



90  
AÑOS

PONTIFICIA  
UNIVERSIDAD  
CATÓLICA  
DEL PERÚ

## Redes inalámbricas

Dr. Jordi Casademont

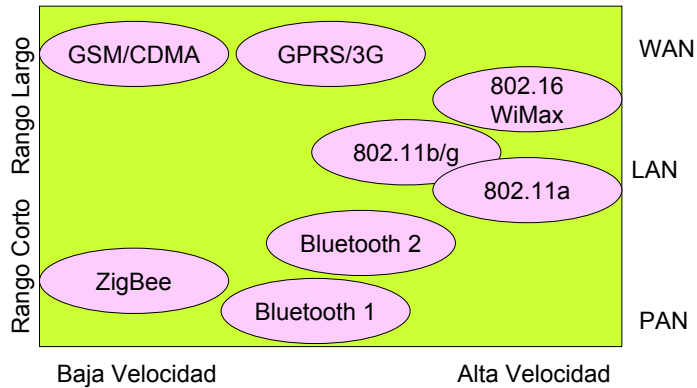
E-mail: [jordi.casademont@entel.upc.edu](mailto:jordi.casademont@entel.upc.edu)

Departamento de Ingeniería Telemática  
Universidad Politécnica de Cataluña (UPC)

## Contenido

- Conceptos preliminares
- IEEE 802.11 – Wi-Fi
- IEEE 802.16 – WiMAX
- IEEE 802.15.1 – Bluetooth
- IEEE 802.15.4 – ZigBee
- Nuevas redes donde aplicar estas tecnologías
- Nuevas propuestas

## Situación actual de las redes inalámbricas



## Bibliografía

- W. Stallings, "Wireless communications and networks", Second Edition. Ed. Pearson Education International. 2005.
- M. S. Gast, "802.11 Wireless Networks. The definitive guide", Second edition. Ed. O'Reilly. 2005.
- L. Nuaymi, "WiMAX. Technology for broadband wireless access". Ed. Wiley. 2007.
- B. A. Miller, C. Bisdikian, "Bluetooth revealed". Ed. Prentice Hall. 2001.

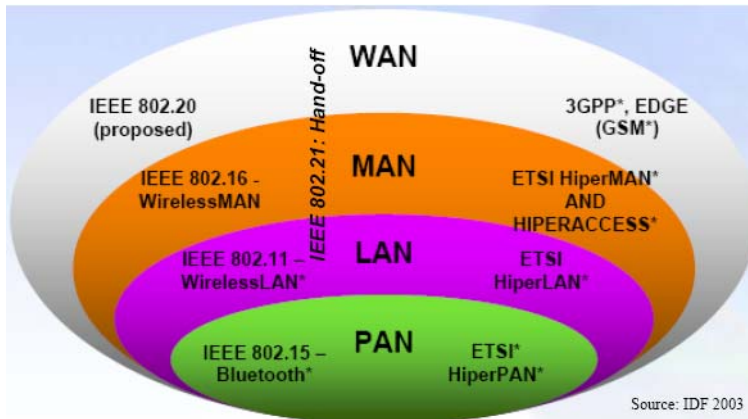
## Conceptos preliminares

- Evolución de las tecnologías de acceso
- Técnicas de acceso múltiple
- Características del enlace radio
- Celularización

## Tecnologías de acceso

- Tecnologías por cable:
  - xDSL (ADSL, HDSL, SDSL, VDSL,...)
  - Cable-modem
  - PLC
- Tecnologías inalámbricas:
  - Radio móvil (GSM, GPRS, UMTS)
  - Satélite
  - Sistemas punto-multipunto: (LMDS, WiMAX)
  - WLAN: Wi-Fi
  - WPAN en redes mesh

## Tecnologías inalámbricas



## Tecnologías por radio

- Radio móvil (GSM, GPRS, UMTS)
  - GSM (1990):
    - Teórico: 9.6 Kbps – Real: 9.6 Kbps
  - Evoluciones del GSM permiten tasas superiores:
    - HSCSD (High Speed Circuit Switched Data):
      - Teórico: 57.6 Kbps – Real: 28.8 Kbps.
    - GPRS (General Packet Radio Service):
      - Teórico: 171.2 Kbps – Real: 44 Kbps.
    - EDGE (Enhanced Data Rates for GSM Evolution):
      - Teórico: 384 Kbps – Real: 70 Kbps.
  - UMTS (Universal Mobile Telecommunications System):
    - Teórico: 384 Kbps a 2 Mbps – Real: 100 Kbps.
    - HSDPA (High-Speed Downlink Packet Access)
      - Teórico: 14 Mbps – Real: 1.1 Mbps.
    - HSUPA (High-Speed Uplink Packet Access): igual pero en uplink

## Tecnologías por radio

- **Satélite**
  - La tecnología satelital permite ofrecer el servicio de acceso a Internet de banda ancha a un coste independiente de la ubicación
  - El estándar DVB-RCS (Digital Video Broadcasting – Return Channel via Satellite, ETSI EN 301 790) permite prestar servicio con tasas en el canal de retorno superiores a 2 Mbps, con antenas de pequeño tamaño (inferiores a 1 metro)
  - Existen sistemas que emplean el estándar DOCSIS, originalmente diseñado para redes de cable, pero adaptado al enlace satelital
  - Sistemas de órbita Geoestacionaria (GEO) y de órbita baja (LEO)

## Tecnologías por radio

- **Primeros sistemas punto multipunto:**
  - Bucle de abonado sin hilos:
    - Radio Local Loop – Wireless Local Loop
  - Requieren línea de vista
  - Los parámetros de transmisión son fijos
  - Tienen mala cobertura
  - No ofrecen Calidad de Servicio
  - Hacen uso ineficiente del espectro

## Tecnologías por radio

- Segunda generación: Sin estándares
  - FBWA: Fixed Broadband Wireless Access
  - Operación con LOS o NLOS
  - Soporte para voz, video y datos
  - Calidad de servicio (QoS)
  - Distribución dinámica del ancho de banda (DAMA)
  - Varias denominaciones:
    - Multichannel Multipoint Distribution System (MMDS): 2 GHz
    - Microwave Video Distribution System (MVDS): 12 GHz y 42 GHz
    - Local Multipoint Distribution Services (LMDS): 26 - 31 GHz
    - Local Multipoint Communications System (LMCS): Es una versión modificada de LMDS utilizada en Canadá y Brasil.

## Tecnologías por radio

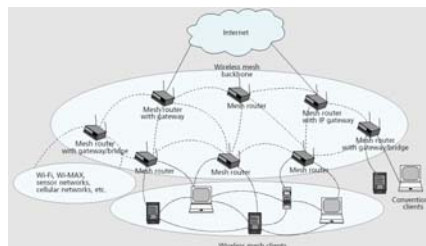
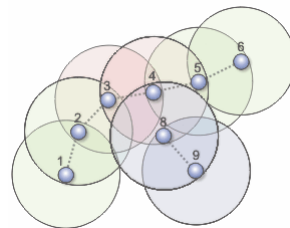
- Tercera generación: WiMAX – IEEE 802.16
  - Estándar para Wireless MAN: acceso inalámbrico de banda ancha punto - multipunto
  - Sistemas de alta capacidad y fácil instalación
  - Provee un uso más eficiente del ancho de banda
  - Integra mecanismos de QoS a nivel físico
  - Disponible tanto en bandas licenciadas como en no licenciadas
  - Certificación de productos por la organización WiMAX Forum

## Tecnologías por radio

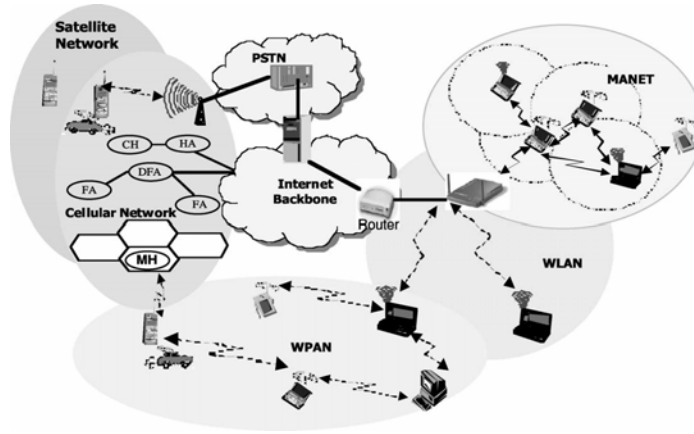
- Wi-Fi (Wireless Fidelity): IEEE 802.11
  - Varias tasas: desde 1 Mbps hasta 54 Mbps
  - Alcance limitado, al no permitir la regulación una PIRE (Potencia Isotrópica Radiada Equivalente) superior a 100 mW (2.4 GHz) y 1 W (5 GHz)
  - Riesgo de interferencias (bandas no licenciadas de uso común)
  - Mecanismo MAC poco eficiente para muchos usuarios
  - Bajo coste

## Tecnologías por radio

- Situación futura:
  - Incorporación de dos nuevos factores:
    - Redes multsalto:
  
- Redes mesh:
  - Permiten utilizar redes de corto alcance (WPAN) Bluetooth o Zigbee como redes de acceso

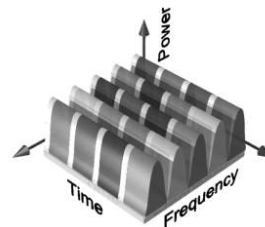
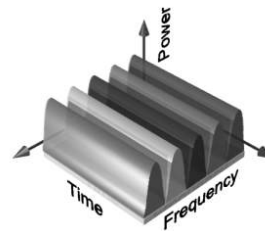
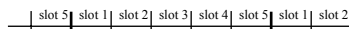


## Situación futura: 4ª Generación



## División del espectro

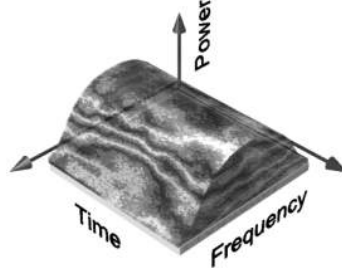
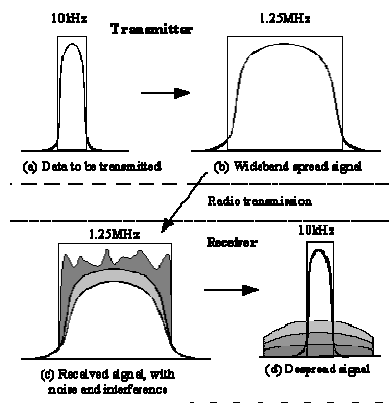
- División en frecuencia
  - FDMA Frequency Division Multiple Access
  
- División en tiempo
  - TDMA Time Division Multiple Access





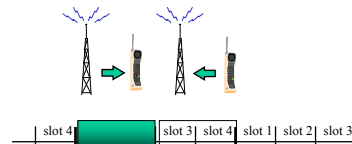
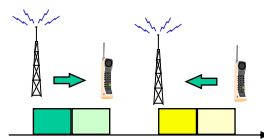
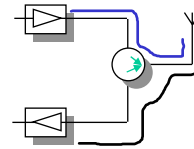
## División del espectro

- División en código: CDMA Code Division Multiple Access



## Direcciones de la comunicación

- FDD: Frequency Division Duplex
  - Una frecuencia para cada dirección
- TDD: Time Division Duplex
  - Intervalos alternativos de tiempo para la transmisión y recepción



## Propagación radio

- Modelos de propagación:
  - Muy complicados de calcular
  - Dependen en gran medida del entorno de utilización
    - Line of Sight (LOS)
    - Non Line of Sight (NLOS)
  - Tipos de modelos de propagación
    - Teóricos: asumen condiciones teóricas de propagación
    - Físicos: asumen además predicciones sobre efectos de reflexiones y propagación multicamino. Utilizan software específico con cartografía tridimensional para calcular la potencia recibida en cualquier punto
    - Empíricos: Se basan en medidas realizadas en el área de propagación

## Pérdidas de propagación LOS

- Documento IEEE 802.16a-2003 ejemplos de cálculo
  - En el IEEE 802.16-2004 (que engloba todo) los han quitado
- Cálculo general de la potencia recibida para LOS
  - $PR = PT + GT + GR - L_p$
  - Pérdidas de propagación en espacio libre (1 pendiente):

$$L_p = 20 \log_{10} \left( \frac{\lambda}{4\pi d} \right) = 32,44 + 20 \log f + 20 \log d$$

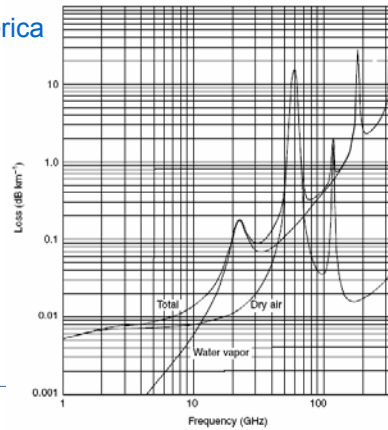
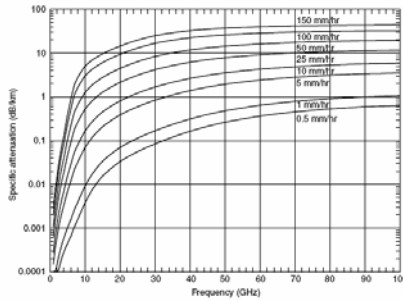
- Pérdidas de propagación en espacio libre (2 pendientes):

$$L_p = L_{d0} + 10n \log_{10} \left( \frac{d}{d_0} \right) = 20 \log_{10} \left( \frac{\lambda}{4\pi d_0} \right) + 10n \log_{10} \left( \frac{d}{d_0} \right)$$

- $d$  = distancia en Km       $f$  = frecuencia en MHz
- $n$  = exponente de pérdidas

## Pérdidas debidas a la lluvia

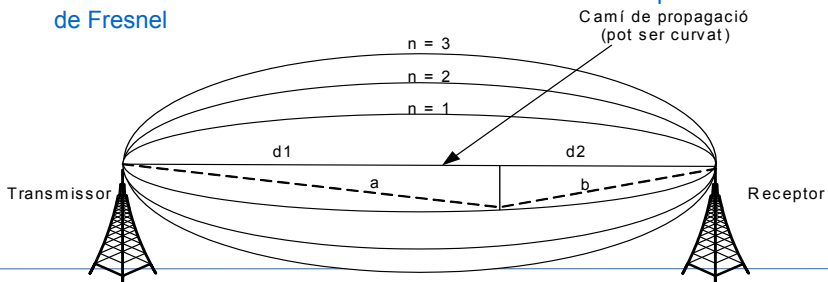
- Atenuación de la señal radioeléctrica al atravesar moléculas de agua
  - Depende de la humedad atmosférica
  - Picos por la ionización de las moléculas de agua



Rede

## Propagación radio: zonas de Fresnel

- Los rayos se propagan en diferentes curvaturas debido a la refracción atmosférica
  - Las diferentes componentes suman o restan dependiendo del retardo producido por la diferencia del camino de propagación
  - El límite de una zona de Fresnel es cuando el incremento del camino respecto a la anterior es igual a la  $\lambda / 2$
  - Se considera visibilidad directa si está libre el 60% de la primera zona de Fresnel



Redes inalámbricas

## Pérdidas de propagación NLOS

- El modelo IEEE 802.16 (Erceg): pruebas AT&T en 95 emplazamientos de macroceldas a 1.9 GHz (802.16.3c-2001):

$$L_p = 20 \log_{10}(4\pi d_0 / \lambda) + 10\gamma \log_{10}(d / d_0) + \Delta PL_h + \Delta PL_f + s$$

- Definido para 3 zonas de terreno:
  - Categoría A: Montañoso con densidades medias y altas de árboles
  - Categoría B: Intermedio
  - Categoría B: Plano con baja densidad de árboles
  - $\gamma$  = exponente de pérdidas =  $(a - b h_b + c / h_b)$
  - $h_b$  = altura de la estación base
  - $d_0$  = distancia de referencia = 100 m

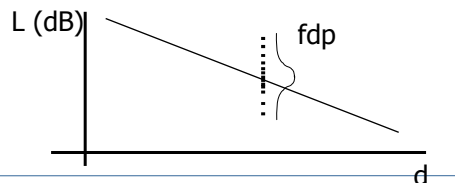
	Terreno A	Terreno B	Terreno C
a	4.6	4	3.6
b	0.0075	0.0065	0.005
C	12.6	17.1	20

Redes inalámbricas

## Pérdidas de propagación NLOS

- Modelo Erceg para frecuencias cercanas a 2 GHz
  - Corrección para aplicarlo de 2 a 6 GHz
    - $\Delta LP_f = 6 \log(f / 2000)$  f en MHz
- Modelo Erceg para alturas de antena de 10 a 80 m
  - Corrección para aplicarlo con antenas de 2 a 10 m
    - $\Delta LP_h = -20 \log(h / 2)$  h en metros
- Atenuación por sombras o shadowing lento
  - Distribución log-normal:

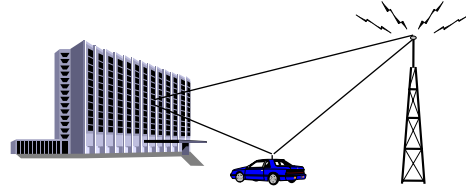
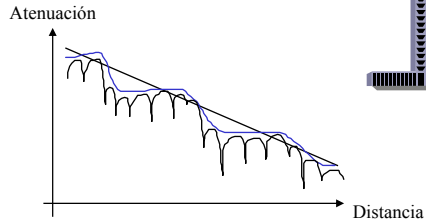
- Media: 0 dB
- Varianza:
  - A = 10.6 dB
  - B = 9.6 dB
  - C = 8.2 dB



Redes inalámbricas

## Otros problemas

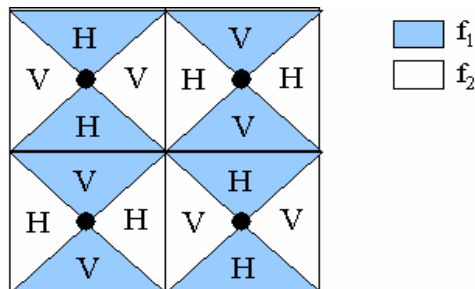
- Atenuación multicamino
  - Atenuación rápida



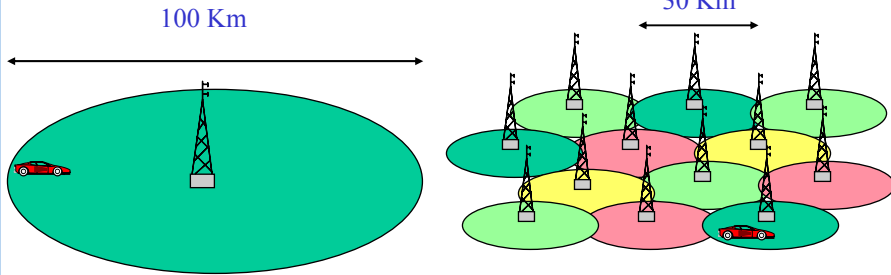
- Se puede combatir con:
  - Micro diversidad en espacio
  - Diversidad en frecuencia
  - Entrelazado

## Sectorización y polarización

- Antenas directivas: 180°, 120°, 90°, ....
- Polarizaciones más utilizadas: horizontal y vertical



## Idea celular



- Mucha potencia transmitida
- No existe la posibilidad de reuso de frecuencia

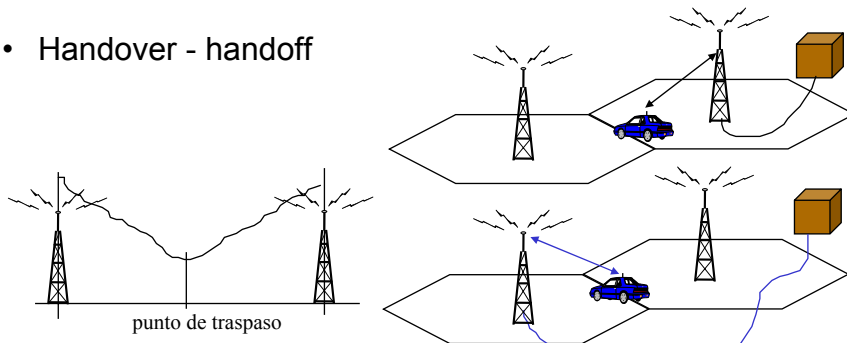
- Transmisión de menos potencia
- Posibilidad de reutilización de frecuencias



PLAN DE FRECUENCIAS

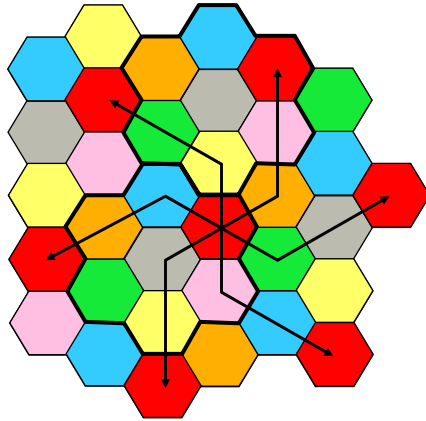
## Traspaso

- Incrementa la complejidad del sistema
- Handover - handoff



## Teselación con geometría hexagonal

- Se repite el proceso para cada frecuencia
  - Desplazamiento de  $y$  unidades en una dirección y  $j$  en otra desviada  $60^\circ$
- Agrupaciones de celdas o "clusters"
  - Grupo de celdas que contiene todos los canales del sistema una única vez
- Interferencia co-canal

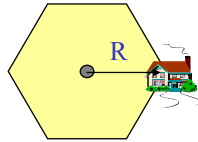


## Selección Dinámica de Frecuencias

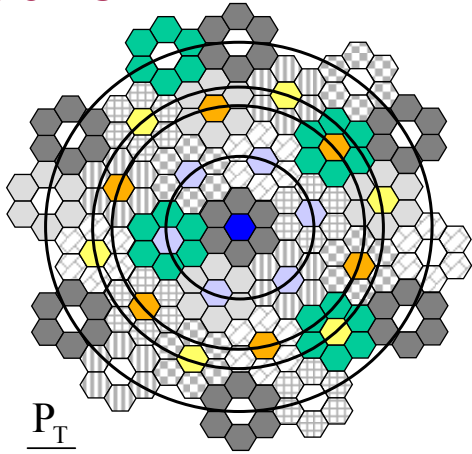
- FCA: Fixed Channel Allocation
  - Se debe realizar una planificación frecuencial
  - Cada BS siempre utiliza la misma/s frecuencias
- DCA: Dynamic Channel Allocation
  - Cada BS utiliza la frecuencia que menos interferencia tiene en aquel momento
  - En España es obligatorio en bandas sin licencia
    - DFS: Selección Dinámica de Frecuencia

## Cálculo de la Relación C/I

- Celdas Interferentes:
  - La mayor parte de la potencia interferente proviene de la primera corona
- Se considera la peor posición para el móvil:



$$P_R \propto \frac{P_T}{d^\gamma}$$



## Cálculo aproximado de la Relación C/I

$$P_R \propto \frac{P_T}{d^\gamma} \quad \begin{array}{l} D = \text{distancia entre celdas interferentes} \\ R = \text{radio de una celda} \end{array}$$

$$\frac{C}{I} = \frac{C}{6 I_K} = \frac{\frac{P_T}{R^\gamma}}{6 \frac{P_T}{D^\gamma}} = \frac{1}{6} \left( \frac{D}{R} \right)^\gamma$$

- Si utilizamos antenas directivas el número de interferentes disminuye y la C/I aumenta
- Control de potencia: permite disminuir la interferencia

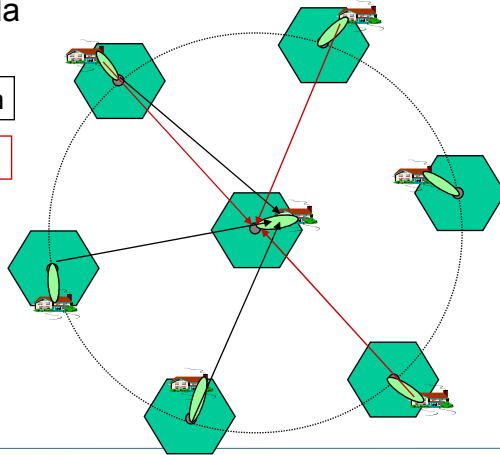


## Relación C/I

- Diferente situación para el canal de subida y el de bajada

canal de bajada

canal de subida



## IEEE 802.11 – Wi-Fi

- Estándares del grupo IEEE 802.11
- Conceptos básicos
- Nivel físico
- Mecanismos de control de acceso al medio: CSMA/CA
- Funciones de control del estándar
- Estudio de la capacidad del sistema
- Seguridad (802.11i)
- Propuestas de calidad (802.11e)
- Mesh Networks (802.11s)

