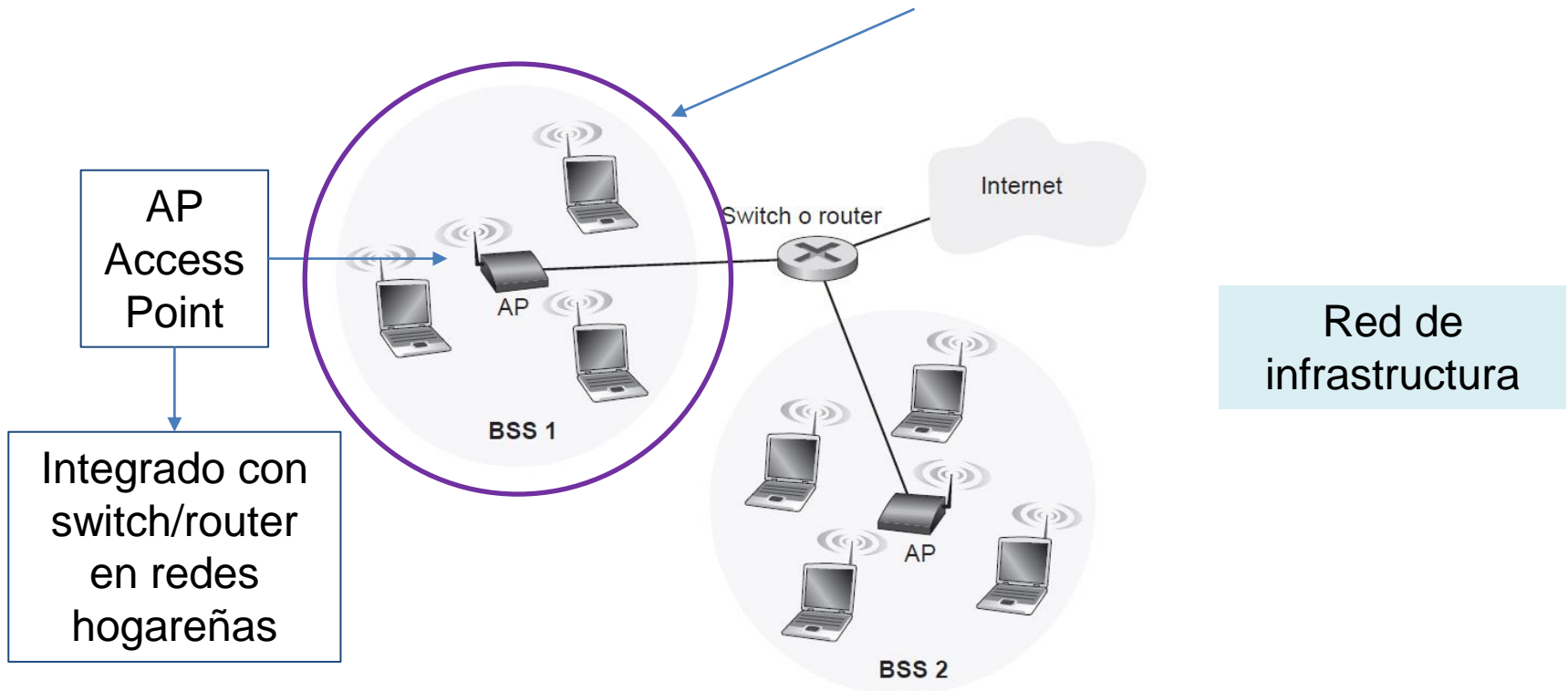
	Estándar	Rango de frecuencias	Velocidad de datos
	802.11b	2,4 GHz	hasta 11 Mbps
	802.11a	5 GHz	hasta 54 Mbps
	802.11g	2,4 GHz	hasta 54 Mbps
MIMO	802.11n	2,5 GHz y 5 GHz	hasta 450 Mbps
Beam-forming	802.11ac	5 GHz	hasta 1300 Mbps