## Estándares de WLAN

Sistema	Organismo	Capacidad	Espectro
802.11	IEEE	2 Mbps	2,4 GHz
802.11b	IEEE	11 Mbps	2,4 GHz
802.11a	IEEE	54 Mbps	5 GHz
802.11g	IEEE	54 Mbps	2,4 GHz
HiperLAN 1	ETSI	23,5 Mbps	5 GHz
HiperLAN 2	ETSI	54 Mbps	5 GHz
HomeRF	IEEE	1 Mbps	2,4 GHz

## Evolución de los estándares

	2.4 GHz	5 GHz
1996	Proxim OpenAir FH 1.6 Mbps	ETSI BRAN H1 23 Mbps
1997	IEEE 802.11 1, 2 Mbps	
1998		
1999	HomeRF FH 1.6 Mbps	IEEE 802.11a 6-54 Mbps
	IEEE 802.11b 1, 2, 5.5, 11 Mbps	
2000		ETSI BRAN H2 54 Mbps
2003	IEEE 802.11g 6-54 Mbps	

## IEEE 802.11

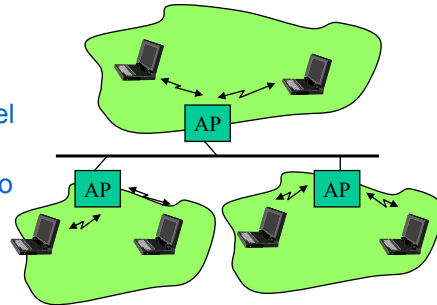
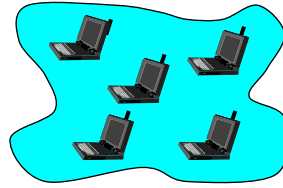
- Grupos dedicados a interconexión: 802.11
  - 802.11: WLAN a 2.4 GHz y 2 Mbps
  - 802.11a: WLAN a 5 GHz y 54 Mbps
  - 802.11b: WLAN a 2.4 GHz y 11 Mbps
  - 802.11c: Recomendaciones sobre puentes
  - 802.11d: Regulaciones de países específicos
  - 802.11e: Soporte de QoS
  - 802.11f: Interoperabilidad entre equipos, traspaso
  - 802.11g: WLAN a 2.4 GHz y 54 Mbps (junio del 2003)
  - 802.11h: Gestión del espectro radio a 5 GHz en Europa: selección dinámica de frecuencia y control de potencia
  - 802.11i: Seguridad
  - 802.11j: Regulación de 5 GHz en Japón
  - 802.11k: Medidas sobre WLANs
  - 802.11m: Mantenimiento y corrección de las especificaciones
  - 802.11n: WLAN a 100 Mbps
  - 802.11s: Redes mesh

## Características de las WLAN

- No son una sustitución de las LAN convencionales, sino una extensión
- Ventajas:
  - Flexibilidad
  - Coste de instalación inferior
  - Permiten movilidad de los usuarios
- Desventajas:
  - Velocidad inferior
  - Menos fiabilidad, más sensibles a interferencias y errores de propagación
    - Peor probabilidad de error:  $P_{e-fo} = 10^{-10}$  ;  $P_{e-wlan} = 10^{-5}$
  - Restricciones marcadas por el gobierno

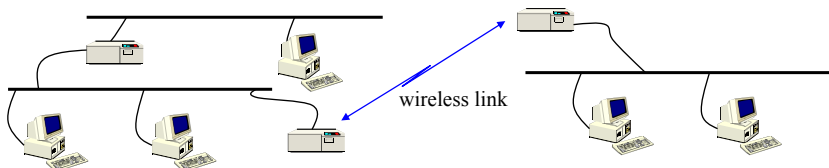
## Topologías de red

- Ad hoc: de diseño particular
  - Más flexibles
  - Todos los nodos necesitan estar al alcance de todos los demás
  - No hay comunicación entre redes
- Con infraestructura
  - Permite encaminamiento con el resto de la red
  - El punto de acceso actúa como puente con otros ordenadores WLAN



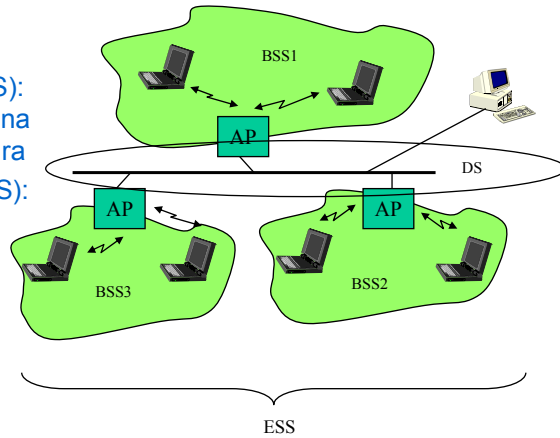
## Topologías de red

- Enlaces sin hilos (wireless local bridges)
  - Puentes remotos:
    - Funcionan como filtros de tramas
    - Puentes transparentes: aprenden direcciones
    - Compatibles con IEEE 802.3



## Nomenclatura

- Access Point (AP): wireless hub
- Basic Service Set (BSS): estaciones y AP bajo una misma área de cobertura
- Distribution System (DS): red que conecta los diferentes AP
- Extended Service Set (ESS): varios BSS colindantes



## Productos

- Tarjetas PCMCIA y adaptadores PCI y USB



## Productos

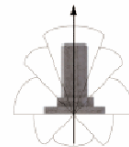
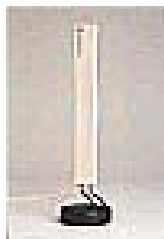
- Puntos de acceso

Technical Specifications	
Standard Compliance	IEEE 802.11b Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS) FCC Part 15 Approved, ETSI compliant
Security	Wired Equivalent Privacy Encryption (WEP)
Data Rate	1, 2, 5.5, 11 Mbps per Channel, Auto fall back
Operating Range (Open Environment)	140m at 11Mbps, 200m at 5.5Mbps, 400m at 1Mbps
Close office Range	30m at 11Mbps; 35m at 5.5Mbps; 50m at 1Mbps
Warranty	1 Year
Compatibility	Fully interoperable with IEEE 802.11b compliant products
Antenna	Build In Diversity
Modulation	CCK (11Mbps, 5.5Mbps), DQPSK(2Mbps), DBPSK(1Mbps) Auto Rate Selection
No of Channel	2.4 GHz Frequency Band
Operation Frequency	USA & Canada: 11 channels, (2.412 – 2.462 GHz) Europe (ETSI): 13 channels, (2.412 – 2.472 GHz) Japan: 14 channels, (2.412 – 2.484 GHz)
Radio Type	Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS)
Sensitivity (@ 11Mbps), dBm	-83dBm @ 11Mbps
RF Output Power	+1.3dBm
LEDs Indicators	Link, LAN, WLAN, AP, Power



## Productos

- Antenas



### SMCANT-DI105

#### Features

#### Frequency Range

- 2.400- 2.483GHz

#### Gain

- 10.5dBi

#### Polarisation

- Elliptical

#### Connector

- N Female

#### Beam Width (-3dB)

- 50 Degrees

#### VSWR

- <1.22

#### F/B Ratio

- 28dB

#### Impedance

- 50 Ohm

#### Height

- 11.63cm

#### Width

- 11.1cm

#### Length

- 15.95cm

#### Weight

- 311.8gm

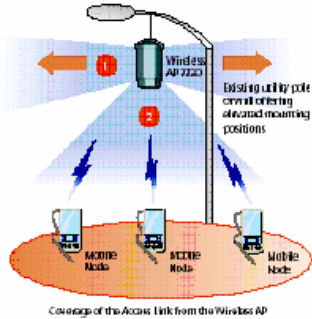
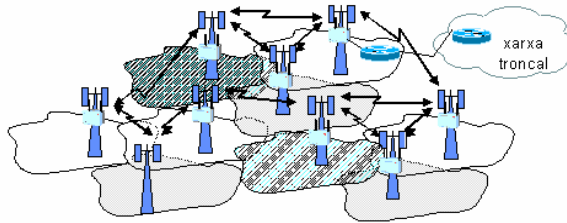
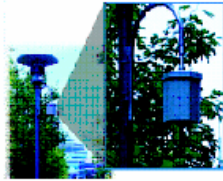
#### Wind Loading

- 200kph

#### Max. Range

- 8km

# Otras implementaciones: backhaul



Ferran Trillas

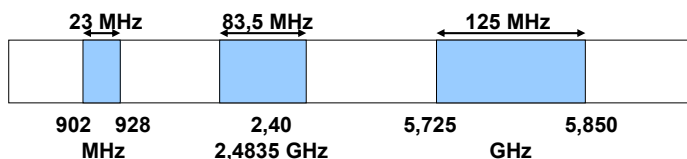
# Nivel físico

## Medios de transmisión

- Infrarrojos:
  - Longitud de onda: 850 - 950 nm
  - Emisores: diodos; receptores: fotodetectores
  - Utiliza luz difusa, reflejada en paredes y objetos de la habitación
  - Velocidades: 115 Kbps, 1.152 Mbps, 4 Mbps
  - Económicos, utilizados en todo tipo de dispositivos pequeños
  - Sin licencia
  - No interfieren con dispositivos radio
  - No traspasan objetos

## Medios de transmisión

- Radio:
  - Banda ISM (Industrial, Scientific and Medical Unlicensed Band): 2.4 – 5 GHz
  - Permiten atravesar muros
  - Velocidades de transmisión más elevadas
  - Dos tipos de acceso de espectro ensanchado + OFDM
    - Frequency Hopping Spread Spectrum (FHSS)
    - Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS)





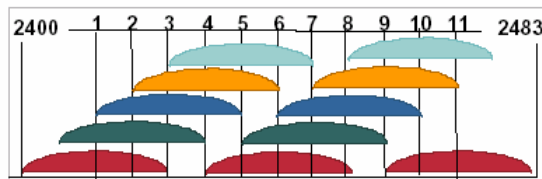
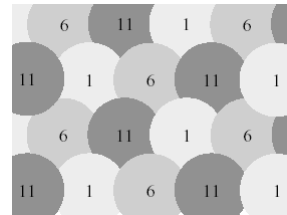
## Espectro a 2.4 GHz

- Aspectos radio:
  - Se divide la banda en 14 bloques de 25 MHz de ancho de banda y separados una frecuencia de 5 MHz
  - El bloque utilizado es un parámetro configurable de la BSS
  - No todos los países tienen aceptados todos los bloques
  - Dos BSS solapadas deben configurarse con bloques diferentes y separados al menos 25 MHz

IEEE 802.11b Allocated Channels			
Channel ID	FCC	Start Freq.	End Freq.
*1	2412	2400	2424
2	2417	2405	2429
3	2422	2410	2434
4	2427	2415	2439
5	2432	2420	2444
*6	2437	2425	2449
7	2442	2430	2454
8	2447	2435	2459
9	2452	2440	2464
10	2457	2445	2469
*11	2462	2450	2474
12	2467	Not supported in IEEE Standard	
13	2472	Not supported in IEEE Standard	
14	2484	Japan Only	

## Espectro a 2.4 GHz

- Frecuencias en 2.4 GHz en DSSS
  - 3 canales sin superposición
  - Canales de 22 MHz



802.11b/g WLAN Channels

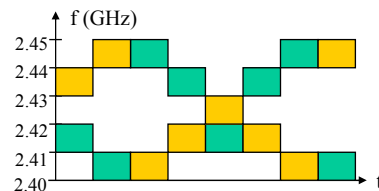
## Espectro a 5 GHz

- Frecuencias en 5 GHz
  - 12 canales sin superposición
  - Canales de 20 MHz

Band	Operating Channel	Center Freq.
Lower Band	36	5180
	40	5200
	44	5220
	48	5240
U-NII Middle Band	52	5260
	56	5280
	60	5300
	64	5320
U-NII Upper Band	149	5745
	153	5764
	157	5785
	161	5805

## Modulaciones: FHSS

- IEEE 802.11
- Frequency Hopping Spread Spectrum
- Modula los datos digitales con una señal de banda estrecha a una portadora que va cambiando
- Cada comunicación tiene una secuencia de frecuencias portadoras diferentes de forma que no se solapan
  - Tanto el emisor como el receptor deben conocer la secuencia de emisión de antemano
  - Utilizar 75 o más frecuencias
  - Tiempo máximo en una frecuencia (dwell time) de 400 ms
- Se denomina de espectro ensanchado porque una señal ocupa toda la banda, pero no simultáneamente

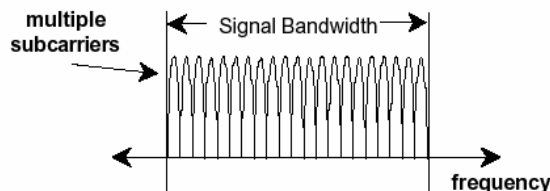


## Modulaciones: DSSS

- IEEE 802.11 y IEEE 802.11b (HR – High Rate)
- Direct Sequence Spread Spectrum
- Combina la señal a transmitir con el código de usuario (chipping code):
  - Sólo existe una secuencia de chip para todos los sistemas
    - Código de Barker
    - Es la diferencia entre DSSS y CDMA (éste utiliza más de una)
- Tiene como objetivo el ensanchar el espectro para dar robustez a la comunicación
- Permite velocidades superiores a 2 Mbps
- Es más eficiente que el FHSS

## Modulaciones: OFDM

- IEEE 802.11a / g
- ERP-OFDM: Extended Rate Physical - Orthogonal Frequency Division Multiplexing
  - 52 portadoras: 48 (datos) + 4 (pilotos - subportadoras a menor velocidad de símbolo)



## Codificaciones

- 802.11:
  - 1 Mbps: DBPSK (Differential Binary Phase Shift Keying), 1 bit/símbolo
  - 2 Mbps: DQPSK (Differential Quadrature Phase Shift Keying), 2 bit/símbolo
- 802.11b:
  - CCK: Complementary Code Keying

Vel. datos	Longitud del código	Modulación	Vel. símbolo	Bits/Símbolo
1 Mbps	11 (Barker Sequence)	BPSK	1 MSps	1
2 Mbps	11 (Barker Sequence)	QPSK	1 MSps	2
5.5 Mbps	8 (CCK)	QPSK	1.375 MSps	4
11 Mbps	8 (CCK)	QPSK	1.375 MSps	8

## Codificaciones

- 802.11a/g
  - PSK: Phase Shift Keying
  - QAM: Quadrature Amplitude Modulation

Rate (Mbps)	Modulation	Coding Rate	Coded bits per subcarrier	Coded bits per OFDM symbol	Data bits per OFDM symbol
6	BPSK	1/2	1	48	24
9	BPSK	3/4	1	48	36
12	QPSK	1/2	2	96	48
18	QPSK	3/4	2	96	72
24	16-QAM	1/2	4	192	96
36	16-QAM	3/4	4	192	144
48	64-QAM	2/3	6	288	192
54	64-QAM	3/4	6	288	216

## Resumen

Standard	Modulation Method	Frequencies	Data Rates Supported (Mbps)
802.11 legacy	FHSS, DSSS, infrared	2.4 GHz, IR	1, 2
802.11b	DSSS, HR-DSSS (CCK)	2.4 GHz	1, 2, 5.5, 11
802.11a	ERP-OFDM	5.2, 5.8 GHz	6, 9, 12, 18, 24, 36, 48, 54
802.11g	DSSS, ERP-CCK, ERP-OFDM	2.4 GHz	1, 2, 5.5, 11; 6, 9, 12, 18, 24, 36, 48, 54
"802.11g+" non-standard	DSSS, ERP-PBCC	2.4 GHz	1, 2, 5.5, 11, 22, 33
"802.11g+" non-standard	DSSS, DSSS-OFDM	2.4 GHz	1, 2, 5.5, 11; 6, 9, 12, 18, 24, 36, 48, 54

## Evolución del IEEE 802.11

- IEEE 802.11n
  - Modificaciones del MAC IEEE 802.11 y el nivel PHY para conseguir un incremento de throughput
  - Velocidades entre 108 y 320 Mbps
  - Reducción del ancho de banda consumido por la gestión y control de la red
  - Se espera para 2007
  - Las mejoras pueden llegar antes
    - los fabricantes pueden lanzar productos al mercado antes de aprobar definitivamente el estándar

## 802.11- características

- Consorcio WECA: Wireless Ethernet Compatibility Alliance
  - Actualmente unos 180 miembros
  - WI-FI: Wireless Fidelity, más de 600 productos certificados
- Utiliza direcciones de 48 bits igual que el 802.3
  - Permite multicast y broadcast
- Cada AP tiene un BSS Identifier que identifica la célula
  - Es un parámetro configurable por el administrador

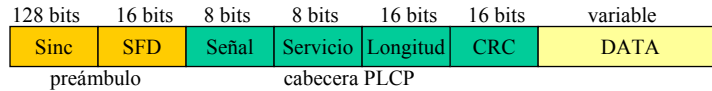
## 802.11 - Arquitectura de protocolos

- Nivel físico:
  - Physical medium dependent sublayer (PMD):
    - Modulación, codificación y decodificación de señales
    - Diferente para cada tecnología de transmisión
  - Physical layer convergence protocol (PLCP):
    - Homogenización de las PMDs
- Nivel de enlace: subcapa MAC
  - Acceso al medio
  - Roaming
  - Autenticación
  - Encriptación
  - Ahorro de energía

LLC	
MAC	Gestión MAC
PLCP	Gestión PHY
PMD	

## Capa física 802.11 - DSSS

- Formato de trama

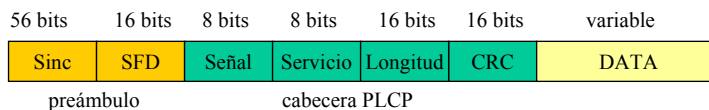


- Sincronismo: secuencia de 1 y 0, para indicar inicio de nueva trama y operaciones básicas del decodificador de DSSS
- SFD: secuencia conocida para indicar inicio de datos válidos
- Señal: indica velocidad de datos
  - Preámbulo y cabecera siempre a 1 Mbps
  - Datos a las velocidades del estándar (1 ó 2 Mbps)
- Servicio: campo reservado para usos futuros
- Longitud: duración de la trama en ms
- Header Error Check: CRC de 16 bits de la cabecera

## Capa física 802.11b - DSSS

- Formato de trama

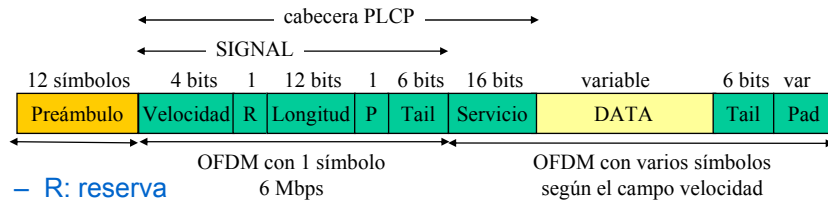
- Dos posibilidades:
  - Formato largo: Igual al 802.11
  - Formato corto: HR/DSSS



- Velocidades formato corto:
  - Preámbulo: 1 Mbps
  - Cabecera PLCP: 2 Mbps
  - Cabecera MAC + DATOS: 2, 5.5 y 11 Mbps

## Capa física 802.11a/g - OFDM

- Formato de trama:



- R: reserva
- Longitud: número de bytes de la trama
- P: paridad par de los campos: velocidad + R + longitud
- Servicio: sincronización del des-aleatorizador y reserva
- Tail: todo 0, para ayudar al proceso de recepción
- Relleno para hacer la trama múltiplo de 48, 96, 192 o 288, según el código OFDM utilizado

## Nivel MAC

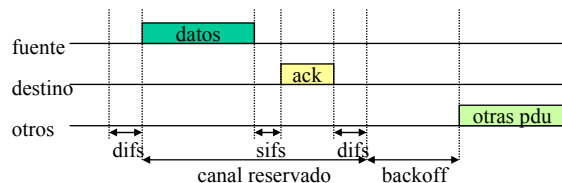


## 802.11 - Acceso múltiple

- Dos mecanismos de acceso múltiple
  - Carrier Sense Multiple Access / Collision Avoidance (CSMA / CA)
    - También denominado: Distributed Coordination Function (DCF)
    - Mecanismo de contienda similar al utilizado por Ethernet
    - No requiere coordinación centralizada
    - Dos métodos: Básico y RTS/CTS
  - Priority-based access
    - También denominado Point Coordination Function (PCF)
    - Mecanismo de sondeo (Polling), sin contienda
    - Disponible en redes con infraestructura
    - El punto de acceso actúa como coordinador central
- Los dos mecanismos pueden utilizarse en la misma red de forma alternativa

## 802.11 - DCF

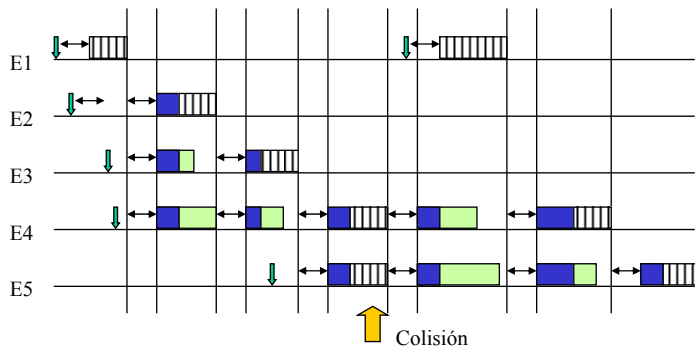
- Control de errores en el medio radio
  - Cuando se recibe el paquete se reconoce (ACK)
  - Short inter-frame spacing - DCF Inter-Frame Spacing:
    - SIFS < DIFS
    - El ACK tiene que esperar menos y por lo tanto tiene más prioridad
  - Si no se recibe el reconocimiento, se vuelve a transmitir el paquete sin preferencia frente al resto de estaciones
  - El número de retransmisiones es limitado: Caso de superar el límite devuelve error de transmisión a la capa superior



## 802.11 - DCF

- Carrier Sense Multiple Access / Collision Avoidance
  - Cuando se quiere transmitir se escucha el canal
    - Si está libre durante un tiempo DIFS se transmite
    - Si está ocupado se espera a que la transmisión termine, se espera un tiempo DIFS y después se entra en un backoff aleatorio
  - Al finalizar el backoff si el medio continúa libre se transmite
  - Si mientras se está en backoff se detecta actividad, se detiene el temporizador hasta que se pasa a reposo durante un tiempo DIFS y luego se vuelve a activar
    - No se reinicia el temporizador, así no se perjudica a los que están esperando frente a los recién llegados
  - Cuando expira el temporizador y el canal está libre se transmite

## 802.11 - DCF

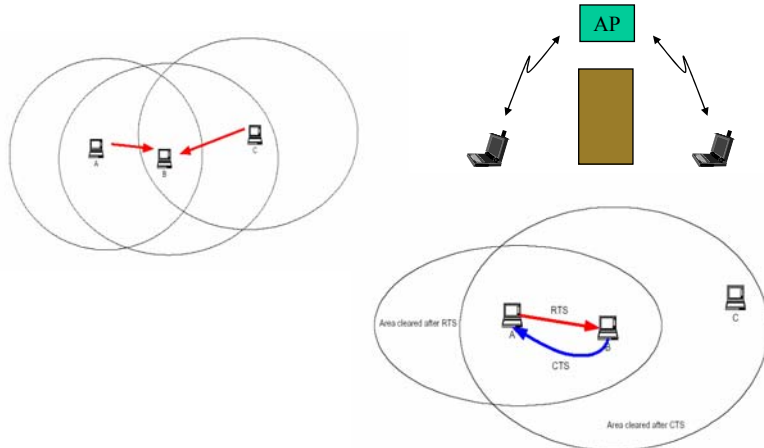


## 802.11 - DCF

- Resolución de colisiones
  - Se retransmite la trama
  - El backoff aleatorio consiste en la elección de un número de slots a retardar la transmisión dentro de una ventana
  - Se empieza con una ventana pequeña y a medida que hay colisiones se aumenta la ventana
    - Backoff exponencial entre (0, CW-1):
      - $CW_i = 2 * CW_{i-1}$                        $CW_{min}=32, CW_{max}=1024$
    - En cada retransmisión hay menos probabilidad que los contendientes elijan el mismo backoff
    - Las estaciones que llevan más tiempo intentando retransmitir tienen menos probabilidad de hacerlo

## 802.11 - Extensión de DCF

- Situaciones con terminal oculto

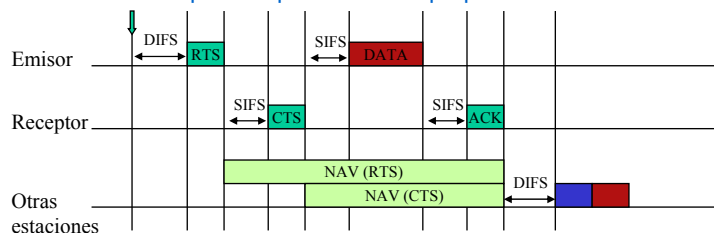


## 802.11 - Extensión de DCF

- El mecanismo de detección de portadora es eficiente siempre que todas las estaciones puedan escuchar a las demás
- Situaciones con terminal oculto: no se detectan las transmisiones y las colisiones se incrementan
- Se implementa un mecanismo de RTS y CTS: Virtual Carrier Sense
  - Opcional
  - Representa una reserva del canal: mientras una estación tiene el canal reservado, las demás, aunque vean el canal libre, no pueden transmitir

## 802.11 - Proceso RTS / CTS

- Cuando una estación quiere transmitir envía un Request To Send con un tiempo de reserva del canal
- Cuando el AP recibe el RTS envía un Clear To Send con el mismo periodo de reserva, éste es escuchado por todas las estaciones
- El resto de estaciones interpretan que el canal estará ocupado durante el tiempo solicitado, aunque no detecten actividad en el canal
- NAV (Net Allocation Vector): Temporizador de canal reservado
- Las colisiones sólo pueden producirse en paquetes RTS



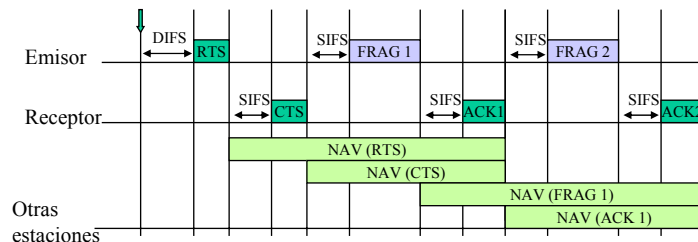
## Probabilidad de error

- BER: Bit Error Ratio
- PER =  $1 - \text{Prob}(\text{paquete correcto})$   
 =  $1 - \text{Prob}(\text{bit correcto})^n$   
 =  $1 - (1 - \text{BER})^n$ 
  - $n$  = número de bits del paquete
- Ejemplo:

PER	n = 200	n = 2000
BER = $10^{-4}$	0.0198	0.1813
BER = $10^{-5}$	0.0020	0.0198

## 802.11 - Fragmentación

- Las WLAN tienen una BER mayor que las LAN cableadas
- Los paquetes largos tendrán alta probabilidad de ser retransmitidos
  - Una posible solución es la fragmentación de paquetes utilizada conjuntamente con el modo RTS / CTS
  - Se vuelve a reservar el canal al enviar datos



## 802.11 - Fragmentación

- Sólo se pueden fragmentar tramas unicast
- Se fragmenta aquellas tramas que superan una cierta longitud (parámetro configurable)
- Cada fragmento lleva un número de orden dentro del original
- Cada fragmento debe ser reconocido por separado
- Un flag en la cabecera indica si un fragmento es el último o no
- El receptor primero descifra todos los fragmentos y a continuación los ensambla descartando posibles duplicados
- La fragmentación de tramas resta eficiencia al sistema
- Si un fragmento no es reconocido, el transmisor volverá a acceder al canal con el mecanismo habitual y empezará la transmisión con el último fragmento no reconocido.