- 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

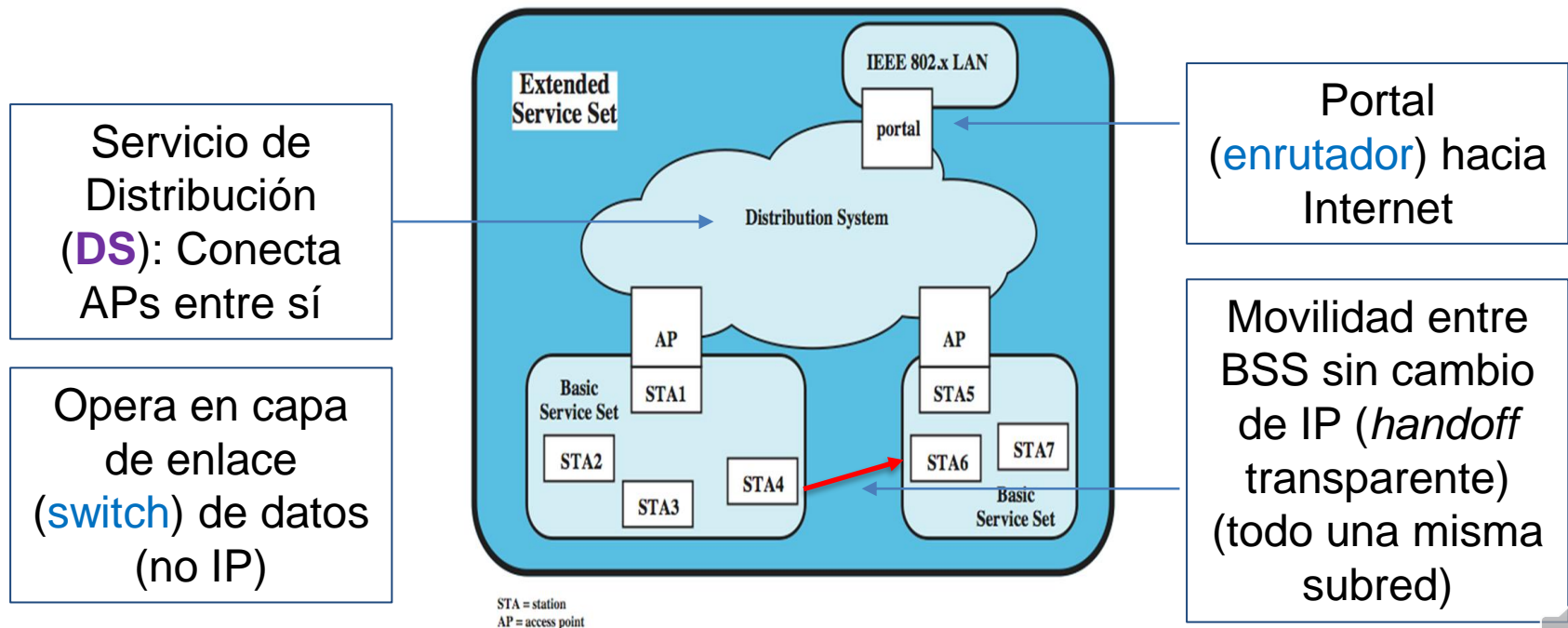
- Componente fundamental: Conjunto de Servicio Básico (o **Basic Service Set**, BSS)





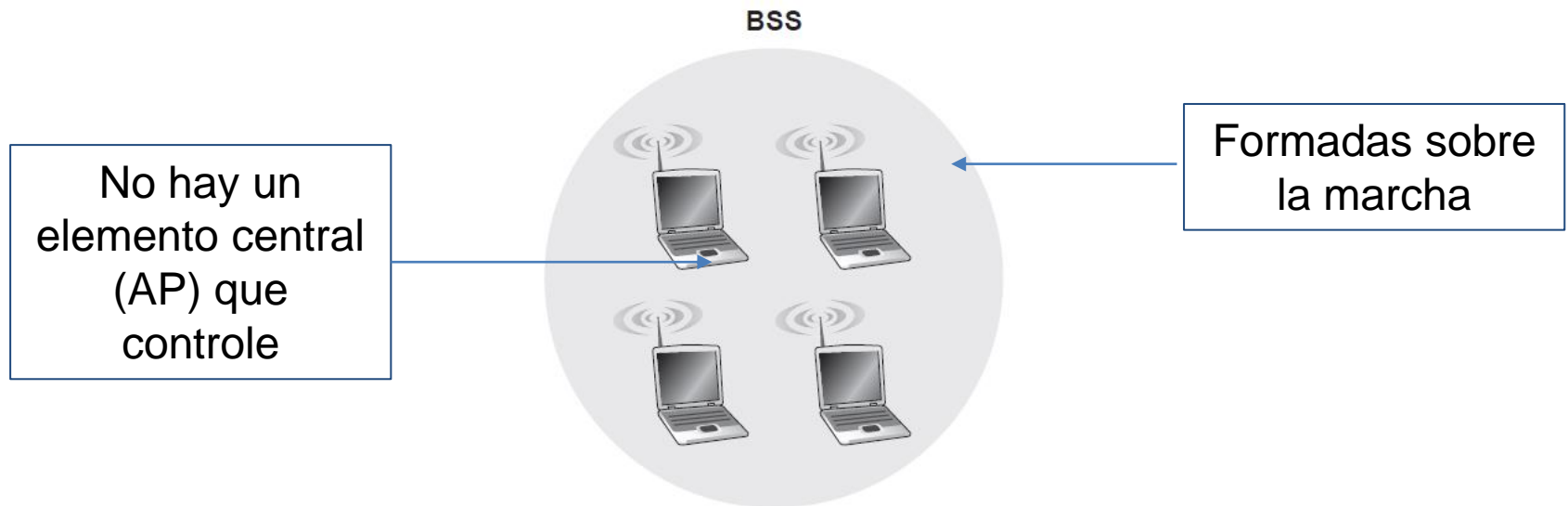
# ESS

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



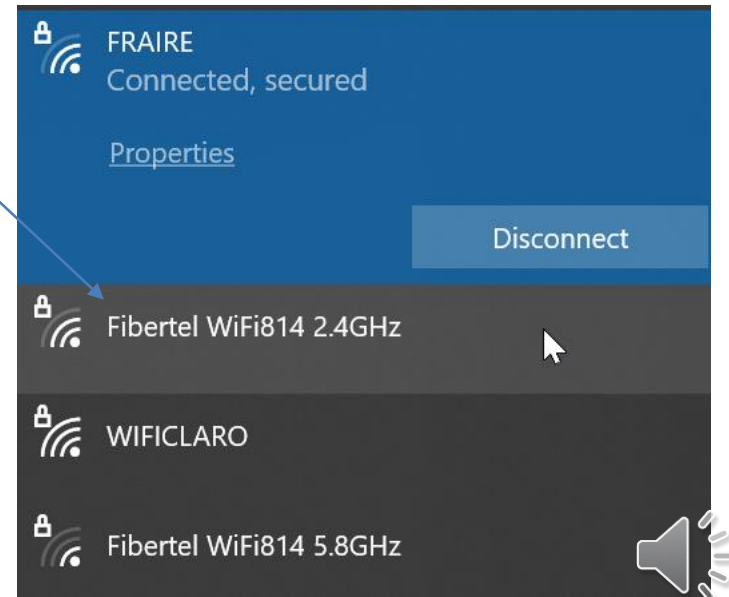
# Ad Hoc

- 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



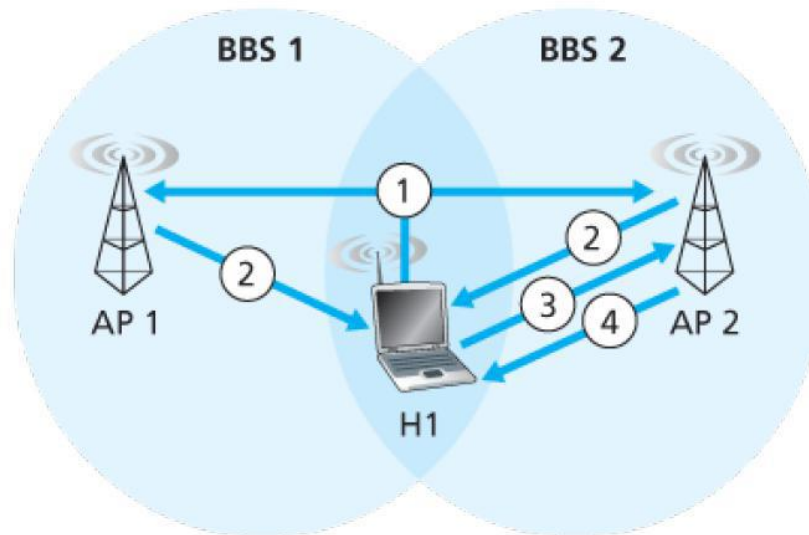
# Canales y Asociación

- 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)