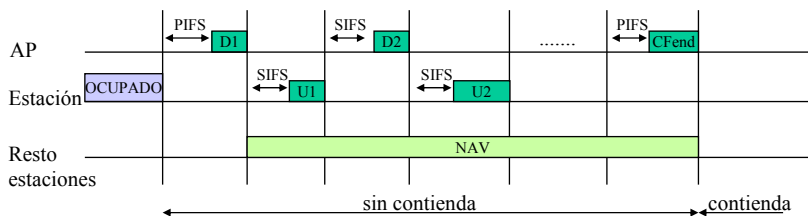
## PCF: Point Coordination Function

- El mecanismo DFC no puede garantizar un retardo máximo de transmisión ni un ancho de banda mínimo
  - En muchas aplicaciones es crucial poder fijar estos parámetros
- Consiste en un AP que coordina las estaciones
  - Pueden establecerse prioridades
  - Las redes ad-hoc no pueden utilizar este mecanismo
- Tiene la desventaja que las estaciones son sondeadas, si una estación no tiene nada a transmitir se pierde ancho de banda

## 802.11 - PCF

- El coordinador divide el tiempo de acceso en supertramas con periodos de contienda y sin contienda
  - En los periodos de contienda se utiliza DCF
  - En los periodos sin contienda se utiliza el PCF
- En los periodos libres de contienda
  - Todas las estaciones ponen el NAV al máximo valor
  - Solo responden si son sondeables y en el momento que se les envía un paquete de permiso de transmisión
  - Las estaciones deben ser configuradas como sondeables (opcional)
- El coordinador utiliza el PIFS (PFC inter-frame space) para ganar el acceso
  - $SIFS < PIFS < DIFS$

## 802.11 - PCF



- Para iniciar un periodo sin contienda el coordinador debe esperar un tiempo de silencio igual al PIFS
  - Tiene prioridad ya que  $PIFS < DIFS$
- Para finalizar el periodo de contienda se envía un CFend

## 802.11 - PCF

- El coordinador puede enviar varios tipos de tramas:
  - Trama de datos: envío de datos a una dirección unicast, multicast o broadcast
    - El receptor debe enviar un ACK
    - Si no se recibe el ACK, el coordinador retransmite después de PIFS

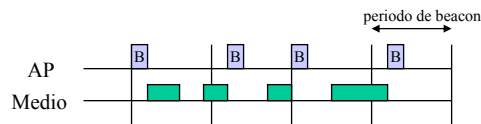
## 802.11 - PCF

- Trama de sondeo: se envía a una estación concreta dándole permiso para transmitir 1 trama a la estación que desee
  - Si no tiene nada a transmitir debe enviar un paquete de Null
  - La estación receptora debe confirmar la recepción correcta (ACK)
  - Si la estación emisora no recibe el ACK no tiene permiso para retransmitir hasta que sea sondeada de nuevo
  - Si la estación no es sondeable confirma el paquete utilizando DCF
- Trama de datos + sondeo
- Trama de final de periodo: finaliza el periodo libre de contienda



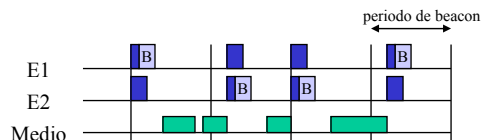
## IEEE 802.11 - Sincronización

- Cada estación mantiene su propio reloj pero debe actualizarse de forma periódica: La sincronización se realiza con los Beacon
- La red debe proveer un Beacon de forma periódica
  - Los periodos pueden ser ligeramente irregulares → el Beacon debe competir con el resto de paquetes
  - No es necesario que una estación los reciba todos; sólo de vez en cuando
  - Si la red tiene infraestructura lo emite el AP



## IEEE 802.11 - Sincronización

- Si la red es ad-hoc todas las estaciones lo intentan transmitir
  - Cuando uno consigue transmitir
  - Los demás anulan el envío
  - Utilizan backoff



## IEEE 802.11 – Ahorro de energía

- Los receptores de las tarjetas de red mientras están en estado de recepción están consumiendo energía
  - Las WLAN están especialmente pensadas para equipos portátiles que necesitan ahorrar energía
- Proceso de ahorro de energía
  - Desconectar la recepción cuando no sea necesaria
    - No se conoce cuando una estación va a recibir información
    - Se conecta periódicamente para consultar si tiene datos a recibir
  - Estados posibles:
    - awake: estado normal, se puede recibir siempre
    - sleep: ahorro de energía, no recibe

## IEEE 802.11 - Ahorro de energía

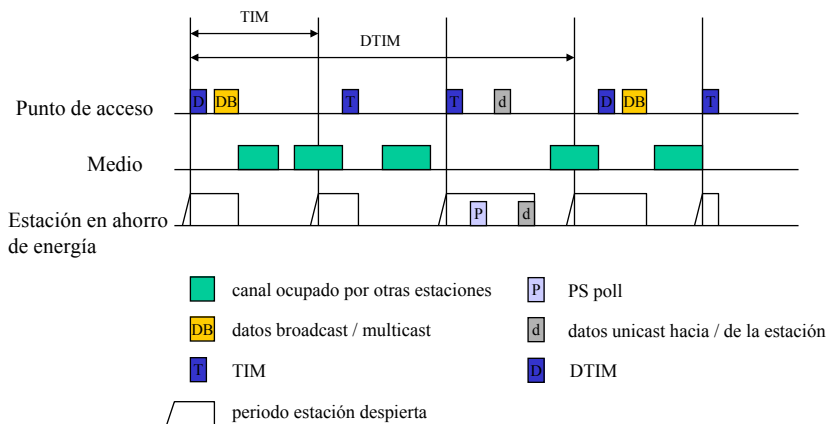
- Se requiere colaboración de los emisores para guardar los datos dirigidos a las estaciones en estado de sleep
- Para recibir datos, todas las estaciones se despiertan al mismo momento, durante un tiempo determinado
  - Deben estar sincronizadas
- Las estaciones que tienen datos a transmitir envían una lista de las estaciones para las cuales tienen datos en cola
  - Estas estaciones quedarán despiertas hasta recibir estos datos
  - Las demás vuelven a estado de sleep

## IEEE 802.11 - Ahorro de energía

- En redes con infraestructura, el AP centraliza todas las tramas de estaciones en estado de ahorro de energía
  - En el Beacon se envía la lista de receptores (Traffic Indication Map - TIM)
  - Para tramas broadcast y multicast se utiliza la indicación Delivery TIM (DTIM), en este caso todas las estaciones permanecen despiertas
- Si la estación receptora está lista para recibir datos, permanece despierta y envía un Power Saving Poll (PS Poll)

## IEEE 802.11 - Ahorro de energía

- Redes con infraestructura

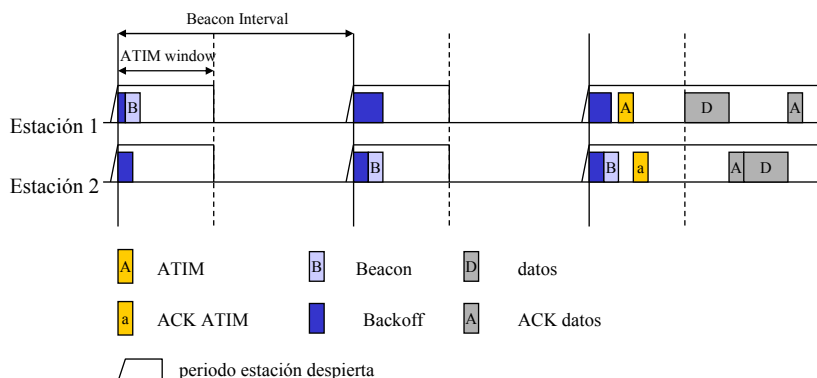


## IEEE 802.11 - Ahorro de energía

- Redes ad hoc
  - Más complejo ya que no existe AP para centralizar colas
    - Cada estación guarda los datos a las estaciones dormidas
  - Cada estación anuncia a qué estaciones debe enviar datos
    - Lo hacen en los periodos en que están despiertas
    - Tramas Ad hoc traffic indication map (ATIM)
  - Existe un periodo concreto para enviar ATIM (ATIM window)
    - Si se está dispuesto a recibir datos se envía un ACK ATIM
  - El envío del Beacon se realiza de forma distribuida
    - Las estaciones están sincronizadas y despiertan al mismo tiempo
    - Permanecen despiertas durante la ventana ATIM
  - Después de enviar o recibir datos las estaciones no pasan a estado de reposo hasta después de la siguiente ventana ATIM

## IEEE 802.11 - Ahorro de energía

- Redes ad hoc



## Formato de trama MAC

### – Formato completo de la trama (trama de datos)

- Las tramas de control y gestión tienen un formato reducido

2	2	6	6	6	2	6	variable	4	bytes
frame control	ID duración	dirección 1	dirección 2	dirección 3	secuencia control	dirección 4	Datos	CRC	

### – Frame control: Contiene varias partes

- Versión del protocolo (2 bits), actualmente es la 0
- Tipo de trama (2 bits): Gestión, control, datos, reservado
- Campo de subtipo (4 bits): indica la función de la trama
  - Gestión: asociación, "probe", "beacon" y autenticación
  - Control: ahorro de energía, RTS, CTS, ACK, CF (contention free) end
  - Datos: Datos, CF ACK, CF Poll, combinación de datos y control CF

## Formato de trama MAC

### • Banderas de 1 bit:

- To DS (Distribution system): indica si la trama se dirige al DS actual
- From DS: indica si una trama viene del DS actual
- Más fragmentos: siguen más fragmentos del paquete original
- Reintento: la trama es una retransmisión de otra no confirmada
  - » Parámetro configurable: tiempo de reintento 1 - 30 s
  - » Parámetro configurable: nº de reintentos 0 - 64
- Control de potencia: indica si la estación entrará en modo de ahorro de energía
- Más datos: indica si la estación debe enviar más datos a continuación
  - » Normalmente se indica para que el receptor no entre en modo de ahorro de energía
- WEP: indica si los datos van encriptados con el algoritmo WEP
- Orden: indica si los datos transmitidos deben procesarse según orden de llegada

## Formato de trama MAC

- ID duración: periodo de reserva del canal cuando se utiliza el mecanismo de RTS / CTS
- Direcciones 1 - 4: Estos campos pueden contener
  - Basic Service Set Identifier (BSSID)
  - Destination address (DA): Destino final de la trama
  - Source address (SA): Estación que inició la transmisión de la trama
  - Receiver address (RA): Dirección del AP que debe recibir la trama a continuación
  - Transmitter address (TA): Dirección del AP que está transmitiendo la trama

to AP	from AP	AD1	AD2	AD3	AD4	
0	0	DA	SA	BSSID	-	red ad-hoc
0	1	DA	BSSID	SA	-	red con infraestructura
1	0	BSSID	SA	DA	-	red con infraestructura
1	1	RA	TA	DA	SA	red con infraestructura

## Formato de trama MAC

Figure 4-4. Address field usage in frames to the distribution system

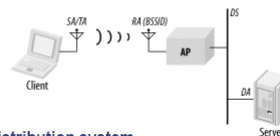


Figure 4-5. Address field usage in frames from the distribution system

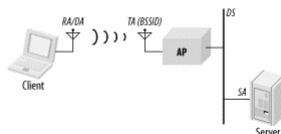
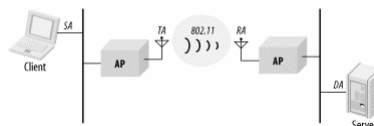
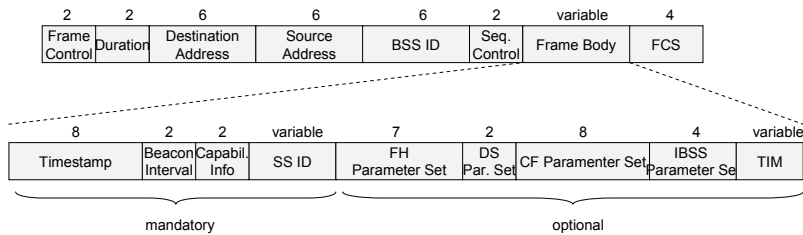


Figure 4-6. Wireless distribution system



## Beacon



- Timestamp: valor del reloj de la estación que envía la trama
- Beacon Interval: intervalo entre beacons
- Capability information: si la estación es o no sondeable
- Service Set Identify (SSID): identificador del Extended Service Set o del IBSS (nombre de la red)

## Beacon

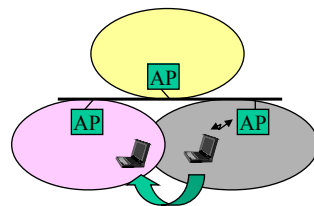
- FH parameter set: indica el tiempo de “dwell” y la secuencia de “hopping” de una capa física FHSS
- DS Parameter Set: indica el número de canal que las estaciones utilizan en la capa física DSSS
- CF Parameter Set: parámetros soportados por PCF
- IBSS Parameter Set: parámetros para el Independent Basic Service Set
- Traffic Indication Map: indica que la estación tiene datos en la cola del AP

## 802.11 - Asociación a una red

- Cada BSS transmite de forma periódica paquetes Beacon con información de la red
- Passive scanning: una estación se pone a la escucha de Beacons hasta que detecta uno con el SSID deseado
- Active scanning: una estación envía un paquete "Probe" con el SSID de la red a la cual desea incorporarse
- Si no obtiene respuesta puede quedarse a la escucha o formar una nueva BSS con su propio SSID
- Cuando se tiene un SSID se realiza una asociación
  - Cada estación solo se puede asociar a un AP

## 802.11 - Roaming

- Situación:
  - Redes con varias células
  - Los terminales podrán desplazarse
- Procedimiento
  - Cuando la potencia recibida por una estación baja de una cota, se empieza la búsqueda de otro AP
  - Cuando se encuentra otro AP que proporciona mayor potencia se envía una solicitud de reasociación:
    - El AP solicitado contesta con una respuesta de asociación e informa al AP antiguo → el AP antiguo descarta o reenvía tramas del cliente re-asociado





## 802.11 - Roaming

- IAPP: Inter-Access Point Protocol
  - Protocolo de roaming utilizado por diversas compañías:
    - Announce Protocol: Informa a los puntos de acceso sobre:
      - los nuevos APs que se han activado
      - la configuración de la WLAN a la que están conectados
    - Handover Protocol: Los AP
      - se informan sobre las reasociaciones de los terminales
      - se intercambian los paquetes pendientes dirigidos a terminales reasociados
  - Los puntos de acceso se intercambian información mediante UDP/IP

## Estudio de la capacidad del sistema

## Parámetros

- PIFS = SIFS + SLOT
- DIFS = PIFS + SLOT
- Tiempos en microsegundos

Estándar	SIFS	PIFS	DIFS	SLOT
802.11	10	30	50	20
802.11b	10	30	50	20
802.11a	16	25	34	9
802.11g	10	19 / 30	28 / 50	9 / 20

## Cálculo rápido de la capacidad real del sistema IEEE 802.11b

$$T_{tr} = DIFS + PHY\ H/V1 + MAC\ H/V2 + D/V2 + SIFS + PHY\ H/V1 + MAC\ ACK/V2$$

$$Vel\ datos = \text{datos} / T_{tr}$$

IEEE 802.11b a 1 Mbps – Cabecera larga  
 24 (PHY H); 34 (MAC H); 14 (MAC ACK)

- 8 bytes de datos

$$T_{tr} = 50 + 192/1 + 272/1 + 64/1 + 10 + 192/1 + 112/1 = 892\ \mu s$$

$$V_{datos} = 64\ \text{bits} / 892\ \mu s = 71\ \text{Kbps}$$

- 800 bytes de datos

$$T_{tr} = 50 + 192/1 + 272/1 + 6400/1 + 10 + 192/1 + 112/1 = 7228\ \mu s$$

$$V_{datos} = 6400\ \text{bits} / 7228\ \mu s = 885\ \text{Kbps}$$

## Cálculo rápido de la capacidad real del sistema IEEE 802.11b

IEEE 802.11b a 11 Mbps – Cabecera corta  
 15 (PHY H); 34 (MAC H); 14 (MAC ACK)

➤ 8 bytes de datos

$$T_{tr} = 50 + 72/1 + 48/2 + 272/11 + 64/11 + 10 + 72/1 + 48/2 + 112/11 = 292.7 \mu s$$

$$V_{datos} = 64 \text{ bits} / 292.7 \mu s = 218 \text{ Kbps}$$

➤ 800 bytes de datos

$$T_{tr} = 50 + 72/1 + 48/2 + 272/11 + 6400/11 + 10 + 72/1 + 48/2 + 112/11 = 868.7 \mu s$$

$$V_{datos} = 6400 \text{ bits} / 868.7 \mu s = 7.367 \text{ Mbps}$$

## Parámetros utilizados en los siguientes resultados

FHSS SYSTEM PARAMETERS AND ADDITIONAL PARAMETERS USED TO OBTAIN NUMERICAL RESULTS

packet payload	8184 bits
MAC header	272 bits
PHY header	128 bits
ACK	112 bits + PHY header
RTS	160 bits + PHY header
CTS	112 bits + PHY header
Channel Bit Rate	1 Mbit/s
Propagation Delay	1 $\mu s$
Slot Time	50 $\mu s$
SIFS	28 $\mu s$
DIFS	128 $\mu s$
ACK.Timeout	300 $\mu s$
CTS.Timeout	300 $\mu s$

G. Bianchi. Performance of the IEEE 802.11 Distributed Coordination Function. IEEE Journal on selected areas in communications. Vol. 18, n° 3. March 2000. Pag. 535 - 547

## Estudio de la capacidad del 802.11

- Modo básico:
  - Muy sensible al número de estaciones en la red
  - La capacidad aumenta con los límites de la ventana de backoff
- Modo RTS/CTS
  - Mucho mejor para redes grandes
  - Peor para redes pequeñas
  - Prácticamente independiente del número de estaciones en la red
  - Poco dependiente de la ventana de backoff

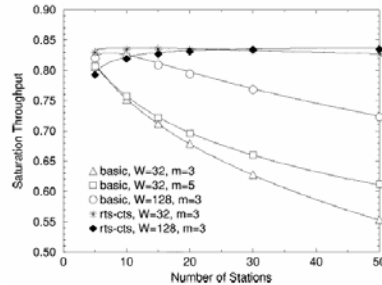


Fig. 6. Saturation Throughput: analysis versus simulation.

## Estudio de la capacidad del 802.11

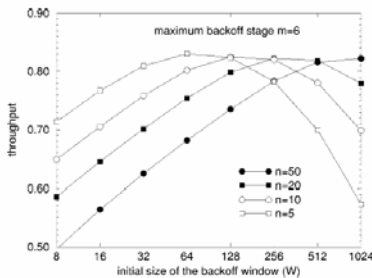


Fig. 9. Saturation Throughput versus initial contention window size for the basic access mechanism.

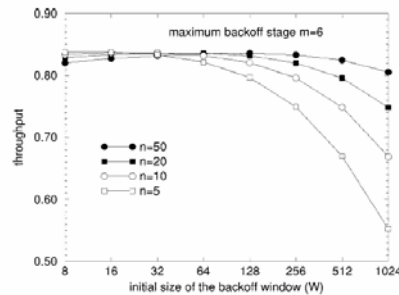


Fig. 10. Saturation Throughput versus initial contention window size for the RTS/CTS mechanism.

- En modo básico la capacidad depende en gran medida de la ventana inicial
- En modo RTS/CTS no depende para valores bajos pero si para altos
  - Los valores de W altos hacen esperar demasiado a las estaciones
- La capacidad máxima es independiente

## Estudio de la capacidad del 802.11

- El número de retransmisiones por paquete transmitido se:
  - Incrementa con el número de nodos
  - Decrementa con el tamaño inicial de la ventana

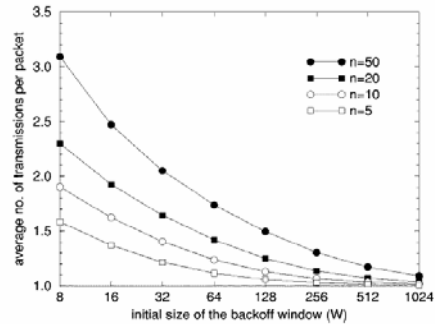


Fig. 14. Average number of transmissions per packet.

## Estudio de la capacidad del 802.11

- La capacidad crece con el tamaño del paquete
- RTS/CTS es mejor que el básico para paquetes grandes y peor para pequeños
- RTS/CTS no depende del número de estaciones en la red

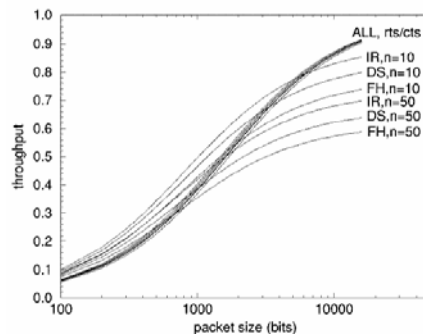


Fig. 15. Throughput versus packet size for the standardized configuration parameters.

## Estudio de la capacidad del 802.11

- El umbral de longitud de paquete para pasar a RTS/CTS depende de la capa física debido al tamaño de CWmin
- A mayor número de nodos antes debe cambiarse

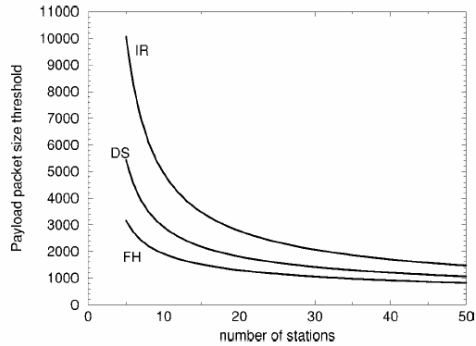


Fig. 16. Packet payload threshold over which the RTS/CTS mechanism is advantageous.