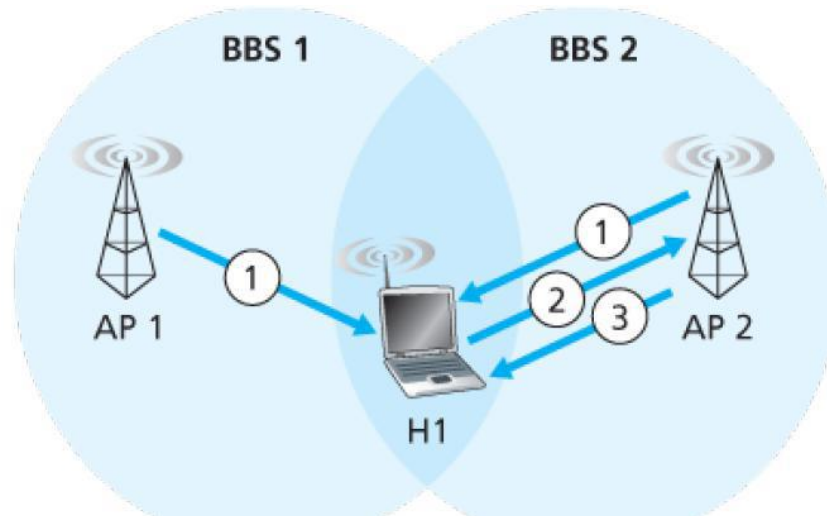
# Canales y Asociación

- **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



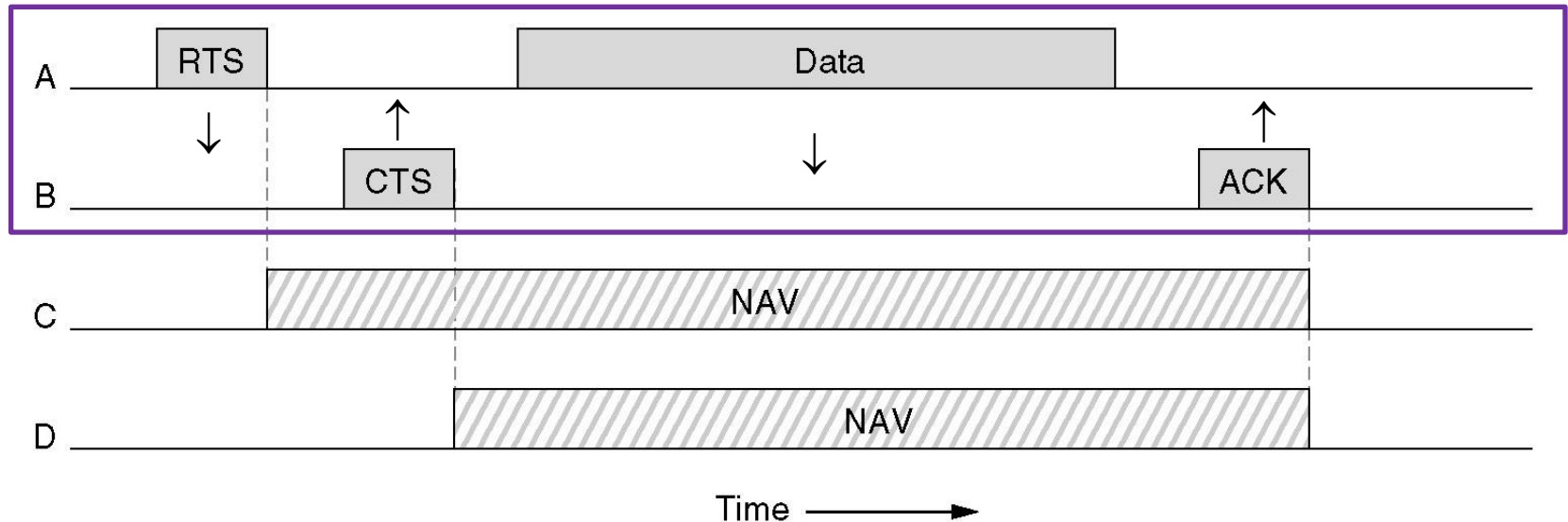
# Subcapa MAC 802.11

- 802.11 usa **CSMA/CA**
  - Acceso Múltiple con Detección de Portadora y Evitación de Colisiones
- Soporta dos modos:
  - **DCF (función de coordinación distribuida)**
    - Es para redes **ad-hoc**
  - **PCF (función de coordinación puntual)**
    - Es para redes basadas en **infraestructura (AP)**





# DCF

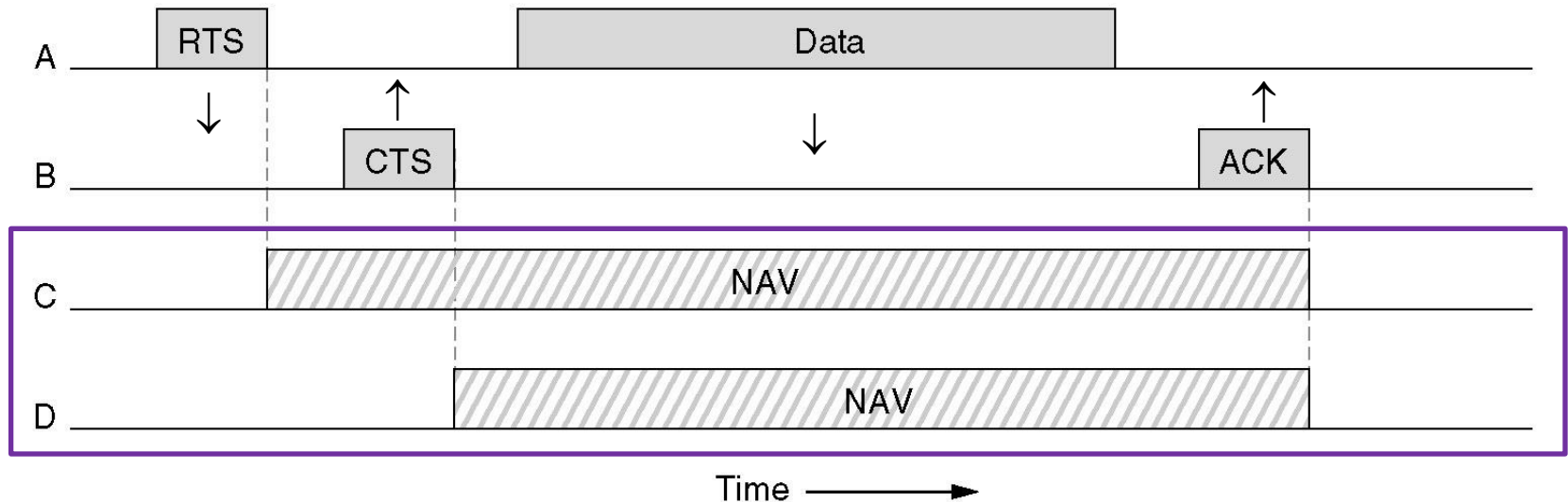


**A** desea enviar a **B**; **C** es una estación que está dentro del alcance de **A**; y **D** esta dentro del alcance de **B** pero no dentro del de **A**. Entonces:

1. **A**: envía una trama **RTS** a **B** (permiso para enviarle una trama)
2. **B**: recibe esta solicitud, y decide otorgarle el permiso: envía una trama **CTS**
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