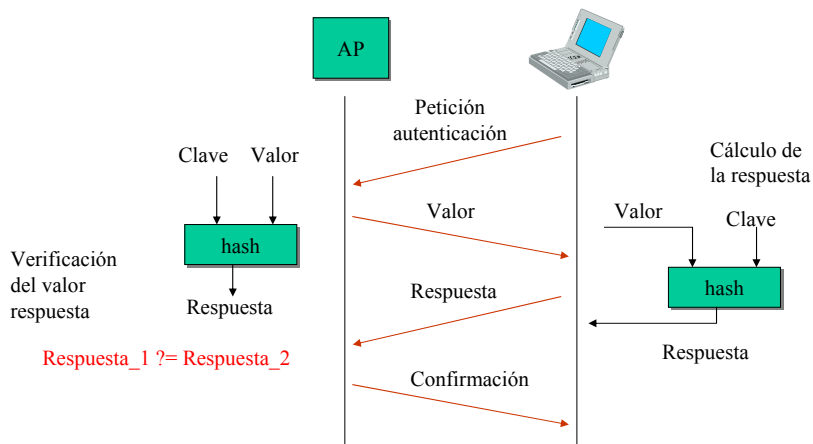
## Seguridad en IEEE 802.11i

## Autenticación de usuarios

- El estándar IEEE 802.11 describe dos tipos de autenticación:
  - Open system authentication: servicio por defecto
    - Permite el acceso a cualquier nodo que se identifique y proporcione el SSID correcto
  - Shared key authentication: servicio más riguroso
    - Todas las estaciones del BSS tienen la misma clave
      - Clave compartida
    - Se asume que la clave compartida se ha repartido entre las estaciones utilizando un canal seguro, independiente del IEEE 802.11
- Filtrado por dirección MAC, particular del fabricante

## Autenticación de usuarios

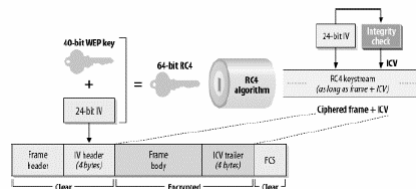
- Shared key authentication



## Privacidad de datos

- Servicio de encriptación de datos
  - Wired Equivalent Privacy (WEP)
    - Muy vulnerable
    - Una clave estática para toda la red
    - Para evitar que el mismo texto en claro genere el mismo texto cifrado, se especifica un vector de inicialización de 24 bits en claro (es aconsejable cambiar su valor en cada trama)
    - Cifrado con RC4: clave simétrica
      - Claves de 40+24 bits (roto en 10 minutos)
      - Claves de 104+24 bits (roto en 2 días)

Figure 5-3. WEP operations



Redes inalámbricas

## IEEE 802.11i

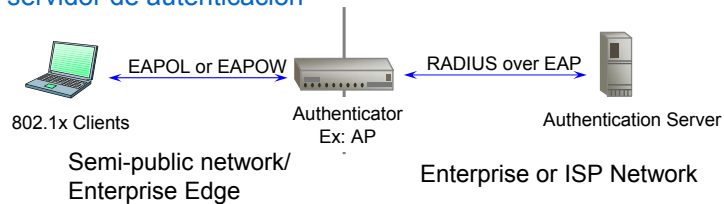
- Protocolo de autenticación:
  - 802.1x + EAP
- Protocolo de recálculo de claves
  - TKIP; AES
- Protocolo de cifrado
  - RC4; AES
- Integridad de datos
  - CRC; Message Integrity Code (Michael); CCMP

Redes inalámbricas

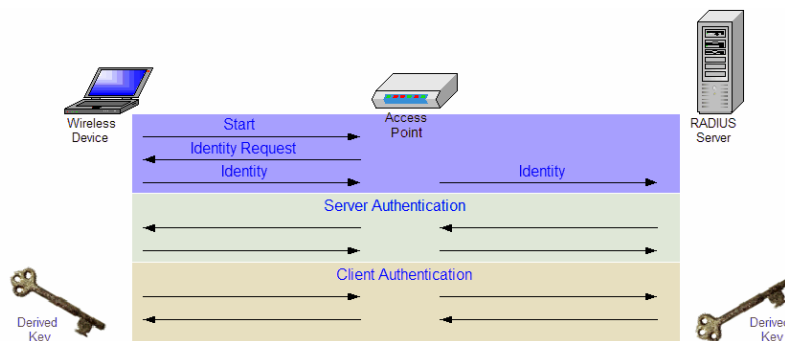


## IEEE 802.1x

- Define métodos para regular el control de estaciones clientes a una red utilizando diferentes EAP (Extensible Authentication Protocol)
- Describe la interacción entre tres entidades:
  - La que se debe autenticar
  - La que aprueba o deniega el acceso
  - El servidor de autenticación



## Intercambio de mensajes de autenticación de IEEE 802.1x



## EAP

- Protocolos de autenticación:
  - Message Digest 5 (MD5): Crea firmas digitales. Genera la respuesta (digest) a un mensaje test enviado por el servidor, protocolo CHAP (Challenge Handshake Authentication Protocol)
  - Transport Layer Security (TLS): Autentica servidor y cliente a través de certificados
  - Tunneled TLS (TTLS): Autentica el servidor con certificado, el cliente con otro EAP, o CHAP, utilizando un túnel seguro TLS
  - Lightweight EAP (LEAP): Versión de Cisco, autentica con funciones de hash muy robustas.
  - Protected EAP (PEAP): Autentica el servidor con certificado, y al cliente con otro EAP, o CHAP, utilizando un túnel seguro TLS. Protocolo propietario creado por Microsoft, Cisco y RSA Security.

## TKIP

- Temporal Key Integrity Protocol
  - Compatible con WEP
    - cifra la clave WEP y el vector de inicialización
  - PPK (Per Packet Keying)
  - MIC (Message Integrity Check)
  - Vector de inicialización de 48 bits
  - RC4 con clave de 128 bits
    - Aún se puede romper
    - En un futuro cambiar el algoritmo criptográfico a AES

## Integridad de los datos: Message Integrity Code (MIC)

- WEP utiliza un CRC de 32 bits
  - Puede suplantarse fácilmente



- TKIP utiliza Message Integrity Code (MIC)
  - Algoritmo de Michael
  - HMAC = función de hash de clave simétrica
  - Clave de 64 bits y salida de 64 bits

## WPA

- Wi-Fi Protected Access (WPA)
  - Subconjunto de utilidades desarrolladas dentro del IEEE 802.11i que actualmente están disponibles: 802.1x + TKIP
  - A la larga deberá substituirse por el estándar definitivo
- WPA2:
  - Algoritmo criptográfico: Advanced Encryption Standard (AES)
  - MIC: CCMP (Counter-Mode-CBC-MAC Protocol)
  - No compatible con WEP
  - Requiere más potencia computacional

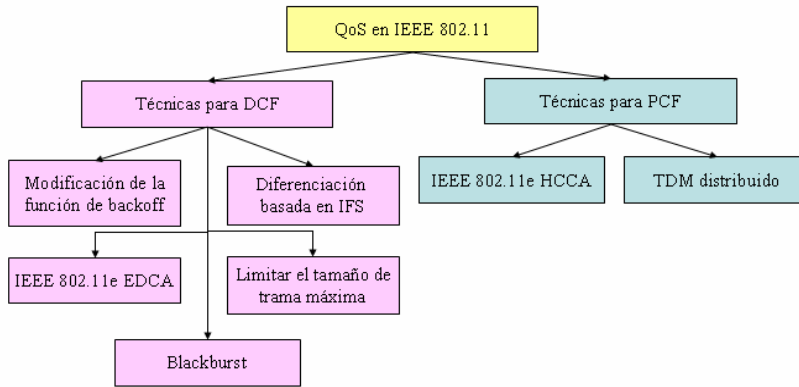
# IEEE 802.11i resumen

## Encryption Method Comparison

	WEP	WPA	WPA 2
Cipher	RC4	RC4	AES
Key Size	40 bits	128 bits encryption 64 bits authentication	128 bits
Key Life	24-bit IV	48-bit IV	48-bit IV
Packet Key	Concatenated	Mixing Function	Not Needed
Data Integrity	CRC-32	Michael	CCM
Header Integrity	None	Michael	CCM
Replay Attack	None	IV Sequence	IV Sequence
Key Management	None	EAP-based	EAP-based

# Propuestas de calidad en el IEEE 802.11e

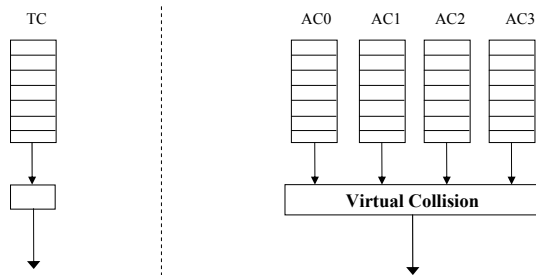
## Propuestas de Calidad de Servicio



## Técnicas de QoS: IEEE 802.11e

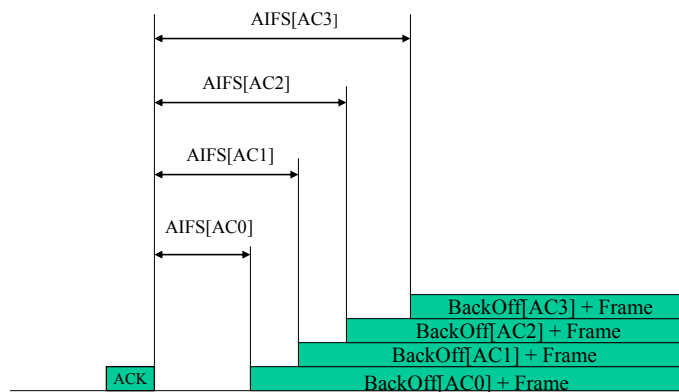
- HCP (Hybrid Coordination Function) engloba dos mecanismos de acceso
  - EDCA (Enhanced Distributed Channel Access)
  - HCCA (HCP Controlled Channel Access)
- EDCA
  - Introducción de 8 clases de tráfico diferentes (TC) repartidas en 4 categorías de acceso (AC)
  - Cada categoría de acceso tiene asignado unos valores de  $CW_{min}[AC]$ ,  $CW_{max}[AC]$  y  $AIFS[AC]$
- HCCA
  - Adopta un protocolo de "polling"

## IEEE 802.11e - EDCA



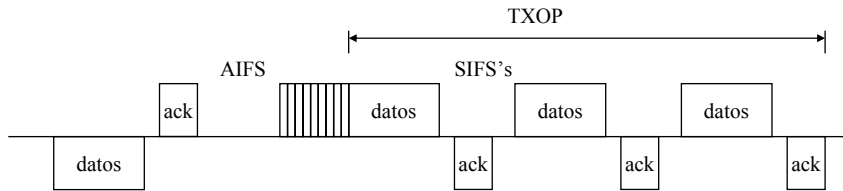
- Cada cola tiene su tamaño de ventana de backoff ( $CW_{min} - CW_{max}$ )
- Cada cola tiene su Arbitration Inter-Frame Space access time (AIFS)
- Necesidad de resolución de colisión virtual: Dos AC pueden transmitir en el mismo momento → Transmite el de mayor prioridad

## IEEE 802.11e - EDCA



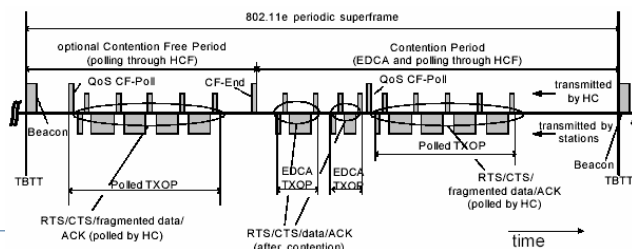
## IEEE 802.11e – EDCA

- Cuando una estación accede al canal puede transmitir varios paquetes consecutivos → Contention Free Burst (CFB)
  - Puede transmitir durante el intervalo denominado Transmission opportunities (TXOP): cada AC tiene su propio TXOPlimit



## IEEE 802.11e - HCCA

- La estación coordinadora (HC) accede al control del medio utilizando el AIFS más pequeño, que es igual a PIFS
- HC envía mensajes de CF-Poll
  - Permiten a las estaciones la transmisión de tramas
  - Incluyen la duración del TXOP
- HCCA opera durante el período de contienda (CP) y durante el período libre de contienda (CFP)



## IEEE 802.11e

- IEEE 802.11e/D5.0 especifica además
  - Dos políticas de ACK
    - NO ACK Policy: la transmisión de una trama no va acompañada de un ACK
    - Block ACK Policy: un mismo ACK reconoce varias tramas
  - The simpler scheduler (no aparece en el estándar)
    - A cada estación se le asigna una TXOP utilizando el mecanismo Round Robin

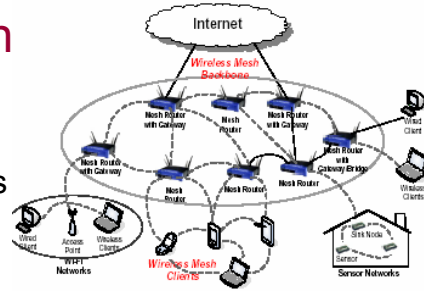


## Mesh Networks (802.11s)



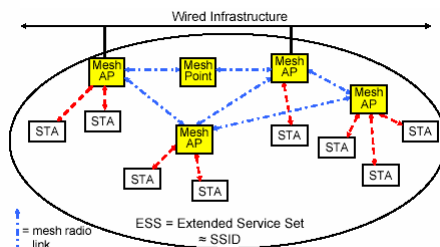
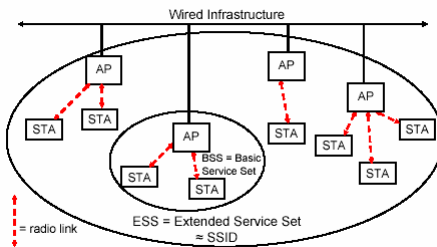
## 802.11s WLAN Mesh

- Pretende extender la arquitectura y protocolos para permitir funcionalidades mesh
- Objetivos:
  - Aumentar el rango de cobertura
  - Incrementar la capacidad
  - Aumentar la fiabilidad
  - Seamless security
  - Mejorar la eficiencia de batería
  - Compatibilidad con los equipos anteriores



## 802.11s WLAN Mesh

- Nueva terminología:
  - Mesh Point (MP): retransmite tramas como un repetidor
  - Mesh Access Point (MAP): retransmite tramas + punto de acceso
  - Mesh Portal (MPP): Puente con otras redes



## 802.11s WLAN Mesh - Novedades

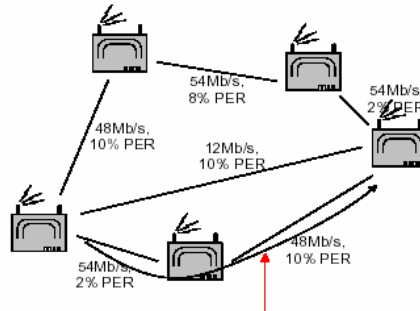
- Descubrimiento de vecinos:
  - Barrido activo: envío de *probes*
  - Barrido pasivo: escucha de *beacons*
  - Tabla de vecinos: dir. MAC, canal operativo, estado enlace
- Medidas del estado de los enlaces: Métricas radio
- Establecimiento de enlace con el vecino
  - Autenticación y asociación
- Nuevo mecanismo de sincronización global:
  - Mesh-wide common Timing Synchronization Function (TSF)
- Intra-Mesh Congestion Control
  - Definición de nuevos mensajes para notificar y realizar control de congestión

## 802.11s WLAN Mesh - Novedades

- Selección de caminos y retrasmisiones: Extensible path selection framework
  - Dos protocolos:
    - Hybrid Wireless Mesh Protocol (HWMP): obligatorio
      - On-demand route discovery para nodos de la red
      - Pro-active routing al portal mesh
    - Radio Aware - Optimized Link State Routing Protocol (RA-OLSR): opcional
      - Pro-activo
      - Basado en protocolos de encaminamiento de estado de enlace
  - Solamente uno activo en un momento dado

## 802.11s WLAN Mesh - Novedades

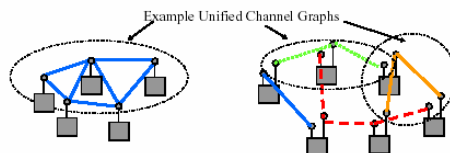
- Hybrid Wireless Mesh Protocol
  - Basado en una métrica función del tiempo que está un paquete en el aire hasta llegar al MPP (Airtime link metric function)



This path having the minimum airtime cost is the Best!

## 802.11s WLAN Mesh - Novedades

- Nuevo mecanismo de acceso (opcional)
  - Mesh Deterministic Access (MDA): mejora la eficiencia del mecanismo de acceso con un protocolo de reserva
    - Reduce las colisiones
    - Requiere sincronización entre estaciones
- Selección de canal: Soporte para interfaces simples y múltiples
  - Common Channel Framework (CCF): permite negociar otros canales de transmisión entre los nodos de la red



## IEEE 802.16 – WiMAX

- Aplicaciones del WiMAX
- Estándares WiMAX
- Capa física
- Subcapa parte común de la MAC
- Seguridad en IEEE 802.16
- Gestión de una red WiMAX (802.16f)
- Mobile WiMAX (802.16e)
- Multihop Relay (802.16j)
- Aspectos regulatorios
- Equipos y productos
- Comparativa del WiMAX con otros sistemas

## WiMAX



- Worldwide Interoperability for Microwave Access
  - [www.wimaxforum.org](http://www.wimaxforum.org)
  - Unos 420 miembros: fabricantes de equipos y chips, operadores de telecomunicaciones, proveedores de servicio y proveedores de aplicaciones
- Organización sin ánimo de lucro fundada en 2001
- Funciones
  - Facilitar el desarrollo de redes inalámbricas de banda ancha basadas en el estándar IEEE 802.16
  - Asegurar la compatibilidad de equipos de diferentes fabricantes
  - Certificación de equipos en base a un protocolo de pruebas de interoperabilidad

## 802.16 según WiMAX Forum

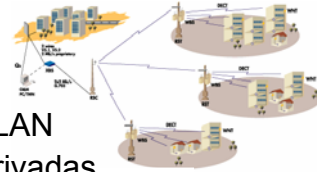
- Terminales fijos, portables (movilidad hasta 120 Km/h sin perder conexiones) y móviles (movilidad hasta 350 Km/h sin perder conexiones)
- No se requiere visibilidad directa
- En celdas de 3 – 10 Km se puede esperar una capacidad de 40 Mbps por canal para terminales fijos y portables
  - Permiten varios cientos de conexiones T1 en un área geográfica (usando varios canales)
- Sistemas móviles pueden esperar una capacidad de 15 Mbps para celdas de radio máximo de 3 Km.

## Aplicaciones

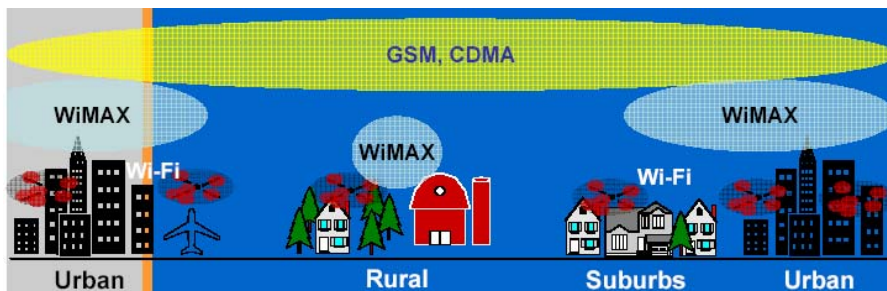
- Da cobertura a la “última milla”
  - Edificios equipados con estaciones de usuario y estaciones base
  - Usuarios se conectan al equipo de usuario WiMax mediante tecnologías de red convencionales (802.3, 802.11)
  - Las BSs se conectan directamente a la red dorsal
- Disminuye las barreras de entrada para incrementar la competencia para nuevas ISPs
- Provee cobertura a entornos rurales

## Aplicaciones

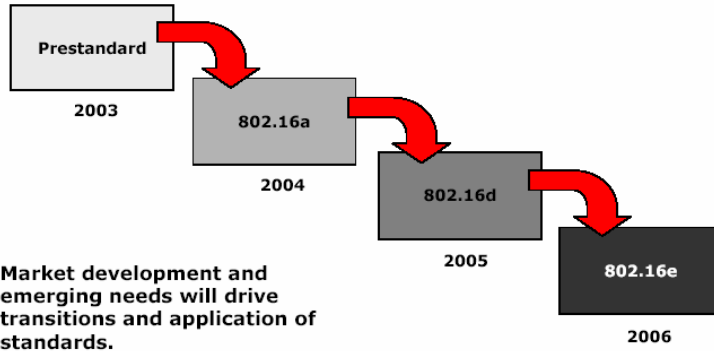
- Ciudades pequeñas o medianas:
  - Las grandes ya suelen estar cubiertas con tecnologías de cable
  - Una muy alta concentración de tráfico dificulta el despliegue de redes WMAN
- Zonas rurales o de baja concentración de usuarios.
  - Es el entorno ideal de despliegue
- Usuarios potenciales: hasta 6 – 8 Mbps
  - Residenciales
  - SOHO (*Small Offices Home Offices*)
  - Pequeñas y medianas empresas
- Redes de backhaul para hotspots WLAN
- Servicio de protección civil y redes privadas



## Aplicaciones



## Evolución de los estándares WiMAX



## Estándares IEEE 802.16

- wirelessman.org
- IEEE Std 802.16-2004
  - Núcleo del estándar
  - Capas física y MAC
  - Punto – multipunto y topologías malladas (mesh networks)
  - NLOS: 5 – 7 Km
  - LOS: 50 Km
  - “System profiles” más típicos: listas de opciones y capacidades utilizadas en un caso típico de implementación
- IEEE Std 802.16.2-2004
  - Cuestiones relacionadas con la coexistencia de sistemas
    - Diseño y despliegue coordinado
    - Proporciona guías de utilización frecuencial

## Estándares IEEE 802.16

- IEEE Std 802.16/Conformance 01, 02, 03 y 04
  - Se definen mecanismos y protocolos de pruebas para evaluar la adecuación de los equipos al estándar
- IEEE Standard 802.16e-2005
  - Physical and Medium Access Control Layers for Combined Fixed and Mobile Operation in Licensed Bands
- IEEE Standard 802.16f-2005
  - Management Information Base

## Evolución de los estándares WiMAX

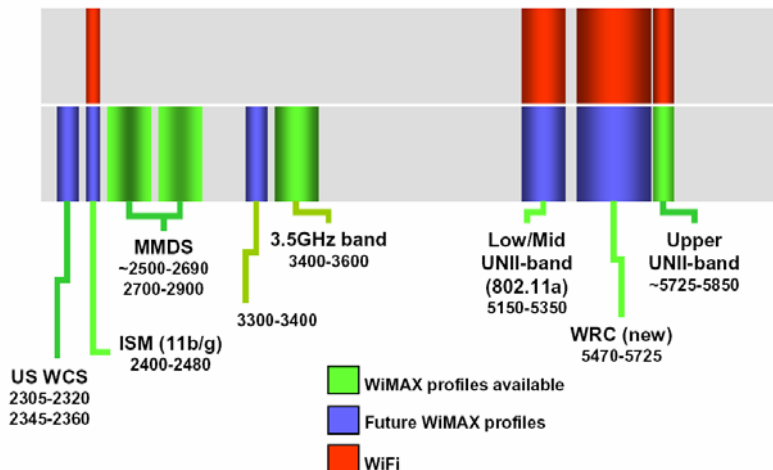
- Drafts en desarrollo
  - IEEE Draft P802.16g (gestión de red)
    - Air Interface for Fixed and Mobile Broadband Wireless Access Systems - Management Plane Procedures and Services
  - IEEE Draft P802.16h
    - Coexistencia de sistemas en banda sin licencia
  - IEEE Draft 802.16i
    - Management Plane Procedures and Services: Gestión de red para terminales móviles
  - IEEE Draft P802.16k
    - Sistema MAC para puentes (bridges)



## Evolución de los estándares WiMAX

- Proyectos en estado Pre-Draft:
  - Pre-Draft Project P802.16j
    - Multihop Relay Specification: para repetidores y estaciones base
  - Pre-Draft Project P802.16m
    - Advanced Air Interface: actualizar WirelessMAN OFDMA
- Proyectos finalizados
  - IEEE Draft P802.16d
    - Proyecto que derivó a una reforma del estándar dando lugar al 802.16-2004

## Bandas de frecuencias



## Bandas de frecuencias

- Sin licencia: Banda ISM 2.4 – 5 GHz
  - Menos burocracia: más rápidas de desplegar
  - Menos costes
  - Muchos operadores en estas bandas se interfieren entre ellos
  - SLAs difíciles de prever
  - Adecuado para zonas con baja densidad o redes con bajo presupuesto
- Con licencia:
  - Las regulaciones nacionales suelen permitir mayores potencias de transmisión
  - Mejor calidad de servicio
  - Adecuado para zonas con mucho tráfico y enlaces de largo alcance

## Certificación WiMAX

- Centro de certificación: Cetecom en Málaga (España), Seoul (Korea)
- Inicio certificación: Junio 2006
- Primeros perfiles de certificación (requiere licencia)

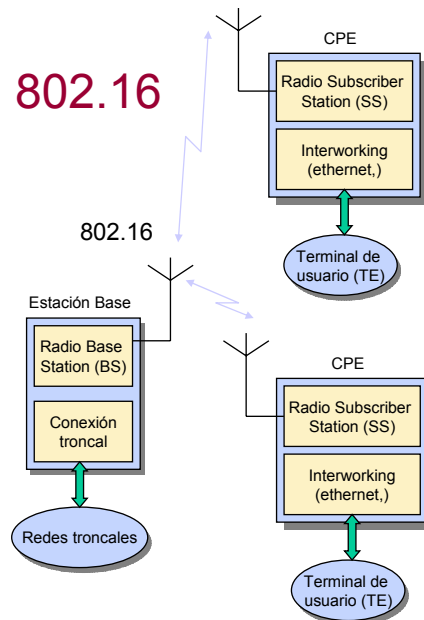
Banda frecuencial	Duplexado	BW por canal
3400 – 3600 MHz	TDD	3.5 MHz
		7 MHz
	FDD	3.5 MHz
		7 MHz
5725 – 5850 MHz	TDD	10 MHz

## WiBro

- Estándar desarrollado en Korea del Sur denominado TTA PG302 BWA (Broadband Wireless Access)
- Las primeras licencias comerciales se asignaron en enero de 2005 y los primeros sistemas piloto entraron en funcionamiento en abril de 2006
- Primero fue competidor del WiMAX, pero después se compatibilizaron ambos estándares
- Los productos WiBro son certificados como equipamiento WiMAX

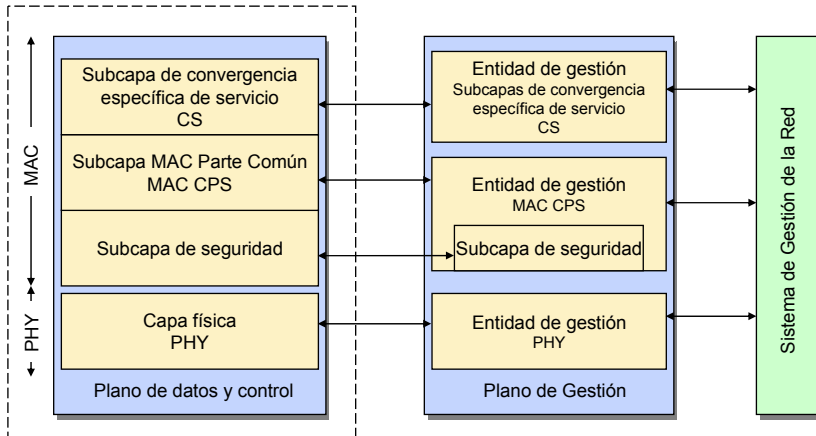
## Elementos del IEEE 802.16

- CPE: Customer Premises Equipment
  - Equipo de usuario
  - SS: Subscriber Station
  - Dispone de varias salidas donde conectar los equipos terminales de usuario (TE)
- BS: Base Station
  - Proporciona conectividad a los CPE
  - Mecanismos de control y gestión de los CPE



## Modelo de referencia IEEE 802.16

Estándar IEEE 802.16



Redes inalámbricas

151 / 416

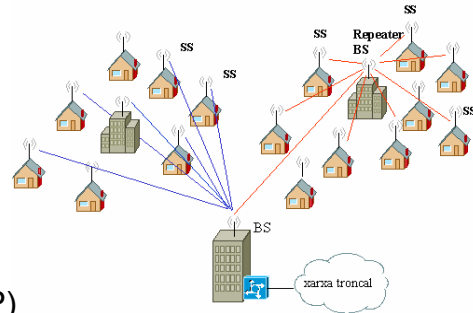
## IEEE 802.16 define

- Nivel Físico:
  - Bandas de funcionamiento (2 – 66 GHz)
  - Canalización
  - Codificación adaptativa
  - Modulación adaptativa
  - Ecuación adaptativa
  - Diversidad de antena
  - Control de potencia de transmisión
  - TDD - FDD
- Nivel MAC:
  - TDMA Dinámico
  - ARQ
  - Tamaño variable de paquete
  - QoS
  - Basado en DHCP & TFTP
  - Encriptación DES
  - Topología Punto-Multipunto y Mesh

Redes inalámbricas

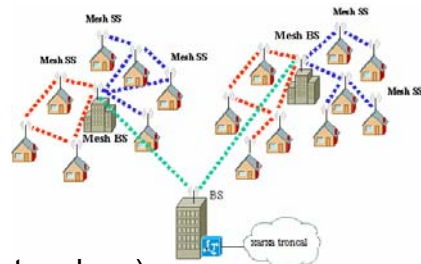
152 / 416

## Configuraciones



- Punto a Punto (PTP)
- Punto – Multipunto (PMP)
  - Downlink: BS
  - Uplink: SS con mecanismos de gestión de demanda
  - Todas las SS reciben la misma transmisión o partes de la misma
    - Se puede especificar que una SS no reciba parte de la trama
  - Unicast, multicast y broadcast
  - RS: Repeater Stations
    - Incrementan cobertura
    - Por problemas de propagación (NLOS)

## Configuraciones



- Configuración mallada (mesh topology)
  - Define conexiones: BS – SS y SS – SS
  - Mesh BS: Sistema con conexión a la red troncal o de backhaul
  - Los nodos Mesh deben estar coordinados
    - Informan de recursos disponibles, peticiones y asignaciones
  - Conceptos
    - Vecino: Nodos con conexiones directas
    - Vecindario de un nodo: todos sus vecinos (single hop)
    - Vecindario extendido: todos los vecinos + los vecinos de los vecinos

## Nivel físico

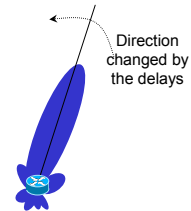
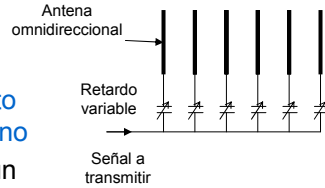
## Nivel físico: Definiciones

Nombre	Banda frec.	Opciones	Duplexado
WirelessMAN-SC	11 – 66 GHz (LOS)		FDD, TDD
WirelessMAN-SCa	< 11 GHz con licencia (NLOS)	AAS, ARQ, STC	FDD, TDD
WirelessMAN-OFDM	< 11 GHz con licencia (NLOS)	AAS, ARQ, STC, Mesh	FDD, TDD
WirelessMAN-OFDMA	< 11 GHz con licencia (NLOS)	AAS, ARQ, STC, Mesh	FDD, TDD

- LOS: 50 Km                                      NLOS: 5 – 7 Km
- WirelessHUMAN (High-speed Unlicensed MAN): aplicación de WirelessMAN a bandas sin licencia y sólo con TDD
- Mecanismos para prevenir el multicamino debido al NLOS

## Mecanismos para combatir el multicamino

- Antenas direccionales y AAS (Adaptive Antenna System):
  - Las antenas directivas reducen el efecto dispersivo de la propagación multicamino
  - Estas antenas inteligentes emiten un haz muy estrecho que se puede ir moviendo, electrónicamente, para enfocar siempre al receptor, con lo que se evitan las interferencias co-canal y se consume menos potencia al ser un haz más concentrado
  - Las AAS son opcionales: la BS puede incorporarlas y las SS no



Radiation Pattern

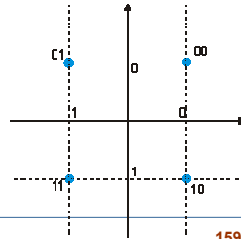
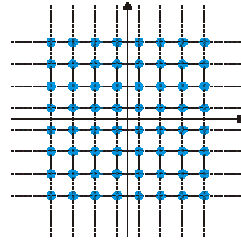
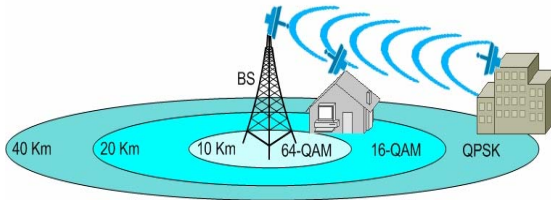
## Mecanismos para combatir el multicamino

- Corrección de errores por repetición
  - ARQ (Automatic Repeat reQuest)
- Técnicas de diversidad en transmisión y en recepción:
  - Las técnicas de diversidad intentan explotar positivamente los efectos de la propagación multicamino
  - Opcional
  - En transmisión: Space Time Coding (STC)
    - Especifica los formatos de pares de bloques que se transmitirán por dos antenas diferentes
  - En recepción: Maximal Ratio Combining (MRC)

## Mecanismos para combatir el multicamino

- Modulación adaptativa:
  - Ajusta el esquema de modulación a las condiciones de la transmisión ( $C/I+N$ )
  - Se utiliza siempre la más eficiente (menos protección) que permite la transmisión

Constelaciones 64 QAM y QPSK

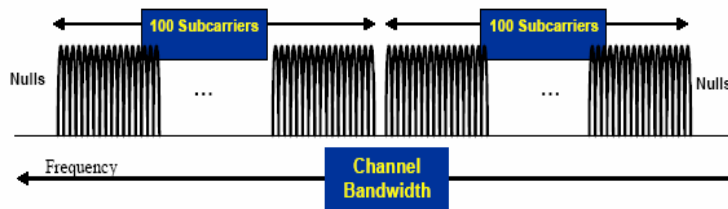


Redes inalámbricas

159 / 416

## Mecanismos para combatir el multicamino

- Transmisión en OFDM:
  - Orthogonal Frequency Division Multiplex con 256 subportadoras
  - Elevada robustez
  - Se utiliza en las modulaciones de cable xDSL, en el 802.11g/a, DVB



Redes inalámbricas

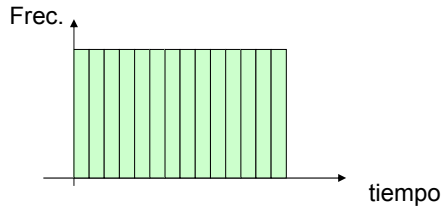
160 / 416



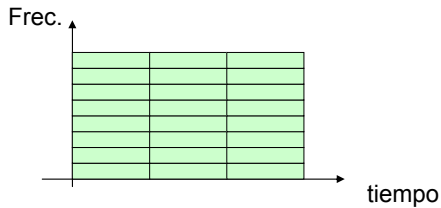
## Transmisión en OFDM

- Transmisión de símbolos:

- Single Carrier

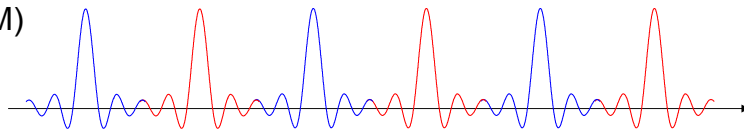


- OFDM



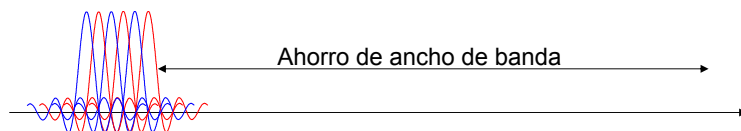
## Superposición espectral de OFDM

- Técnica convencional: Frequency Division Multiplex (FDM)



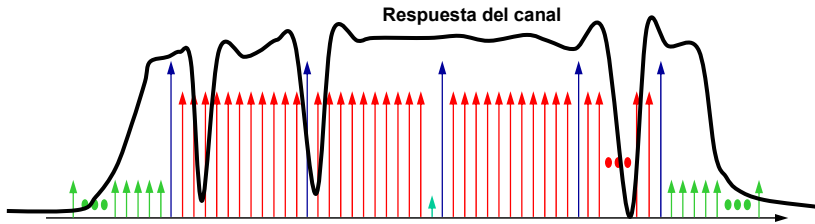
- Técnica Orthogonal Frequency Division Multiplex (OFDM) Multi-carrier

- La superposición no causa interferencias debido a la ortogonalidad de las subportadoras



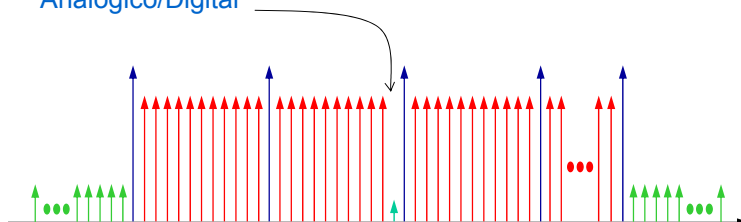
## Multipath y OFDM

- Solamente se pierden algunas subportadoras debido a la atenuación multicanal
- Puede resolverse con una codificación de canal apropiada



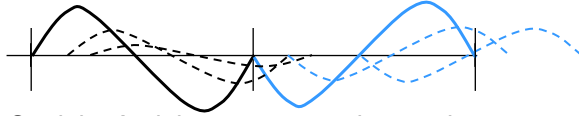
## OFDM

- Varios tipos de portadoras: 256 en total
  - Portadoras de datos (192)
  - Portadoras piloto: estimación de canal y sincronización (8)
  - Portadoras nulas: bandas de guarda con los otros canales (28+27)
  - Direct Current: Portadora nula para las conversiones Analógico/Digital

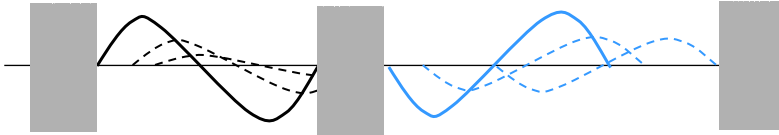


## Multipath y OFDM

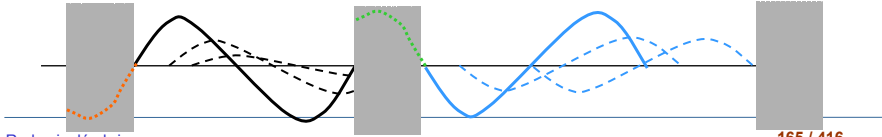
- El retardo interfiere en los símbolos posteriores



- Se debería dejar un margen de guarda



- Las señales deben ser continuas, se copia una parte del símbolo antes

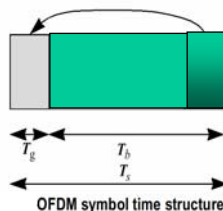


Redes inalámbricas

165 / 416

## Multipath y OFDM

- Tiempo de guarda:
  - La última parte del tiempo de símbolo de datos se repite antes del símbolo y se usa para tiempo de guarda
  - Valores típicos de G son: 1/4, 1/8, 1/16, 1/32



$$G = \frac{T_g}{T_b}$$

Redes inalámbricas

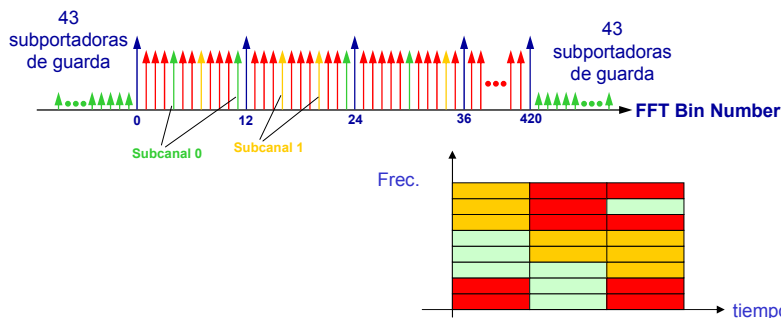
166 / 416

## OFDM

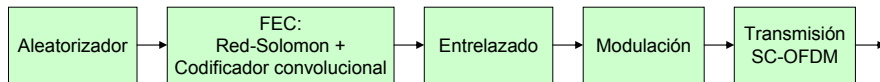
- Subcanalización del enlace de subida:
  - Permite a las SS utilizar únicamente un grupo de portadoras y no todas
    - $192 = 16 \text{ subcanales} \times 12 \text{ subportadoras}$
  - Se pueden utilizar: 1, 2, 4, 8 ó 16 subcanales para una transmisión
  - Ventajas:
    - Mayor alcance al poder transmitir la potencia máxima concentrada en menos portadoras
    - Reducción del consumo de los CPE
  - Se explota la subcanalización para gestionar el acceso múltiple basado en OFDM: OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access)

## OFDMA

- OFDM fue diseñado para una única transmisión:
  - Si se quiere un acceso múltiple debe hacerse en TDMA o FDMA
- OFDMA: es el OFDM con FDMA
  - Posibilidad de tener: 128, 512, 1024 y 2048 subportadoras



## Técnicas codificación de canal

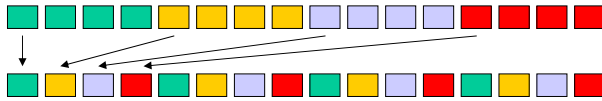


## Técnicas codificación de canal

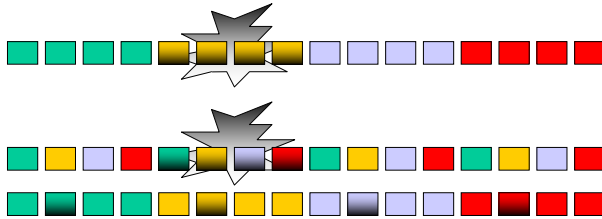
- Aleatorizador:
  - Evita que ciertas cadenas de bits aparezcan más que otras, y que ciertos puntos de la constelación tengan mayor frecuencia. Si estos puntos coincidiesen en necesitar mayor energía para su transmisión se tendría un gran desperdicio de potencia.
- Forward Error Correction (FEC): RS (outer code) + CC (inner code)
  - Código en bloque Reed-Solomon: RS(N,K)
    - N = símbolos del bloque codificado
    - K = símbolos de datos dentro del bloque
    - Numero de errores corregidos =  $(N - K)/2$ 
      - » ej: RS(255, 239), 8 errores
  - Código convolucional:
    - Velocidad de código = Bits entrada / bits salida

## Técnicas codificación de canal

### – Entrelazado:



- Error: interferencia



## Frecuencias altas (11 – 66 GHz)

- WirelessMAN Single Carrier:
  - Una única portadora
  - Canales con ancho de banda entre 20 y 28 MHz
  - FEC: Reed-Solomon: 239 bits de información en 255 bits transmitidos
    - Eficiencia =  $239/255 = 93.7\%$
  - LOS
  - Antenas directivas

BW (MHz)	Velocidad trans. bruta (Mbps)		
	QPSK	16-QAM	64-QAM
20	32	64	96
25	40	80	120
28	44.8	89.6	134.4

## Frecuencias bajas (< 11 GHz)

- WirelessMAN-SCa:
  - Single Carrier (a) - SCa
  - Bandas con licencia: Canales con BW = 3.5 y 7 MHz
  - Bandas sin licencia : Canales con BW = 10 y 20 MHz
  - FEC = Reed-Solomon + Código convolucional
    - FEC = 239 bits de información en 255 bits transmitidos
    - Código convolucional: Permite una mayor variabilidad de la robustez de la corrección de errores
      - Eficiencias: 1/2; 2/3; 3/4; 5/6; 7/8
    - No es tan eficiente como el anterior pero es más seguro, tiene más redundancia

## Frecuencias bajas

- WirelessMAN-SCa
  - Modulaciones con distintos parámetros:
    - BW (MHz)
    - Bits por símbolo: Bs (2 para QPSK)
    - Factor de roll-off ( $\alpha$ )
      - Porcentaje de energía fuera de banda
    - Rrs: eficiencia Reed-Solomon (0.937)
    - Rfec: eficiencia código convolucional
    - Velocidad de transmisión bruta:

$$V_{tx} = \frac{(BW - 0.088) * B_s * R_{rs} * R_{fec}}{(1 + \alpha)}$$

WirelessMAN-SCa  
 Canales de 7 MHz (ETSI)  
 Roll-off = 0.25  
 Velocidad de transmisión bruta

Modulación	Mbps
BPSK 1/2	2.59
BPSK 3/4	3.89
QPSK 1/2	5.18
QPSK 2/3	6.91
QPSK 3/4	7.77
QPSK 5/6	8.64
QPSK 7/8	9.07
16-QAM 1/2	10.37
16-QAM 3/4	15.55
64-QAM 2/3	20.73
64-QAM 5/6	25.91
256-QAM 3/4	31.10
256-QAM 7/8	36.28

## Frecuencias bajas (< 11 GHz)

- WirelessMAN-OFDM:
  - Reed-Solomon concatenado con convolucional
  - Cálculo de velocidad de transmisión bruta
    - $N$  = número de portadoras utilizadas
    - $B_s$  = bits por símbolo
    - $c$  = eficiencia del código corrector
    - $T_s$  = duración símbolo OFDM =  $T_g + T_b$
    - $T_g$  = tiempo de guarda ( $T_b/4$ ;  $T_b/8$ ;  $T_b/16$  o  $T_b/32$ )
    - $f_s$  = frecuencia de muestreo
    - $N_{FFT}$  = menor potencia de 2 mayor que  $N$ , tamaño de la FFT
    - $BW$  = ancho de banda del canal
    - $\beta$  = relación entre el ancho de banda y la frecuencia de muestreo ( $7/6$ ;  $8/7$ )

$$V_{tx} = \frac{N * B_s * c}{T_s}$$

$$T_b = \frac{f_s}{N_{FFT}} = \frac{BW * \beta}{N_{FFT}}$$

## Frecuencias bajas (< 11 GHz)

- WirelessMAN-OFDM
  - Velocidades de transmisión brutas

Bandwidth (MHz)	$T_g$	BPSK 1/2	QPSK 1/2	QPSK 3/4	16-QAM 1/2	16-QAM 3/4	64-QAM 2/3	64-QAM 3/4
OFDM 256-FFT								
6 MHz (MMDS)	$T_g/32$	2.50	5.00	7.51	10.01	15.01	20.01	22.52
	$T_g/16$	2.43	4.86	7.28	9.71	14.57	19.43	21.85
	$T_g/8$	2.29	4.59	6.88	9.17	13.76	18.35	20.64
	$T_g/4$	2.06	4.13	6.19	8.26	12.38	16.51	18.58
7 MHz (ETSI)	$T_g/32$	2.92	5.82	8.73	11.64	17.45	23.27	26.18
	$T_g/16$	2.82	5.65	8.47	11.29	16.94	22.59	25.41
	$T_g/8$	2.67	5.33	8.00	10.67	16.00	21.33	24.00
	$T_g/4$	2.40	4.80	7.20	9.60	14.40	19.20	21.60
20 MHz (U-NII)	$T_g/16$	8.13	16.26	24.40	32.53	48.79	65.05	73.19
	$T_g/8$	7.68	15.36	23.04	30.72	46.08	61.44	69.12
	$T_g/4$	6.91	13.82	20.74	27.65	41.47	55.30	62.21



## Frecuencias bajas (< 11 GHz)

- WirelessMAN-OFDMA
  - Velocidades de transmisión brutas

Bandwidth (MHz)	$T_g$	BPSK 1/2	QPSK 1/2	QPSK 3/4	16-QAM 1/2	16-QAM 3/4	64-QAM 2/3	64-QAM 3/4
OFDMA 2048-FFT								
6 MHz (MMDS)	$T_b/32$		4.99	7.48	9.97	14.96	19.95	22.44
	$T_b/16$		4.84	7.26	9.68	14.52	19.36	21.78
	$T_b/8$		4.57	6.86	9.14	13.71	18.29	20.57
	$T_b/4$		4.11	6.17	8.23	12.34	16.46	18.51
7 MHz (ETSI)	$T_b/32$		5.82	8.73	11.64	17.45	23.27	26.18
	$T_b/16$		5.65	8.47	11.29	16.94	22.59	25.41
	$T_b/8$		5.33	8.00	10.67	16.00	21.33	24.00
	$T_b/4$		4.80	7.20	9.60	14.40	19.20	21.60

## Overhead de control – Tasa neta

- Modulaciones con una única portadora (SC): ~ 5%
  - Códigos correctores con bloques de tamaño grande
  - No se requieren prefijos cíclicos para sincronización
- Modulaciones OFDM: ~ 10%
  - [Initial performance evaluation and analysis of the global OFDM MAN standard IEEE 802.16a”, C. Hoymann]
    - Prefijos de sincronización más largos
    - Espacios de guarda frecuencial entre portadoras
    - Códigos correctores de errores con más overhead

Modulation/ Coding	Example PHY Gross Bit Rate	Example MAC Net Bit Rate
QPSK 1/2	14.0 Mbps	12.7 Mbps
QPSK 3/4	21.0 Mbps	18.9 Mbps
16 AM 1/2	28.0 Mbps	25.2 Mbps
16 QAM 3/4	42.0 Mbps	38.0 Mbps
64 QAM 2/3	56.0 Mbps	50.5 Mbps
64 QAM 3/4	63.0 Mbps	56.9 Mbps

## Bandas de frecuencia y canales

- WirelessMAN-SC
  - Canales (MHz) entre 20 y 28, en cualquier banda de 10 a 66 GHz
- WirelessMAN-SCa
  - Canales (MHz) de 3.5 y 7 en las bandas de 2.5 GHz y 3.5 GHz
  - Canales (MHz) de 10 y 20 en la banda de 5 GHz
- WirelessMAN-OFDM
  - Canales (MHz) de 1.75; 3; 3.5; 5; 5.5 y 7 en las bandas con licencia
  - Canales de 10 MHz en la banda sin licencia
- WirelessMAN-OFDMA
  - Canales (MHz) de 1.25; 3.5; 7; 8.75; 14; 17.5 y 28 en las bandas que requieren licencia
  - Canales (MHz) de 10 y 20 en las bandas sin licencia
- En algunos casos el estándar no da canalizaciones para las bandas que requieren licencia, se deja que el organismo regional (ETSI) las dé.