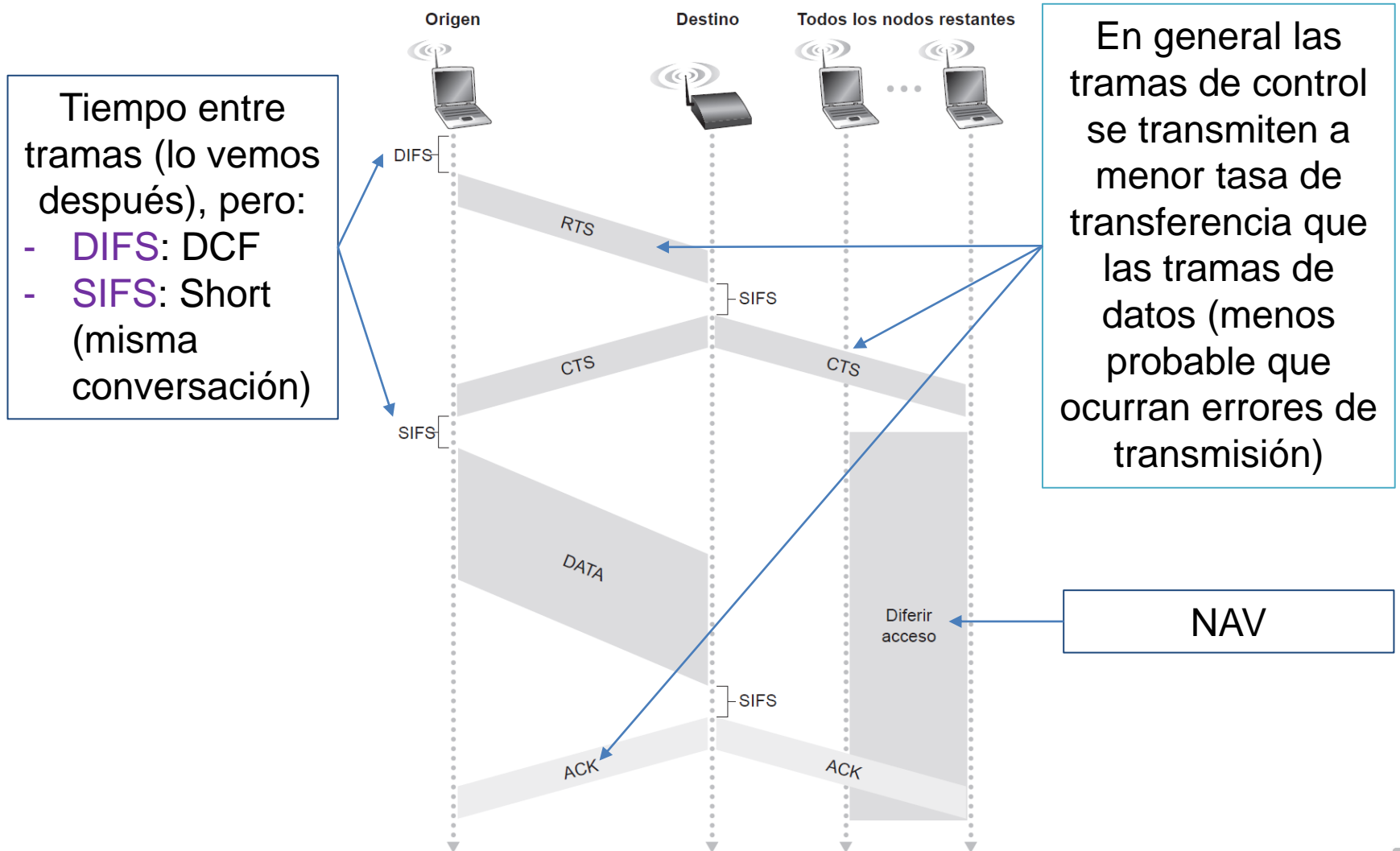


## Comportamiento de los hosts **C** y **D**:

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).
2. **D**: D escucha el CTS y también impone un canal NAV para si misma.



# DCF



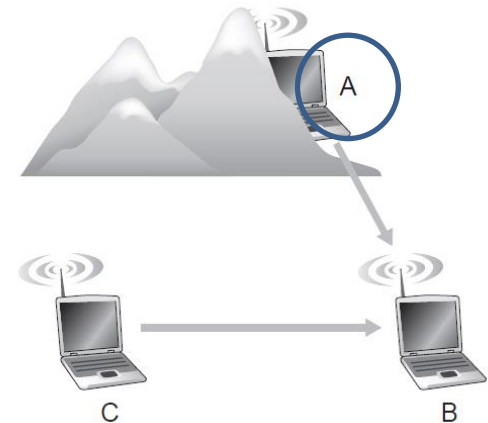
# DCF

- **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)
  - No envía nada (tiempo incluido en el RTS y CTS)
  - Luego de ese tiempo más un pequeño intervalo el canal puede ser asumido disponible otra vez y otro nodo es libre de intentar enviar



# 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**

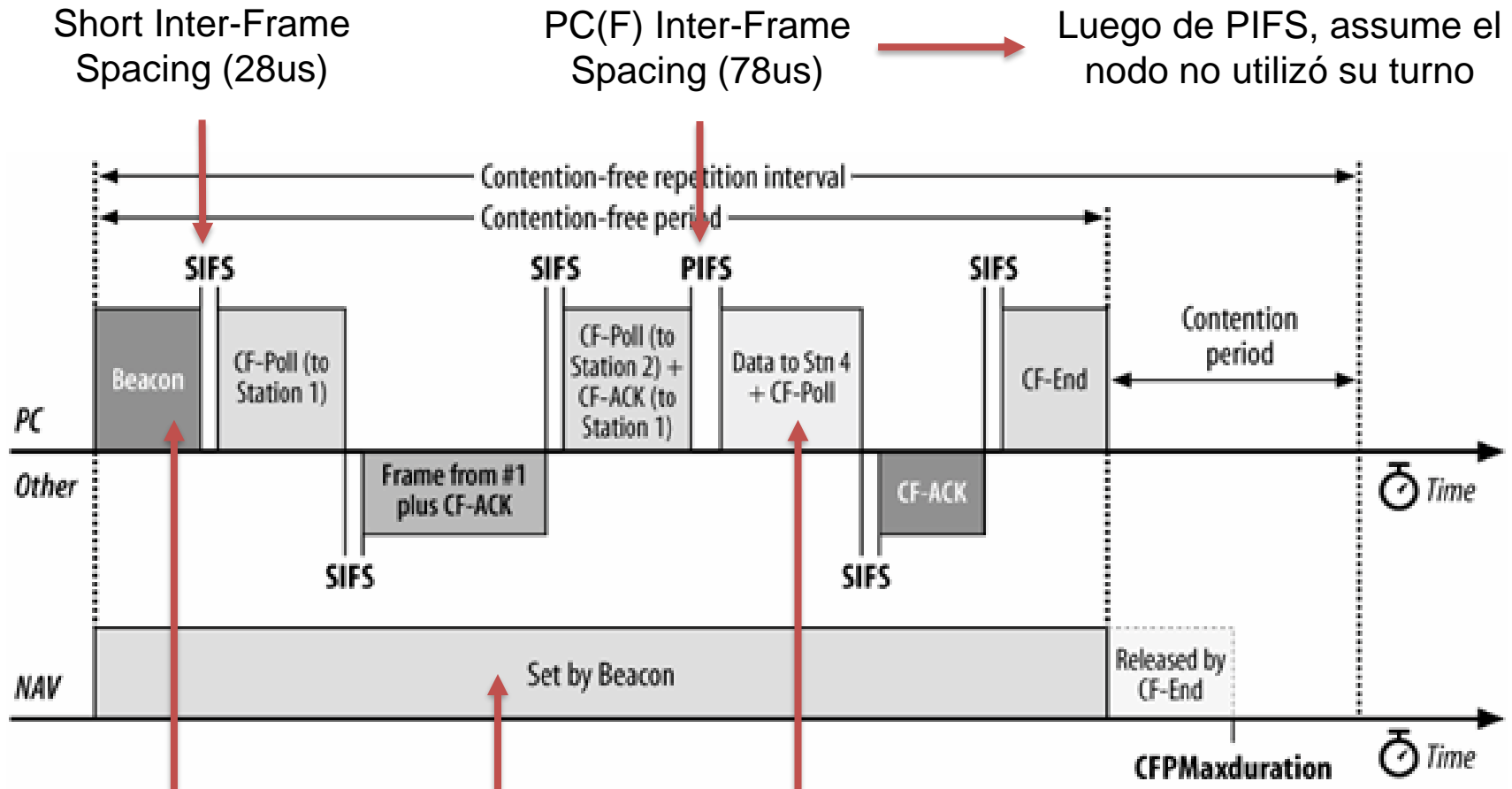


# PCF

- 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



Dice cuánto dura el período sin *contention*

Los nodos establecen el NAV

Data, polling, y ACKs se pueden combinar





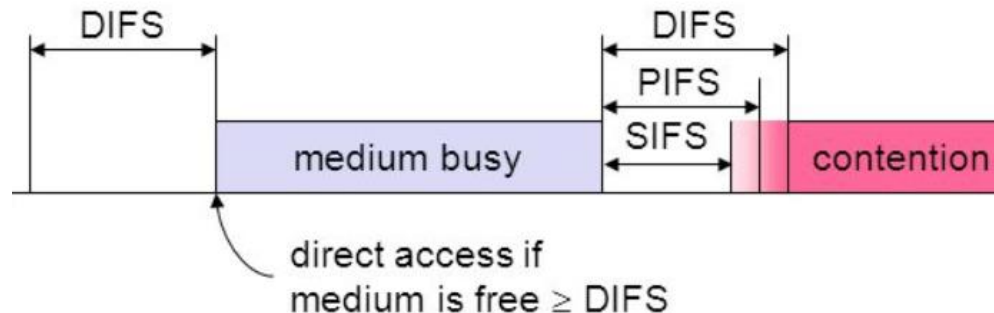
# PCF

- **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

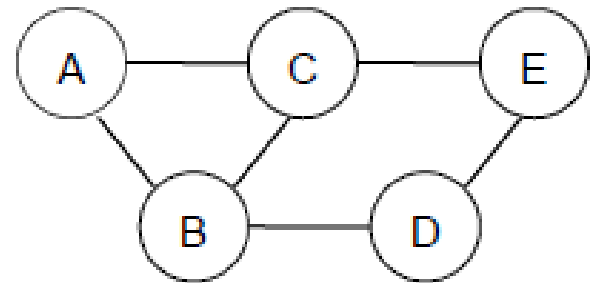