## Valoraciones sobre alcance y velocidad

- El alcance y la velocidad dependen en gran medida de la capa física y de las condiciones de propagación
- Al ser una modulación adaptativa, las SS más próximas a la BS podrán utilizar una modulación más eficiente y dispondrán de más ancho de banda
- Sensibilidad requerida (dBm)

WirelessMAN-SC	Canal de 25 MHz		Canal de 28 MHz	
	BER=10 <sup>-3</sup>	BER=10 <sup>-6</sup>	BER=10 <sup>-3</sup>	BER=10 <sup>-6</sup>
QPSK	-80.02	-76.02	-79.52	-75.52
16-QAM	-73.02	-69.02	-72.52	-68.52
64-QAM	-65.02	-60.02	-64.52	-59.52

## Potencias máximas de transmisión

- Potencias determinadas por organismos reguladores
  - Europa: ETSI (European Telecommunication Standards Institute)
    - Sistemas TDMA punto a multipunto operando entre 3 y 11 GHz no pueden superar los 35 dBm
- IEEE define varios tipos de equipos según la capa radio utilizada y la potencia transmitida
- WirelessMAN-SCa y WirelessMAN-OFDMA
  - Tipo 1:  $17 \text{ dBm} \leq P_{tmax} < 20 \text{ dBm}$
  - Tipo 2:  $20 \text{ dBm} \leq P_{tmax} < 23 \text{ dBm}$
  - Tipo 3:  $23 \text{ dBm} \leq P_{tmax} < 30 \text{ dBm}$
  - Tipo 4:  $30 \text{ dBm} \leq P_{tmax}$

## Potencias máximas de transmisión

- WirelessMAN-OFDM
  - Tipo 1:  $P_{tmax} < 14 \text{ dBm}$
  - Tipo 2:  $14 \text{ dBm} \leq P_{tmax} < 17 \text{ dBm}$
  - Tipo 3:  $17 \text{ dBm} \leq P_{tmax} < 20 \text{ dBm}$
  - Tipo 4:  $20 \text{ dBm} \leq P_{tmax} < 23 \text{ dBm}$
  - Tipo 5:  $23 \text{ dBm} \leq P_{tmax}$
- Para trabajar en bandas sin licencia deberán cumplirse las restricciones asignadas en cada país a las diferentes bandas

## Funciones y tramas de la capa MAC

## Direccionamiento

- Cada SS tiene una dirección de 48 bits tipo IEEE 802
  - Utilizada al inicio de las conexiones con la BS y como parte del proceso de autenticación.
- Cada BS tiene un identificador de estación base de 48 bits: BSID
  - Es diferente de su propia dirección MAC
  - 24 bits de identificación de operador + 24 bits asignados por el operador
- En el caso de topología mesh, los nodos tienen además un Node ID de 16 bits, una vez entran a formar parte de la red.

## Conexiones y flujos de servicio

- Conexión: conexión a nivel MAC entre BS y SS
  - Son unidireccionales
  - Identificadas con un CID (Connection IDentifier) de 16 bits
  - Pueden ser unicast, multicast o broadcast
  - Cada conexión tiene asociado un flujo de servicio
- Flujo de servicio (service flow):
  - Cada conexión física se asocia a un flujo de servicio, una conexión por flujo de servicio
  - Servicio de transporte a nivel MAC
  - Es unidireccional
  - Identificados con SFID (Service Flow IDentifier) de 32 bits
  - Cuando se da de alta en el sistema a una SS se definen los parámetros de QoS

## Conexiones y flujos de servicio

- Conexión de transporte: Utilizada para datos del usuario
- Conexiones de gestión:
  - Permanentes
    - Broadcast: utilizada por la BS para enviar mensajes de sistema
    - Initial ranging: utilizada en el proceso de conexión
  - 3 pares al inicializar una SS
    - Básica: Mensajes MAC cortos y urgentes
      - ARQ, solicitud de ancho de banda, informe de canal
    - Primaria: Mensajes largos y más tolerantes al retardo
      - Registro de una SS, adición, modificación o terminación de una de una conexión
    - Secundaria (opcional)
      - Mensajes de otros protocolos: DHCP, TFTP, SNMP

## Conexión de los equipos

- Procedimiento:
  - La SS escanea las frecuencias para encontrar un canal operativo.
  - La SS sincroniza el enlace descendente según las informaciones contenidas en las tramas enviadas periódicamente sobre el enlace
  - Cuando la capa PHY es sincronizada, la SS mira los mensajes DCD (Downlink Channel Descriptor) y UCD (Uplink Channel Descriptor) y determina la modulación de frecuencia y la función de corrección de error FEC que hay que utilizar
  - Realiza las 3 conexiones de control
  - Establece los canales de tráfico contratados

## Formato de la cabecera MAC

- Formato genérico de cabecera MAC

MAC (6 bytes)	Subcabeceras MAC - opcional	Datos de capas superiores (gestión o datos) opcional	CRC - opcional (4 bytes)
------------------	--------------------------------	---	-----------------------------

- Subcabeceras: datos específicos para un tipo de función
  - Mesh, ARQ, fragmentación, packing, ...
- Cabecera sin datos: cabecera con diferente formato que la anterior
  - Bandwidth request, channel report, feedbacks for OFDMA

## Paquetes MAC: Cabecera genérica

- Campos de la cabecera
  - HT: Header Type
    - 0: genérica
    - 1: petición de BW
  - EC: Encryption Control
    - 0/1: datos encriptados
  - CI: CRC Indicator
    - 0/1: existe CRC
  - EKS: Encryption Key Sequence
    - Índice para identificar el vector de inicialización y la clave de encriptación
  - LEN: Longitud de toda la trama

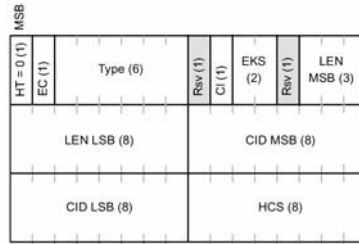


Figure 19—Generic MAC header format

## Paquetes MAC: Cabecera genérica

- Campos de la cabecera
  - CID: Connection Identifier
  - HCS: Header Check Sequence
    - Detector de errores ( $D8 + D2 + D + 1$ )
  - Type: tipo de subcabecera.
    - Bit 0:
      - Downlink: subcabecera de asignación de BW (Fast-feedback-allocation)
      - Uplink: subcabecera de establecimiento de BW (Grant)
    - Bit 1: Subcabecera de múltiples paquetes en el mismo PDU (packing)
    - Bit 2: Subcabecera de fragmentación
    - Bit 3: Subcabeceras extendidas
    - Bit 4: Feedback de la corrección de errores ARQ
    - Bit 5: Subcabecera mesh

## Paquetes MAC: Petición de BW

- No contienen datos, sólo la cabecera
- Campos de la cabecera:
  - Type: Tipo de petición de BW
    - 000: incremental
    - 001: agregado
  - BR: Bandwidth Request
    - Número de bytes en el enlace de subida solicitados para transmitir desde la SS.
    - Bytes por CID

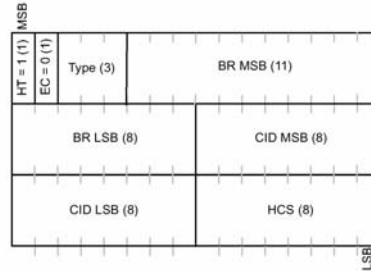
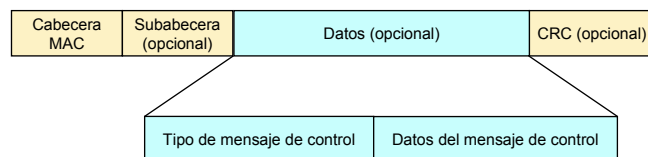


Figure 20—Bandwidth request header format

## Paquetes MAC: Mensajes de control

- Viajan en las conexiones de control
  - Broadcast
  - Initial Ranging
  - Básica
  - Primaria





# Paquetes MAC: Mensajes de control

Table 14—MAC Management messages

Type	Message name	Message description	Connection
0	UCD	Uplink Channel Descriptor	Broadcast
1	DCD	Downlink Channel Descriptor	Broadcast
2	DL-MAP	Downlink Access Definition	Broadcast
3	UL-MAP	Uplink Access Definition	Broadcast
4	RNG-REQ	Ranging Request	Initial Ranging or Basic
5	RNG-RSP	Ranging Response	Initial Ranging or Basic
6	REG-REQ	Registration Request	Primary Management
7	REG-RSP	Registration Response	Primary Management
8		reserved	
9	PKM-REQ	Privacy Key Management Request	Primary Management
10	PKM-RSP	Privacy Key Management Response	Primary Management
11	DSA-REQ	Dynamic Service Addition Request	Primary Management
12	DSA-RSP	Dynamic Service Addition Response	Primary Management
13	DSA-ACK	Dynamic Service Addition Acknowledge	Primary Management
14	DSC-REQ	Dynamic Service Change Request	Primary Management
15	DSC-RSP	Dynamic Service Change Response	Primary Management
16	DSC-ACK	Dynamic Service Change Acknowledge	Primary Management
17	DSR-REQ	Dynamic Service Deletion Request	Primary Management
18	DSR-RSP	Dynamic Service Deletion Response	Primary Management
19		reserved	
20		reserved	
21	MCA-REQ	Multicast Assignment Request	Primary Management
22	MCA-RSP	Multicast Assignment Response	Primary Management
23	DBPC-REQ	Downlink Burst Profile Change Request	Basic
24	DBPC-RSP	Downlink Burst Profile Change Response	Basic
25	RES-CMD	Reset Command	Basic

Table 14—MAC Management messages (continued)

Type	Message name	Message description	Connection
26	SBC-REQ	SS Basic Capability Request	Basic
27	SBC-RSP	SS Basic Capability Response	Basic
28	CLK-CMP	SS network clock comparison	Broadcast
29	DREG-CMD	De-Register Command	Basic
30	DSX-RVD	DSX Received Message	Primary Management
31	TFTP-CPLT	Config File TFTP Complete Message	Primary Management
32	TFTP-RSP	Config File TFTP Complete Response	Primary Management
33	ARQ-Feedback	Standalone ARQ Feedback	Basic
34	ARQ-Discard	ARQ Discard message	Basic
35	ARQ-Reset	ARQ Reset message	Basic
36	REP-REQ	Channel measurement Report Request	Basic
37	REP-RSP	Channel measurement Report Response	Basic
38	FPC	Fast Power Control	Broadcast
39	MSH-NCFG	Mesh Network Configuration	Broadcast
40	MSH-NENT	Mesh Network Entry	Basic
41	MSH-DSCH	Mesh Distributed Schedule	Broadcast
42	MSH-CSCH	Mesh Centralized Schedule	Broadcast
43	MSH-CSCF	Mesh Centralized Schedule Configuration	Broadcast
44	AAS-FBCK-REQ	AAS Feedback Request	Basic
45	AAS-FBCK-RSP	AAS Feedback Response	Basic
46	AAS_Beam_Select	AAS Beam Select message	Basic
47	AAS_BEAM_REQ	AAS Beam Request message	Basic
48	AAS_BEAM_RSP	AAS Beam Response message	Basic
49	DREG-REQ	SS De-registration message	Basic
50-255		reserved	

# Transmisión de PDUs en la capa MAC

- Fragmentación:
  - Dividir una MAC SDU (Service Data Units) en varios fragmentos
  - Permite cumplir requerimientos de QoS cuando el canal tiene muchos errores
- Packing:
  - Envío de varias MAC SDU (datos de capas superiores) en una sola MAC PDU (trama MAC)
  - Mejora la eficiencia
- Concatenación:
  - Envío de varias PDU en la misma ráfaga
  - Mejora la eficiencia

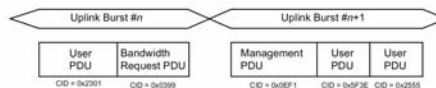
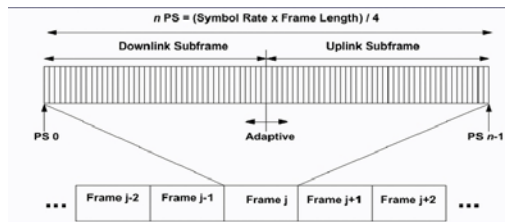


Figure 25—MAC PDU concatenation showing example CIDs

## Entramado SC y SCa

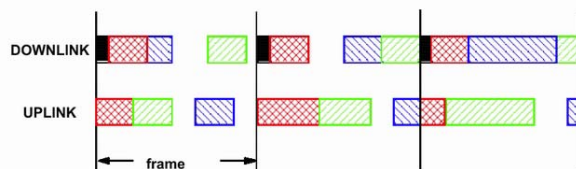
- TDD: Time Division Duplexing
  - Enlace de subida: TDMA y DAMA (Demand Assigned Multiple Access)
  - Enlace de bajada: TDM
  - Ambos enlaces utilizan el mismo canal
  - Transmisión no simultánea: half duplex
  - La duración de la trama es configurable: 0.5, 1 ó 2 ms
    - Útil para reducir la latencia o el overhead de control



PS=physical slot = 4 modulated symbols

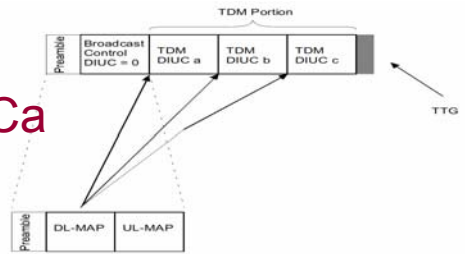
## Entramado SC y SCa

- FDD: Frequency Division Duplexing
  - Enlace de bajada y enlace de subida establecidos en canales diferentes
  - Terminales Half Duplex o Full Duplex
  - Duración de la trama configurable: 0.5, 1 ó 2 ms



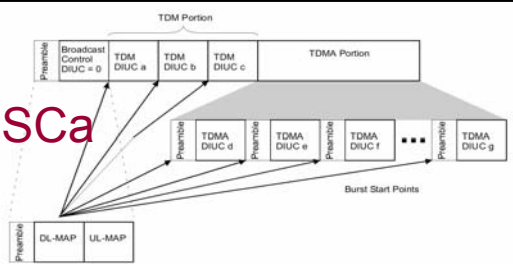
 Broadcast       Half Duplex Terminal #1  
 Full Duplex Capable User       Half Duplex Terminal #2

## Entramado SC y SCa

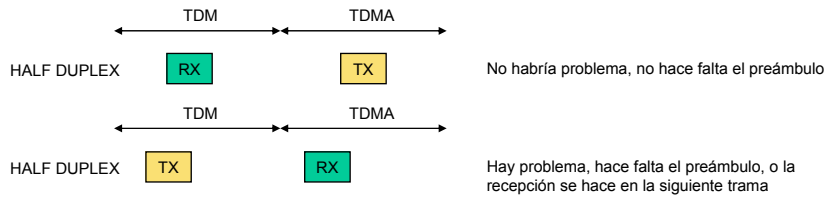


- Trama de bajada TDD
  - Preámbulo: sincronización y ecualización
  - DL (DownLink) / UL (UpLink) MAPping
    - Indica donde deben escuchar / transmitir las SS y con qué modulación
  - DIUC: Downlink Interval Usage Code:
    - Espacio reservado para la transmisión de datos a una SS
    - DIUC = 0 → Broadcast y control
  - Datos transmitidos en orden de robustez decreciente
    - Evita perder la sincronización
  - TTG (Transmit/receive Transition gap): tiempo de guarda para pasar de recepción a transmisión sin perder sincronismo

## Entramado SC y SCa

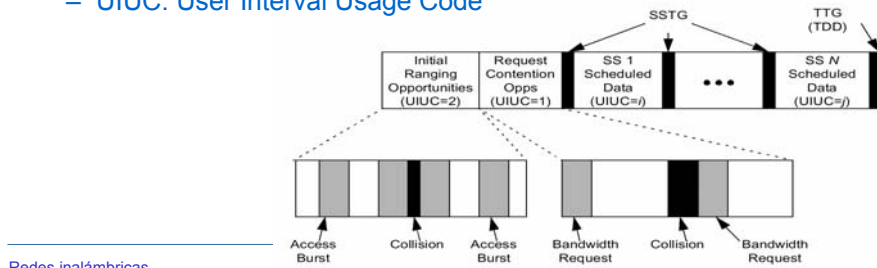


- Trama de bajada FDD
  - Igual a la TDD pero con una porción TDMA
  - La parte TDMA funciona igual que la TDM pero los DIUCs incluyen un preámbulo para que las estaciones half-duplex puedan sincronizarse y transmitir y recibir en la misma trama



## Entramado SC y SCa

- Trama de subida TDD y FDD
  - Initial Ranging Opportunities (UIUC=2): acceso inicial
  - Request Contention Opportunities (UIUC=1): Espacio para:
    - Peticiones de ancho de transmisión
    - Peticiones de modificación de ancho de banda
  - SSTG: Subscriber Station Transition Gap
  - UIUC: User Interval Usage Code



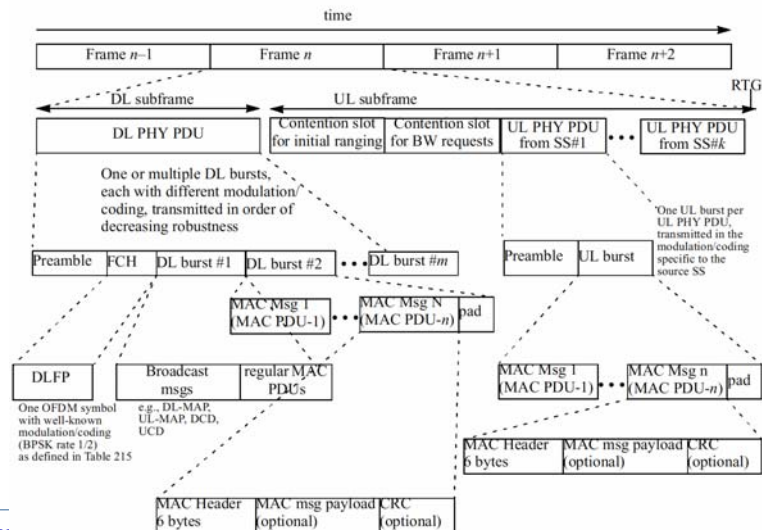
## Entramado OFDM

- Repite el formato del broadcast, mapas de los enlaces de subida y bajada, e intervalos de acceso (ranging) y petición de transmisión
- También permite FDD y TDD
- La información siempre debe tener un número entero de símbolos OFDM:
  - Relleno (Padding)
- Tiempos de trama configurables: 2.5, 4, 5, 8, 10, 12.5 y 20 ms

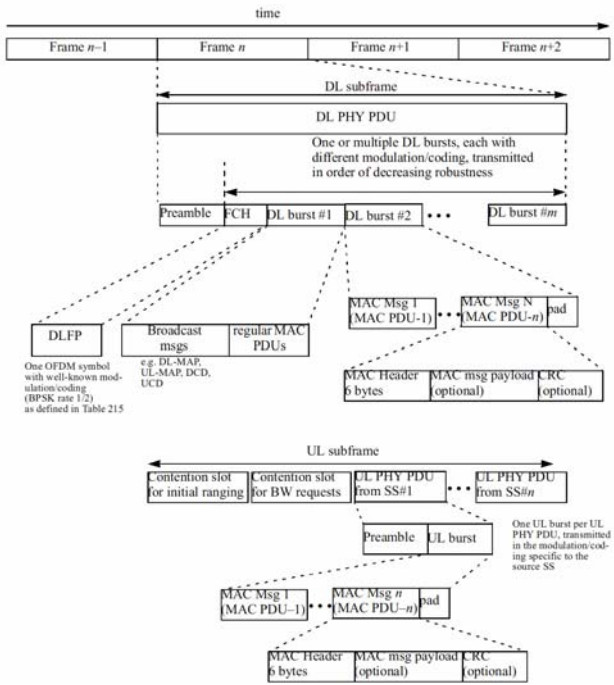
## Entramado OFDM

- Trama OFDM utilizando TDD
  - Tiempos de guarda
    - TTG: Tx/Rx Transition Gap
    - RTG: Rx/Tx Transition Gap
  - Subtrama de bajada
    - Preámbulo para sincronización
    - Frame Control Header (FCH): 1 símbolo OFDM (QPSK) que contiene información sobre las ráfagas del enlace de bajada
  - Los datos viajan en las denominadas ráfagas
    - Cada ráfaga contiene varios paquetes (PDU) MAC
  - La primera ráfaga de bajada contiene una parte de broadcast con los mapeos de las estaciones en los canales de subida y bajada

## Entramado OFDM utilizando TDD



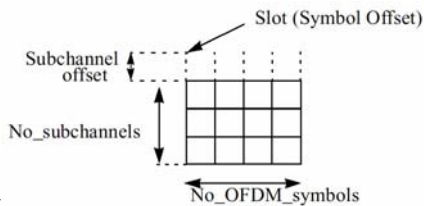
# Entramado OFDM utilizando FDD



Redes inalámbricas

# Entramado OFDMA

- La trama MAC a nivel lógico es la misma que en OFDM
- Varía a nivel físico
  - En OFDM los slots físicos pertenecientes a un canal se estructuran en una sola dimensión (tiempo)
  - En OFDMA los slots físicos se estructuran en dos dimensiones (tiempo x subcanal) formando una región de datos
    - Un slot = número de símbolos contiguos recibidos durante un cierto tiempo por n subcanales contiguos



Redes inalámbricas

## Entramado OFDMA

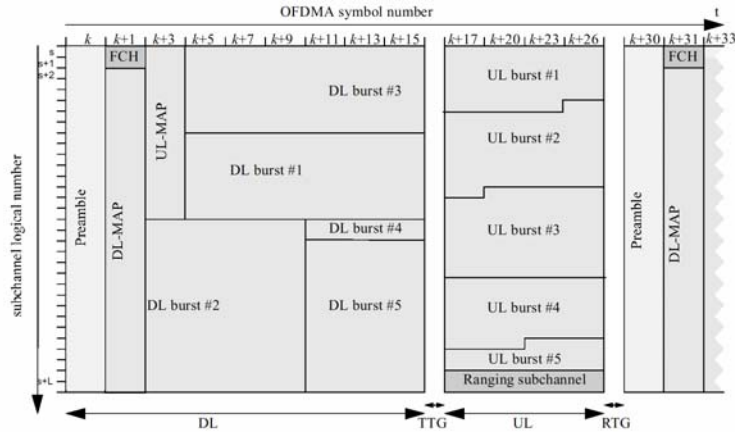


Figure 218—Time plan - one TDD time frame (with only mandatory zone)

## Perfiles de ráfagas

- Perfil de ráfaga de transmisión:
  - Parámetros de nivel físico:
    - Tipo de modulación, tipo de FEC, longitud de preámbulo, longitud de tiempos de guarda
  - Una BS no tiene todos los perfiles, en los mensajes Downlink Channel Descriptor en modo broadcast notifica los disponibles
  - Existen unos niveles umbrales de CINR
    - La BS mide la calidad de señal recibida y determina un perfil para el canal de bajada y el de subida
    - Si la SS detecta un salto de umbral de CINR envía un mensaje solicitando un cambio de perfil en el canal de bajada
  - El cambio de un perfil a otro dentro de una trama viene indicado en los UL-MAP y DL-MAP

## Corrección de errores con ARQ

- Mecanismo opcional
- Se realiza por conexión, una conexión no puede tener tráfico mixto: ARQ y NO-ARQ simultáneamente
- Funcionamiento:
  - Los datos van agrupados por bloques: Block Sequence Number
  - Paquetes ACK y NACK:
    - A través de paquete específico o piggybacked (sub-cabecera)
    - Acumulativos o selectivos
  - Ventana deslizante: ARQ\_WINDOW\_SIZE
- Temporizadores
  - ACK\_RETRY\_TIMEOUT: periodo de retransmisión
  - ARQ\_BLOCK\_LIFETIME: máximo tiempo que la conexión tratará un paquete antes de descartarlo

## Corrección de errores con ARQ

- Waiting for retransmission:
  - Se quiere transmitir pero todavía está en la cola