- Luego de un período de PCF, viene un DCF (con CSMA/CA), cuyas conversaciones se rigen por un DIFS
- Si el AP no tiene nada que decir y ocurre un tiempo DIFS, cualquier estación puede intentar adquirir el canal



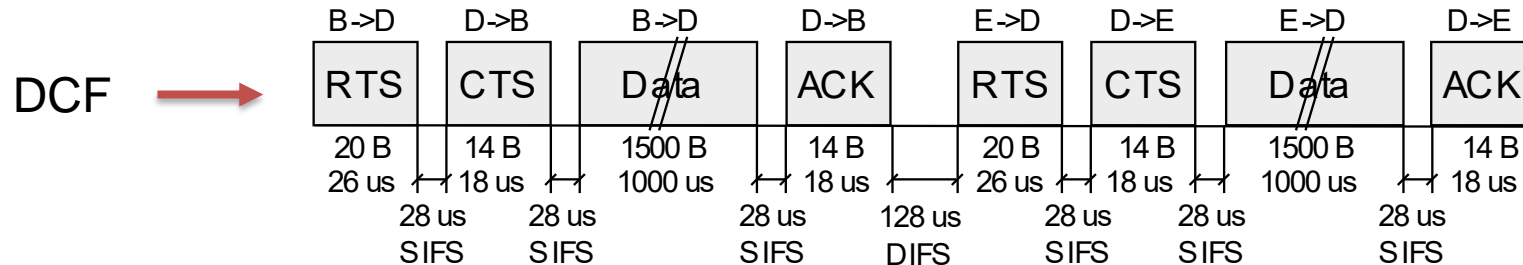
# Ejercicio (DCF vs PCF)

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.



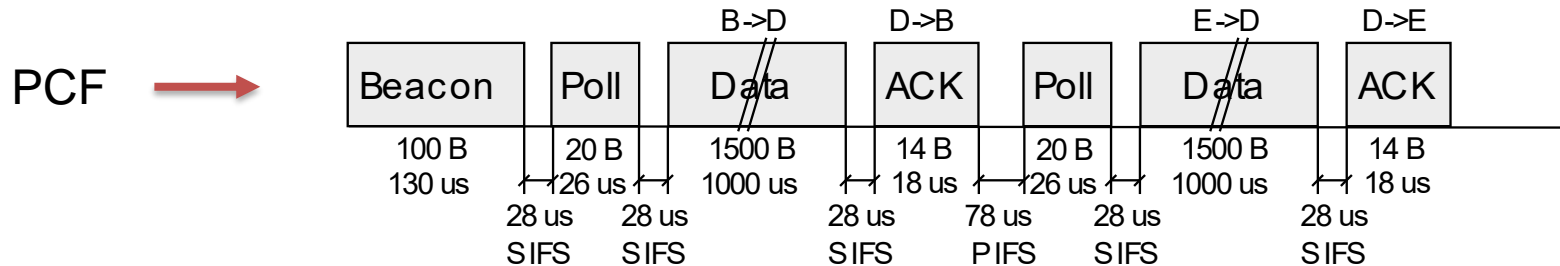
# Ejercicio (DCF vs PCF)



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.