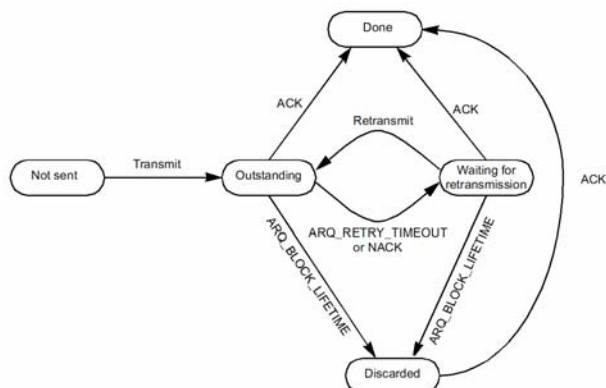


Figure 33—ARQ transmit block states



## Calidad de servicio (QoS)

## Calidad de servicio

- Parámetros de QoS definidos por el 802.16:
  - Prioridad de tráfico
  - Maximum sustained traffic rate: tasa máxima sostenida
  - Maximum traffic burst: tamaño de ráfaga máximo
  - Minimum reserved traffic rate
  - Tolerated jitter
  - Maximum latency
  - Vendor specific QoS parameters

## Calidad de servicio

- Mecanismos de transmisión de datos de una conexión en la capa MAC
  - Cada conexión está asociada a un tipo de servicio de datos (service flow)
  - Cada servicio de datos está asociado a un grupo de parámetros de QoS que cuantifican los aspectos de su comportamiento
  - Existen 5 tipos de servicios:
    - UGS: Unsolicited Grant Service
    - rtPS: real-time Polling Service
    - ertPS: extended real-time Polling Service, implementado en el 802.16e
    - nrtPS: non-real-time Polling Service
    - BE: Best Effort

## Calidad de servicio

- El canal de bajada lo gestiona directamente la BS
  - Define la duración de las ráfagas de datos asignadas a cada SS en base a los datos que recibe para cada una de ellas y a los niveles de prioridad
  - Define los perfiles de cada ráfaga en base a la calidad de la señal recibida

## Calidad de servicio

- Para el canal de subida, cada SS envía las necesidades de QoS en mensajes de control denominados requests:
  - Cuando la BS recibe una petición asignará espacio en la siguiente trama para que la SS pueda transmitir
  - Peticiones: número de bytes que se requieren transmitir:
    - Incrementales: lo que debe añadirse a lo ya solicitado
    - Agregadas: total de ancho de banda desde un instante determinado
  - Cada cierto tiempo se envía una petición agregada para evitar pérdidas de sincronismo
  - Las peticiones pueden ser específicas (una cabecera sin datos) o en piggy-backing (dentro de un paquete de datos)

## Calidad de servicio

- Formas de enviar las peticiones de ancho de banda:
  - Grant: la BS asigna ancho de banda de forma fija.
    - La petición se define en el establecimiento de la conexión y no hace falta mandar más peticiones
    - Una SS recibe una asignación de ancho de banda
      - GPC (Grant Per Connection): La BS garantiza el ancho de banda para cada conexión y la SS utiliza este ancho de banda sólo para esta conexión
      - GPSS (Grant Per Subscriber Station): El BS garantiza un ancho de banda general que será utilizado para todas las conexiones pertenecientes a la SS
        - » GPSS sólo está disponible para los soportes físicos de la banda 10-66 GHz

## Calidad de servicio

- Formas de enviar las peticiones de ancho de banda:
  - Sondeo (polling): Proceso a través del cual una BS asigna ancho de banda a las SS para que transmitan sus peticiones de ancho de banda
    - Los sondeos no son paquetes específicos, son espacios reservados en la distribución del canal de subida
    - Sondeo individual:
      - La BS adjudica un espacio de tiempo donde la SS puede transmitir datos o/y peticiones de BW
      - Si no requiere nada la SS envía datos de relleno
    - Sondeo multicast o broadcast: Las estaciones deben realizar contienda para poder enviar sus peticiones
      - Se utiliza cuando no hay suficiente espacio para sondear todas las SS de forma individual

## Calidad de servicio

- Formas de enviar las peticiones de ancho de banda:
  - Sondeo multicast y broadcast:
    - Pertenencia a grupos multicast de sondeo
      - Mensajes de control gestionados por la BS para suscribir o borrar una SS de un grupo multicast de sondeo
    - En el espacio reservado para peticiones BW en multicast o broadcast las SS no pueden enviar datos
    - El espacio de tiempo reservado para que las SS envíen sus peticiones se indica en el UL-MAP
    - En un espacio dedicado a contención existen varias oportunidades de transmisión (TXOP)
  - El proceso de contienda es el mismo para las oportunidades de registro “initial ranging opportunities”

## Calidad de servicio

- Formas de enviar las peticiones de ancho de banda:
  - Acceso por contienda:
    - Backoff con ventana de inicio y máxima seleccionadas por la BS
    - Cuando una SS quiere transmitir elije de forma aleatoria un valor entre  $(0, BW_0 - 1)$ 
      - Espera estas txop's antes de mandar su petición
      - El numero de txop's a esperar puede estar distribuido en varias tramas
    - Si no recibe respuesta en un tiempo (10 ms) asume colisión
    - Resolución de colisiones: mecanismo de backoff binario exponencial truncado

## Tipos de servicios de transmisión

- UGS: Unsolicited Grant Service
  - Datos en tiempo real con paquetes de longitud fija y transmitidos de forma periódica
    - T1 / E1; VoIP sin supresión de silencios
  - El servicio ofrece capacidad fija de transmisión sin necesidad de solicitarlo
  - Elimina el overhead de las peticiones y sus retardos
  - Parámetros de QoS
    - Maximum sustained traffic rate
    - Maximum latency
    - Tolerated jitter
    - Request/Transmission policy: la BS no debe utilizar mecanismos de contienda para este tipo de conexión

## Tipos de servicios de transmisión

- rtPS: Real-time Polling service
  - Datos en tiempo real con paquetes de longitud variable y transmitidos de forma periódica
    - Video MPEG
  - El servicio ofrece oportunidades de petición de forma periódica:
    - Las peticiones permiten a la SS especificar las reservas necesarias
  - Más overhead de control pero permite tasas variables
  - Parámetros de QoS
    - Minimum reserved traffic rate
    - Maximum sustained traffic rate
    - Maximum latency
    - Request/Transmission policy: la BS no debe utilizar mecanismos de contienda para este tipo de conexión

## Tipos de servicios de transmisión

- ertPS: extended real-time Polling service
  - Añadido en la nueva extensión 802.16e combina las ventajas de UGS y rtPS
  - Igual que en UGS, pero en UGS las asignaciones son de tamaño fijo y en ertPS son de tamaño variable
  - Datos en tiempo real con paquetes de longitud variable y transmitidos de forma periódica
    - VoIP con supresión de silencios
  - Parámetros de QoS
    - Minimum reserved traffic rate
    - Maximum sustained traffic rate
    - Maximum latency

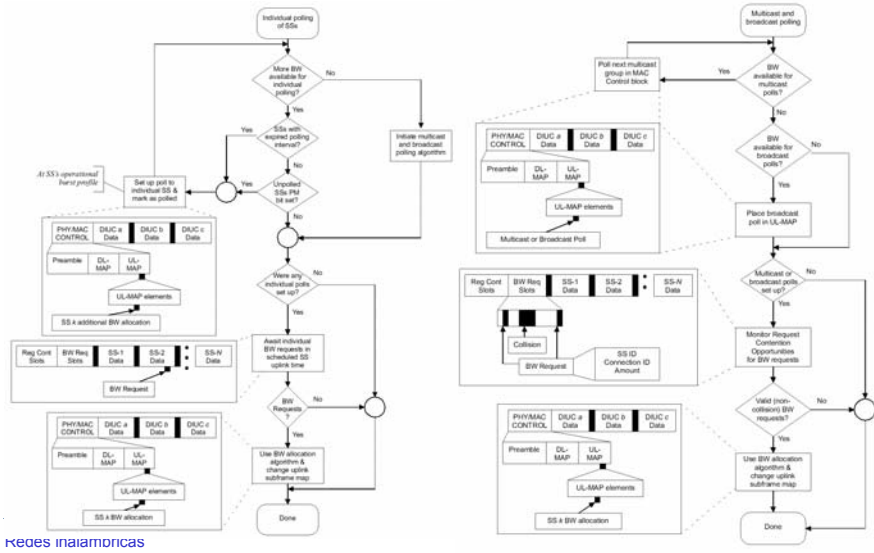
## Tipos de servicios de transmisión

- nrtPS: Non-real-time Polling Service
  - Flujos de datos tolerantes al retardo con paquetes de longitud variable que requieren una tasa de datos mínima
    - FTP
  - El servicio ofrece sondeos a las SS que garantizan la posibilidad de realizar peticiones de ancho de banda incluso cuando el enlace está saturado
    - Normalmente se sondea cada segundo o menos
  - Parámetros de QoS
    - Minimum reserved traffic rate
    - Maximum sustained traffic rate
    - Traffic priority
    - Request/Transmission policy: la SS puede realizar peticiones en contienda

## Tipos de servicios de transmisión

- BE: Best Effort
  - Flujos de datos que no requieren un nivel de servicio mínimo y que pueden ser transmitidos cuando existe ancho de banda disponible
  - Parámetros de QoS
    - Maximum sustained traffic rate
    - Traffic priority
    - Request/Transmission policy: Este servicio solo puede realizar peticiones de ancho de banda bajo contienda

# Calidad de servicio



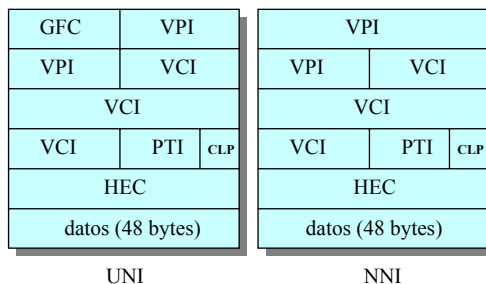
# Convergence Sublayer CS



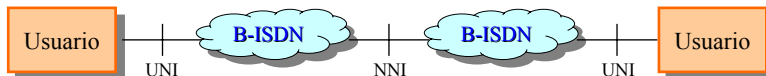
## Subcapa específica de servicio: CS

- Realiza las siguientes funciones:
  - Aceptar paquetes (PDUs: Protocol Data Units) de capas superiores y enviarlas a través de la capa MAC
  - Clasificar las PDUs de las capas superiores y elegir el Service Flow adecuado para enviarlas (mapping)
  - Procesar las PDUs de las capas superiores (opcional)
    - Suprimir cabeceras (PHS: Payload Header Suppression)
    - Controlar la fragmentación, el packing y la concatenación
- Permite transportar múltiples protocolos de usuario
  - Actualmente existen 2 tipos de servicios:
    - ATM CS
    - Packet CS: para paquetes IP, ethernet, VLAN

## Convergence Sublayer : ATM CS



- Cabecera ATM
  - GFC: Generic Flow Control
  - VPI: 8 / 12 bits (UNI / NNI)
  - VCI: 16 bits
  - PTI: Tipo de carga
  - CLP: Cell Loss Priority
  - HEC: Header Error Control



## Convergence Sublayer: ATM CS

- Formato ATM CS PDU

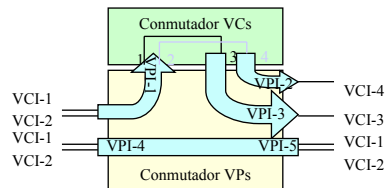
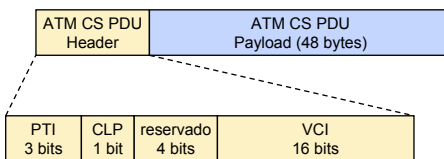


- Si no hay supresión de cabeceras
  - ATM CS PDU Header es la cabecera de la celda ATM: 5 bytes
- Si hay supresión de cabeceras
  - Los campos repetitivos de la misma conexión no se transmiten
    - El emisor los elimina
    - El receptor los vuelve a añadir antes de insertar la celda ATM en la red ATM destino
  - El indicador de circuito virtual se transforma a un CID de WiMAX que viaja dentro de la cabecera MAC

## Convergence Sublayer : ATM CS

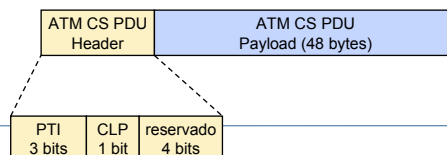
- PHS de conexiones conmutando VP

- CID (16 bits) → VPI (8 / 12 bits)



- PHS de conexiones conmutando VC

- CID (16 bits) → VPI + VCI (24 ó 28 bits) no se pueden mapear todos



## Convergence Sublayer: Packet CS

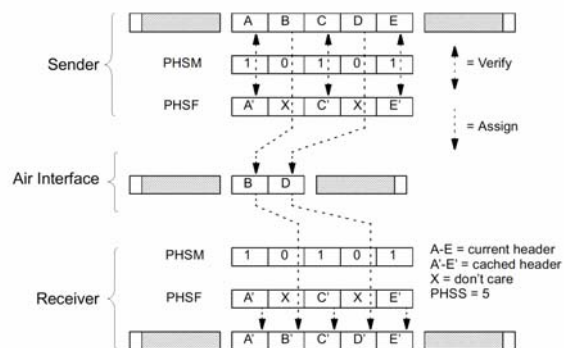
- Posibilidad de suprimir cabeceras (PHS)
  - PHSI: Payload Header Suppression Index
    - Indica que tipo de supresión de cabecera se ha realizado
  - PHSF: Payload Header Suppression Field
    - Datos de la cabecera que no cambian y por tanto no se envían
  - Con el PHSI y el CID se referencia el PHSF que utiliza el paquete
  - PHSV: Payload Header Suppression Valid
    - Indica si se comprueba que los bytes ha suprimir son iguales a los del PHSF

MAC DSU (Service Data Unit) – Campo de datos de un paquete MAC



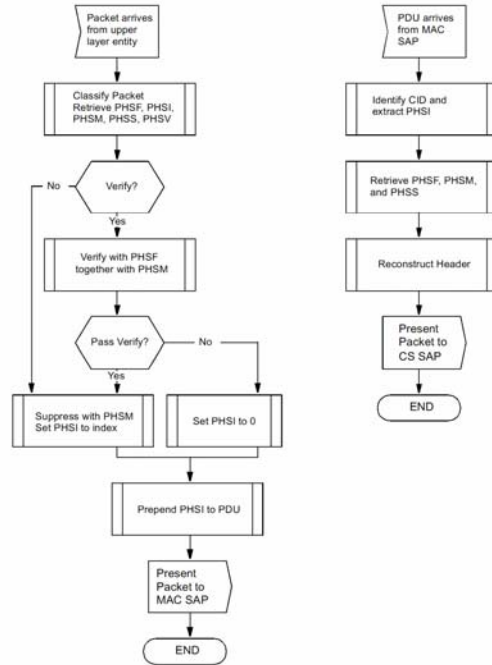
## Convergence Sublayer : Packet CS

- PHSM: Payload Header Suppression Mask
  - Máscara que indica los bytes de la cabecera a suprimir
- PHSS: Payload Header Suppression Size



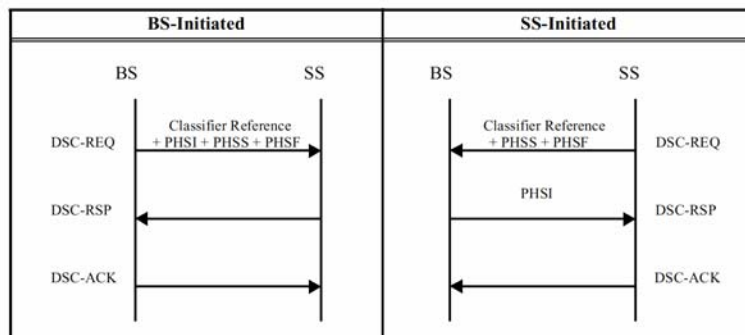
## Convergence Sublayer: Packet CS

- Algoritmo:



## Convergence Sublayer : Packet CS

- Señalización
  - Mensajes DSC: Dynamic Service Change
  - Cuando se crea el service flow se suele crear la regla PHS
    - PHSI, PHSS



## Convergence Sublayer : Packet CS

- Ejemplos de formatos CS PDU:



Figure 12—IEEE 802.3/Ethernet CS PDU format without header suppression



Figure 13—IEEE 802.3/Ethernet CS PDU format with header suppression



Figure 14—IEEE 802.1Q VLAN CS PDU format without header suppression



Figure 15—IEEE 802.1Q VLAN CS PDU format with header suppression



Figure 16—IP CS PDU format without header suppression



Figure 17—IP CS PDU format with header suppression

## Seguridad en IEEE 802.16

## Seguridad en IEEE 802.16

- Capa específica de seguridad: Security Sublayer
  - Negociación de las capacidades de cifrado de ambas partes
  - Mecanismos de autenticación
  - Intercambio de claves de cifrado
  - Cifrado de la información
- Elementos
  - Security Association (SA): Identifican todos los parámetros de seguridad de una conexión
  - Certificado X.509: certificados estandarizados que proporcionan la autenticidad de los elementos y el no repudio.
  - Privacy and Key Management (PKM) protocol:
    - Gestiona todas las tareas relacionadas con seguridad

## Asociación de seguridad

- Tres tipos de SA
  - SA Primaria: es la asociación establecida por cada SS durante el proceso de inicialización
  - SA Estática: es la asociación de seguridad que ofrece la BS
  - SA Dinámica: son asociaciones que se crean durante la vida de los diversos flujos de servicio
- Una SS ya conectada típicamente tiene dos o tres SAs, una para la gestión del canal secundario y otra puede ser para ambos canales, para el downlink y el uplink o bien una SA para el downlink y otra para el uplink
- Cada grupo multicast requiere también una SA para compartir entre miembros del grupo

## Asociación de seguridad

- Componentes de las SA:
  - SAID (Security Association Identifier): ID de 16 bits
  - Dos claves de encriptación (TEK – Traffic Encryption Key) para los datos: una en funcionamiento y otra TEK para cuando ésta expire
  - Tiempo de vida (defecto = 12 horas) y vector de inicialización para cada TEK
  - Una clave de autorización (AK) de 160 bits
  - Un lifetime del AK.
  - Una clave de encriptación de clave (KEK)
  - Un código downlink HMAC (hash function-based Message Authentication code) para autenticar los mensajes de distribución de clave desde BS hacia el SS.
  - Un código uplink HMAC para autenticar los mensajes de distribución de clave desde las SS hacia la BS.

## Certificado X.509: componentes

- Existen dos tipos de certificados:
  - En el certificado se incluye la clave pública RSA (Rivest, Shamir y Aldeman)
  - Existe el certificado del fabricante y el certificado de las SS indicando la dirección MAC
- Versión 3 de formato de certificado de X.509.
  - Número de serie del Certificado.
  - Certificado del emisor y período de validez
  - Sujeto de Certificación: propietario del certificado de identidad
    - Si el sujeto es la SS, incluye también su dirección MAC.
  - Algoritmo de cifrado de la clave pública de la firma del certificado de emisor y la Clave Pública del Sujeto.
  - Algoritmo de firma y la Firma del emisor

## PKM: Procedimiento de autorización

- Proceso mediante el cual una SS obtiene la autorización para entrar en la red



Redes inalámbricas

WiMAX SS

239 / 416

## PKM: Procedimiento de autorización

- SS → BS CERT(FABRICANTE (SS)):
  - Certificado del fabricante (X.509)
- SS → BS CERT(SS) | Configuración | SAID:
  - Su propio certificado con la clave pública de la SS
  - Las capacidades criptográficas (protocolos y algoritmos que soporta el cliente)
  - Identificador de la SA, que será la primaria del cliente
- BS → SS RSA-ENCRYPT (PublicKey (SS), AK) | Lifetime | SeqNo | SAIDList
  - Si la BS puede verificar la identidad de la SS le envía la clave de autorización (AK) encriptada con la clave pública de la SS
  - Lifetime: Número de segundos antes de que el AK expire.
  - Número de secuencia de la AK
  - Lista de SA disponibles.

Redes inalámbricas

240 / 416

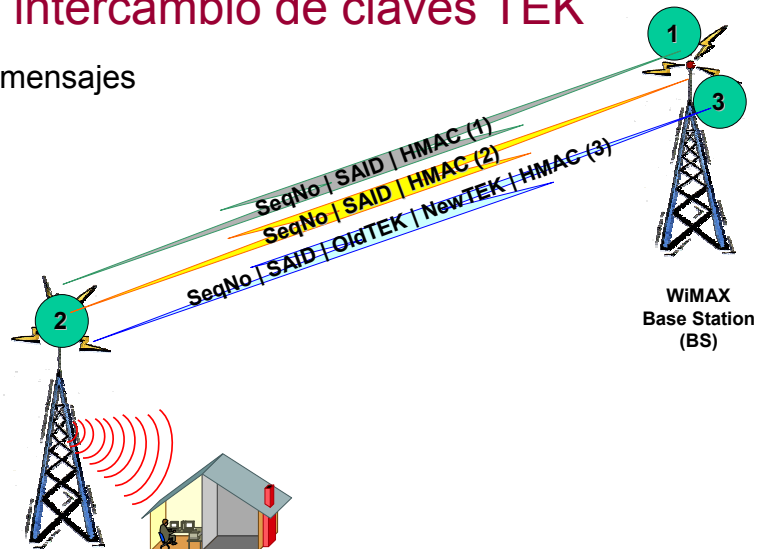


## PKM: Procedimiento de autorización

- El proceso de autorización se repite periódicamente para refrescar la clave AK
- El proceso de re-autorización es idéntico al anterior sin envío de autenticación ni certificados por parte de la SS
- Al final este procedimiento se ha creado la AS primaria
- El siguiente paso es conocer las claves para la transmisión de tráfico: TEK – Traffic Encryption Key
  - La clave AK sólo es conocida por la SS y la BS ya que ha sido transmitida con la clave pública de la SS
  - A partir de la clave AK se obtiene la clave 3-DES (KEK) para transmitir más tarde las claves TEK

## PKM: intercambio de claves TEK

- 2 ó 3 mensajes



## PKM: intercambio de claves TEK

- BS → SS: SeqNo | SAID | HMAC (1)
  - Envía el número de secuencia de la AK, el SAID y un valor de hash (HMAC) para verificar la autenticidad e integridad de los datos.
  - Mensaje opcional para rekeying iniciado por la BS
- SS → BS: SeqNo | SAID | HMAC (2)
  - Igual al anterior pero iniciado por la SS
- BS → SS: SeqNo | SAID | OldTEK | NewTEK | HMAC (3)
  - Si se verifica la identidad de la SS se envía:
    - El número de secuencia de la AK y el SAID
    - Las claves de cifrado antigua y nueva cifradas con el KEK
    - Un valor de hash de todos los elementos

## Mecanismos de cifrado

- Cifrado de datos: dos formas de cifrado
  - DES (Data Encryption Standard) en modo CBC (CipherBlock Chaining), opera sobre el campo de payload (carga útil), no cifra cabecera MAC ni CRC
  - AES (Advanced Encryption Standard) en modo CCM (Counter with CBC-MAC): Utilizado en el 802.11i
- Cifrado de claves (más robusto)
  - Triple DES (3-DES). Mecanismo por defecto, utiliza la KEK para cifrar la TEK
  - RSA (Rivest Shamir Aldeman): Utiliza la clave pública de la SS para cifrar las TEK
  - TEK-128 con AES: se utilizan claves de 128 bits con AES en modo ECB (Electronic Code Block ) para cifrar las TEK.

## Posibles mejoras de seguridad

- Se van añadiendo modificaciones de seguridad con bastante frecuencia:
  - Mecanismos de EAP (Extensible Authentication Protocol) para autenticación
  - Propuestas de autenticación de la BS

## Gestión de una red WiMAX

## Ingreso de un nodo en la red

- Procedimientos:
  - Barrido de canales y sincronización con la BS
  - Escucha de DL-MAP y de los parámetros básicos de la BS
  - Realizar el *Initial Ranging* enviando un mensaje a la BS
  - Negociación de los parámetros básicos de la conexión
  - Autorización de la SS e intercambio de claves
  - Formalización del registro de la nueva SS
  - Establecimiento de conectividad IP
  - Establecimiento de la fecha
  - Transferencia de parámetros opcionales a través de ficheros
  - Establecimiento de las conexiones

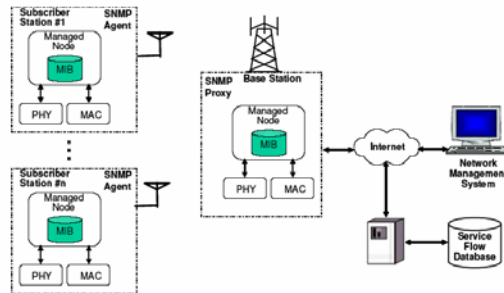
## Configuración

- La configuración IP de las SS se establece con el protocolo DHCP:
  - Dirección IP, máscara de red de la SS
  - Lista de routers de salida
  - Dirección IP del servidor TFTP a utilizar en la siguiente fase de configuración
  - El nombre del fichero de configuración a bajar con TFTP
  - Lista de servidores donde enviar la información de trazas
- Las SS que lo requieran pueden descargarse un fichero de configuración normalizado con parámetros:
  - Opcionales: Configuración de actualización de software, IP del servidor de software, nodos de autorización y registro (mesh)
  - De fabricante

## Gestión de red en WiMAX

- IEEE 802.16f. Amendment to IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks – Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access System – Management Information Base (MIB)
  - Definición de MIBs para los equipos de red del 802.16

- Modelo de referencia:



Redes inalámbricas

## Gestión de red en WiMAX

- Sistema de control y gestión (Network Management System)
- Las BS y SS tienen información sobre el estado de sus capas MAC y física:
  - Se utiliza el protocolo SNMP (Simple Network Management Protocol). Existen tres tipos de MIB
    - wmanIfBsObjects: Objetos de la BS
    - wmanIfSsObjects: Objetos de la SS
    - WmanIfCommonObjects: Objetos comunes
- Se pueden monitorizar las SS directamente o utilizando un SNMP proxy
  - Típicamente los mensajes de SNMP utilizan la conexión de gestión secundaria.

Redes inalámbricas

## Principales elementos de gestión de las BS

- WmanIfBsSystem: Información general
  - Tabla con los SS registrados
- WmanIfBsSystem: Información sobre la capa de convergencia
  - Tablas con los servicios provisionados, QoS de cada servicio y reglas de clasificación
- WmanIfBsCps: Información sobre la capa MAC
  - Tablas con configuración y medidas sobre el canal
- WmanIfBsNotification:
  - Tablas con eventos y cambios en el sistema
  - No se define ningún grupo, se deja a criterio del fabricante
- WmanIfBsPkm: Información referente a la seguridad
  - Tablas con SS autorizados y SA activas

## Principales elementos de gestión de las SS

- WmanIfSsSystem: Información sobre la SS (fabricante, número de serie, firmware, ...)
- WmanIfSsCps: Información de la capa MAC
  - Tablas con parámetros de configuración (temporizadores de retransmisión, número de reintentos de registro, ...) y estadísticas
- WmanIfSsTraps: Grupo para informar de todas las excepciones que puedan producirse en el funcionamiento de las SS
  - Se deja a criterio del fabricante
- WmanIfSsPkm. Información de seguridad: protocolo utilizado, TEK y certificados de fabricante y SS

## Principales elementos de gestión comunes

- WmanIfCmnPacketCs: Criterios para la clasificación de tramas
- WmanIfCmnCps:
  - Tablas con identificadores de flujos de servicio, parámetros configurados en el SS y medidas de canal realizadas por el SS
- WmanIfCmnPrivacy:
  - Tabla con los algoritmos criptográficos que soporta la SS
  - Par de claves TEK activas
- WmanIfCmnOfdmPhy: Información sobre la capa física OFDM.
  - Tablas con los canales de enlace de subida y bajada
  - Parámetros para enviar las ráfagas UCD (Uplink Channel Descriptor) y DCD (Downlink Channel Descriptor)
  - Modulaciones y codificaciones de la ráfaga del canal

## Mobile WiMAX - 802.16e

## Mobile Wimax

- Permite utilizar aplicaciones móviles y portables con velocidades superiores a 120 Km/h con QoS
- Para ello debe soportar:
  - Handover con menos de 50 ms de retardo (para no degradar servicios como la VoIP)
  - Gestión de ahorro de energía para los terminales con batería
  - Tolerancia al multicamino e interferencia

## Mobile Wimax

- Diferencias con el sistema estático:
  - Aparecen las estaciones móviles (MS)
  - Se definen los procedimientos de traspaso a nivel MAC
  - Modos de ahorro de batería
  - Se redefine el OFDMA, se utiliza el Scalable OFDMA (SOFDMA)
    - Cambio en el tamaño de la FFT (y de subportadoras) que permite más flexibilidad a la hora de asignar anchos de banda
    - Las antenas MIMO (Multiple Input Multiple Output) y adaptativas (AAS) tienen mejoras
  - Seguridad actualizada
    - Autenticación: sistemas EAP
    - Encriptación: AES-CCM con regeneración de claves
  - Multicast and Broadcast Service (MBS)
  - Se define un nuevo tipo de QoS: ertPS, rtPS con tamaño de paquete variable



## Mobile Wimax - Traspaso

- Hard-handover: obligatorio
  - Reselección de celda
  - Decisión de traspaso
  - Sincronización con el enlace de bajada de la nueva BS
  - Ranging y reentrada en la red
  - Finalización del contexto de la BS antigua
- Soft-handover: opcional
  - Las BS tienen que funcionar en el mismo canal
  - La MS dispone de un diversity set (potenciales nuevas BS)
  - Fast BS Switching (FBSS)
    - Se acorta el procedimiento de traspaso anterior
  - Macro Diversity HandOver (MDHO)
    - Se envía y recibe de varias BS simultáneamente

## Mobile Wimax - Traspaso

- Descubrimiento de BS vecinas para realizar el traspaso
  - Mensajes de control desde las BS anunciando BS en el vecindario
  - Barrido de frecuencia por la MS
    - La BS define periodos en los que las MS pueden realizar los barridos (mensaje de control)
      - De forma autónoma
      - Solicitado por la MS
      - En el mensaje también se envía una lista de posibles BS en las que realizar el barrido
      - En un periodo se pueden detectar y sincronizar varias BS
  - La BS almacena los datos dirigidos a la MS mientras ésta realiza los barridos
  - La BS antigua puede negociar con la BS nueva una oportunidad de ranging inicial unicast para la MS que ha de realizar el traspaso

## Mobile Wimax - Traspaso

- Proceso de asociación durante el barrido (opcional)
  - Se prepara para un futuro traspaso
  - La MS adquiere parámetros de ranging y de disponibilidades de servicio de la posible nueva BS
  - 3 niveles de asociación:
    - Nivel 0: asociación sin coordinación
      - La nueva BS no tiene conocimiento de la MS
      - La MS utilizará mecanismo de contienda para el inicial ranging
    - Nivel 1: asociación con coordinación
      - La nueva BS reserva espacio para inicial ranging de la MS en coordinación con la antigua BS
    - Nivel 2: asociación asistida por la red
      - Igual al anterior pero la MS no espera recibir respuesta del ranging, las BS que reciben la solicitud envían la información a la BS antigua quien coordinará el traspaso

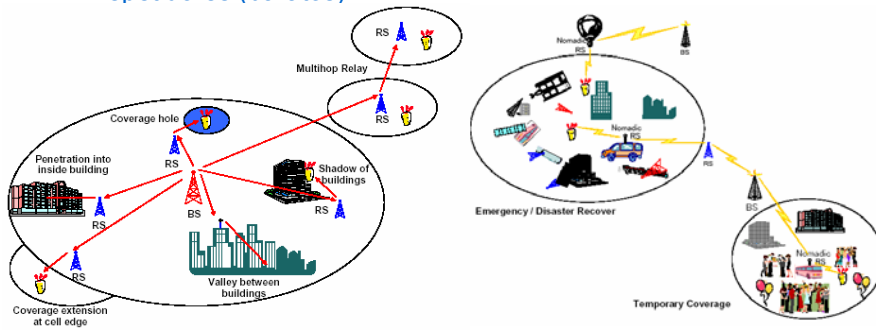
## Mobile WiMAX - Ahorro de energía

- Active Mode: modo normal
- Sleep Mode
  - La MS negocia periodos de absentismo con la BS
  - La BS almacena los datos de la MS
  - Durante uno de estos periodos se puede aprovechar para realizar barridos de traspaso
- Idle Mode
  - Enfocada a cuando la MS se mueve rápidamente, no realiza traspasos
  - La MS esta activa periódicamente para recibir datos broadcast de las BS
  - La MS no está registrada a ninguna BS
  - Se agrupan las BS en grupos de paging para localizar a la MS en caso de tener que recibir datos
  - Mensajes de paging y de localización

# Multihop Relay Specification (802.16j)

# Multi-hop relay networks

- Redes de repetidores funcionando en modo mesh
  - Aumento de cobertura
  - Incremento de ancho de banda
  - Sistema económico ya que existen pocas BS (caras) y muchos repetidores (baratos)



## 802.16j Mobile Multi-hop Relay (MMR)

- Se prevén 3 tipos de repetidores (RS):
  - Fijos
  - Nómadas (eventos especiales, interiores):
    - Repetidores fijos durante un tiempo, comparable a una sesión de usuario
  - Móviles (trenes, autobuses):
    - Instalados en vehículos en movimiento
- También se prevé que las MS actúen como repetidores

## 802.16j cuestiones técnicas

- Control centralizado y distribuido: ciertas tareas las realizarán los repetidores y otras las BS
- Scheduling
- Asignación frecuencial y control de los recursos radio
- Control de potencia
- Control de admisión de tráfico y políticas de conformado de tráfico
- QoS: Balanceo de carga global en la red, control de congestión
- Seguridad

## Aspectos regulatorios

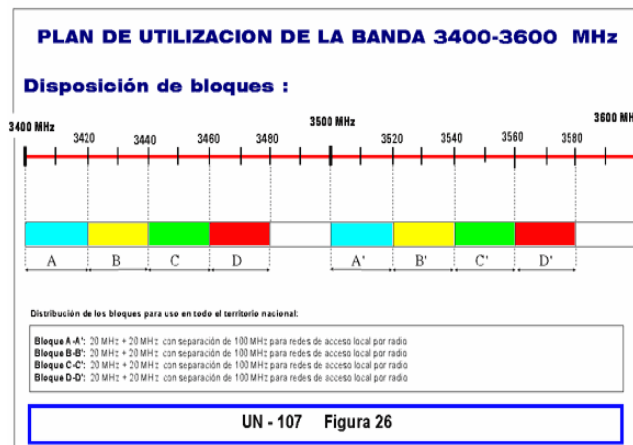
## Regulación del espectro radio

- Banda de uso común: No significa que no esté regulada, sólo que todo el mundo tiene derecho a emitir en esa frecuencia
  - El derecho a emitir no da derecho a proveer de servicios a terceros, en este caso se requiere licencia de operador
  - Existen límites de potencia radiada y compromiso de coexistencia entre sistemas
  - No se puede pedir protección frente a interferencias de otros sistemas:
    - Radar, radionavegación, satélites
- La regulación depende de cada gobierno

## Regulación del espectro radio (España)

- UN-107: 3400 – 3600 MHz
  - Sistemas de acceso radioeléctrico punto – multipunto
    - WLL, LMDS, WiMAX
  - NO es una banda de uso común
  - 4 bloques de 20 MHz FDD separados 100 MHz
  - Dependiendo de las zonas geográficas:
    - Bandas 3485-3495 MHz y 3585-3595 MHz de titularidad estatal destinadas a radiolocalización
    - Bandas 3480-3485 MHz, 3495-3500 MHz, 3580-3585 MHz y 3595-3600 MHz junto con las anteriores pueden dedicarse a acceso punto-multipunto para cumplir las obligaciones de servicio público

## Regulación del espectro radio (España)



## Aspectos de salud

- Organizaciones relevantes:
  - Organización Mundial de la Salud (OMS)
    - Programa internacional de investigación para buscar evidencias de salud de efectos de campos electromagnéticos para frecuencias menores a 300 GHz
    - Electromagnetic fields: <http://www.who.int/peh-emf/en/>
  - COST281
    - Potential Health Implications from Mobile Communication Systems
    - Aspectos de salud de los sistemas de comunicaciones móviles
  - Unión Europea
    - Recomendación sobre restricciones a la exposición de seres humanos a las radiaciones por debajo de los 300 GHz

## Aspectos de salud

- Normativa Europea
  - Parámetro SAR: Specific energy absorption rate (W/Kg)
    - Potencia absorbida por unidad de masa de tejido corporal
  - Para frecuencias entre 10 MHz y 10 GHz
    - SAR en todo el cuerpo  $\leq 0.08$  W/Kg.
    - SAR localizado en porciones contiguas menores de 10 gr.:
      - Cabeza y tronco  $\leq 2$  W/Kg = 20 mW en 10 gr. de masa
      - Extremidades  $\leq 4$  W/Kg
  - Para frecuencias superiores a 10 GHz
    - Los campos electromagnéticos penetran poco en el cuerpo humano
  - Densidad de potencia por unidad de superficie corporal expuesta para no sobrepasar el SAR:
    - $f(\text{MHz})/200$  W/m<sup>2</sup> entre 400 MHz y 2 GHz
    - 10 W/m<sup>2</sup> entre 2 GHz y 300 GHz

## Aspectos de salud

- PIRE de 3 W (35 dBm): Límite de la Unión Europea para sistemas TDMA Punto a Multipunto operando entre 3 y 11 GHz.
  - Fórmula aproximada para calcular la densidad de potencia incidente en el cuerpo

$$S = \frac{PIRE}{4\pi d^2} \left[ W / m^2 \right]$$

- PIRE radiada por la antena en la dirección expuesta
- d: distancia entre la antena y la persona expuesta
- Ej: para una PIRE = 3 W y  $S \leq 4.5 W/m^2 \rightarrow d \geq 23 \text{ cm}$
- Cuidado:  $P_{tx} = 1 \text{ W} = 30 \text{ dBm}$ , y antena directiva de 15 dB
- PIRE = 45 dBm

## Equipos y productos



## Estado Actual - Productos WIMAX

- Diseño de chips como el Rosedale de Intel, el 7955 de Airspan o el TCW 1620 de Telecis

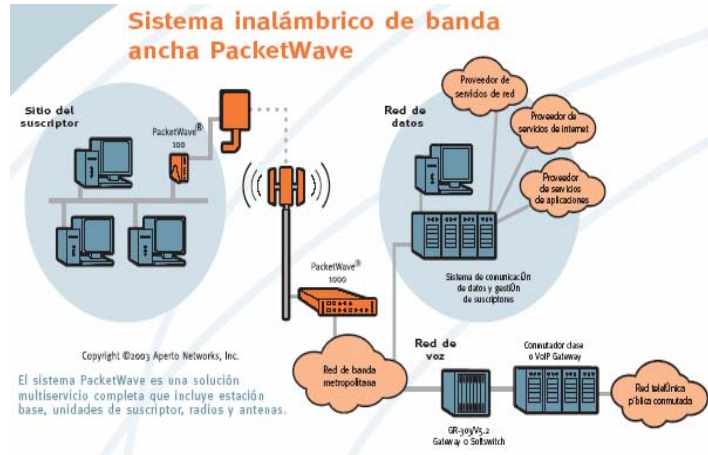


- Cuatro productos básicos en la infraestructura de un sistema WIMAX.
  - Estaciones Base.
  - Estaciones Suscriptoras.
  - Backhaul, los equipos que hacen de enlace de transmisión entre células y el centro de conmutación del operador del sistema.
  - Antenas.

## Estado Actual – Fabricantes

- Alvarion: BreezeMAX (3.5 GHz)
- Aperto Networks: Packet Wave (3.5 y 5.8 GHz)
- Redline Communications:
  - Estaciones base: PTP y PMP
- Wi-Lan: LibraMX
  - Tecnología propietaria y WiMAX
- Airspan:
  - AS-MAX
  - Backhaul: Primemax

## Estado Actual - Productos WIMAX



Redes inalámbricas

275 / 416

## Estado Actual - Productos WIMAX

- ESTACIÓN BASE PacketWave® 1000 (Aperto Networks)



### Operación

Velocidad de datos de 20 Mbps, tasa de transmisión de datos neta de 14 Mbps

Bandas de frecuencia admitidas (usando radios y antenas de Aperto Networks):

2.5-2.689 GHz  
3.4-3.7 GHz  
5.725-5.925 GHz

Modo de duplexaje: opción TDD y FDD

Modulación: QPSK y 16QAM

Corrección de error:

Reed Solomon FEC con longitud de bloqueo y factor de corrección variables  
Arquitectura con capa MAC avanzada



### Dimensiones y peso

Ancho: 16,5 pulgadas (41,9 cm);

Altura: 5,25 pulgadas (13,3 cm);

Profundidad: 18 pulgadas (45,7 cm);

Montaje: bastidor estándar de 19 pulgadas

Peso: 38 lb (17 kg)

### Redes

Protocolos: Enrutamiento IP RIPv2, VLSM, CIDR, DHCP

(cliente y agente de red), VLAN, Puente, PPPoE

Clases de servicios: CBR, CIR, BE

### Seguridad

Niveles múltiples de protección de contraseña

Decodificación de señales inalámbricas

Encriptación DES: 56, 112, 168 bits (en el futuro)

Rec

## Estado Actual - Productos WIMAX

- ESTACIÓN SUSCRIPTORA PacketWave® Serie 100 (Aperto Network)



Las unidades de suscriptor de la serie PacketWave son bridas sencillas de múltiples megahertz y acceden a Internet "siempre activo" a las suscripciones.

Modelos

	PW110	PW120	PW130
Cantidad de hosts	5	20	250
Redes	Bridge	NAT/Bridge	Router/NAT/Bridge
Cantidad de flujos de servicio y VLAN	8	8	16
Ciudadanos DHCP admitidos con servidor incorporado	N/A	20	100

Redes inalámbricas



### Módem

Modulación: QPSK, 16QAM

### Dimensiones y peso

Ancho: 1.5 pulgadas (3.8 cm);  
 Altura: 6.6 pulgadas (16.8 cm);  
 Profundidad: 9.1 pulgadas (23.1 cm);  
 Peso: 2.2 lb (1.0 kg)

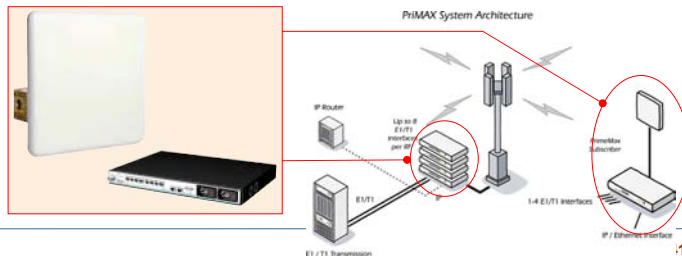
### Redes

#### (funcionalidades)

Puente, 802.1Q VLAN  
 Servidor y cliente DHCP  
 NAT  
 Enrutamiento IP  
 Seguridad  
 Encriptación DES: 56, 112, 168 bits (en el futuro)

## Estado Actual - Productos WIMAX

- BACKHAUL PRIMEMAX (AIRSPAN)
  - Velocidad de Datos. Más de 50 Mbps
  - Implementación de Radio:
    - Modulaciones soportadas BPSK/QPSK/16QAM/64QAM.
    - Half duplex y TDD.
  - Seguridad: Características Hardware:
    - AES/DES/3DES
    - 100/Gigabit Ethernet



Redes inalámbricas

## Estado Actual - Productos WIMAX

- ANTENAS Radio PacketWave® (Aperto Network)



**Antena 2.5 GHz**

Parámetros generales

Rango de frecuencia: 2.500-2.686 GHz  
 Modulación: QPSK y 16 QAM  
 Anchos de canal: 1-6 MHz en incrementos de 1 MHz  
 Duplexaje: TDD  
 Alcance estándar: hasta 11.6 millas/18.7 kilómetros  
 Alcance extendido: hasta 26 millas/42 kilómetros con antena de abonado externa



**Antena 3.5 GHz**

Parámetros generales

Rango de frecuencia: 3.4-3.7 GHz  
 Modulación: QPSK y 16 QAM  
 Anchos de canal: (según ETSI) 1.75, 3.5 y 7.0 MHz (sin ETSI) 1-6 MHz en incrementos de 1 MHz  
 Duplexaje: TDD y opción FDD  
 Alcance estándar: hasta 10.5 millas/16.9 kilómetros  
 Alcance extendido: hasta 23 millas/37 kilómetros con antena de abonado externa



**Antena 5.8 GHz**

Parámetros generales

Rango de frecuencia: 5.725-5.925 GHz  
 Modulación: QPSK y 16 QAM  
 Anchos de canal: 2-6 MHz en incrementos de 1 MHz  
 Duplexaje: TDD  
 Alcance estándar: hasta 8.2 millas/13.2 kilómetros  
 Alcance extendido: hasta 13 millas/20.8 kilómetros con antena de abonado externa

Redes in:

## Antenas de recepción





## Antenas de recepción



## Antenas de transmisión



## Comparativa del WiMAX con otros sistemas

## WiMAX vs xDSL

Características	xDSL	WiMAX
Medio	Medio Dedicado	Medio Compartido
Cobertura máx. típica (Km)	5 (ADSL) / 7 (SHDSL)	35 (LOS), 5 (NLOS)
Arquitectura	Central – DSLAM Suscriptor – xDSL NT PTP	Central – BS Suscriptor – SS PTP, PMP, Topología mallada
Bit Rate Máx. (Mbps)	ADSL bajada – 8 ADSL subida – 0.8	BS – 70 (14 MHz), 100 (20 MHz) SS – Sin limite hasta la capacidad de la BS, valor medio es de 4
Roaming	No	Sí
QoS	QoS nivel ATM	Soporte Nativo de QoS en MAC
Escalabilidad	Alguna limitación debido al crosstalk	Limitación por interferencias co-canal

## WiMAX vs WiFi

	WiFi	WiMAX
<b>Medio</b>	Medio Compartido	Medio Compartido
<b>Cobertura máx. típica</b>	Inferior a 100 m	35 Km (LOS), 5 Km NLOS)
<b>Optimización</b>	Interiores o distancias cortas	Habrà equipos para todas las situaciones
<b>Escalabilidad</b>	Usuarios: varias decenas Limitación por interferencias co-canal	Usuarios: varios cientos Limitación por interferencias co-canal
<b>Eficiencia espectral máx.</b>	2,7 bps/Hz 54 Mbps en 20 MHz	5 bps/Hz 100 Mbps en 20 MHz
<b>QoS</b>	802.11e no tan potente como el WiMAX	Soporte Nativo de QoS en la capa MAC

## WiMAX vs 3G

	EDGE/EGPRS	UMTS	HSDPA	WiMAX
<b>Cobertura máx. típica</b>	30	5	2 (a distancias largas se obtienen vel = UMTS)	35 Km (LOS), 5 Km NLOS)
<b>Vel. de pico de datos (Mbps)</b>	0.473	2	14	70 (14 MHz), 100 (20 MHz) Adaptativo
<b>Vel. promedio usuario (Mbps)</b>	< 0.130	< 0.384	< 0.750 (inicialmente)	4
<b>BW canal</b>	200 KHz	5 MHz	5 MHz	escalable

## IEEE 802.15.1 – Bluetooth



- Modelos de uso
- Arquitectura de protocolos
- Gestión del enlace
- Perfiles

## Bluetooth

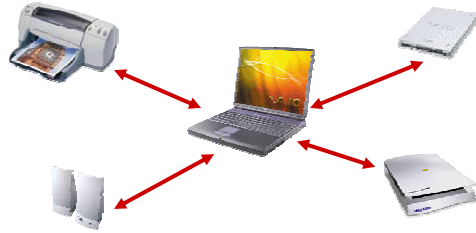
- Supresión de cables
- PAN (Personal Area Networks)
- Facilidad de conexión
  - Una alternativa al IrDa



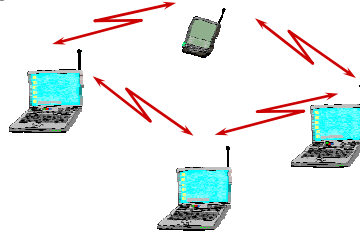


## Modelos de uso

- Ordenador sin cables

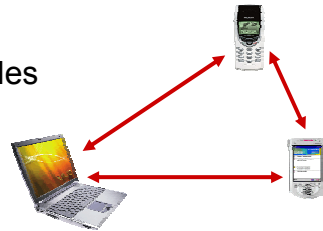


- Redes personales ad-hoc



## Modelos de uso

- Conexiones de voz y datos sin cables

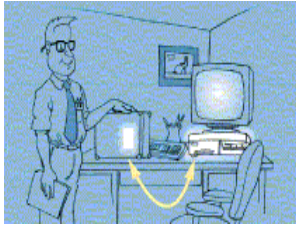


- Terminal avanzado

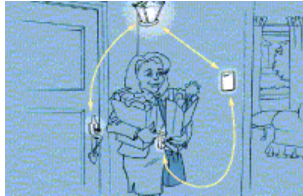


## Modelos de uso

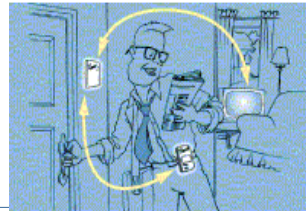
- Sincronización automática



En la oficina



En casa



## Bluetooth

- Alcance y potencia

Clase de potencia	Max. Potencia	Rango
Clase 1	100 mW	+ 100 metros
Clase 2	2.5 mW	10 metros
Clase 3	1 mW	1 metro

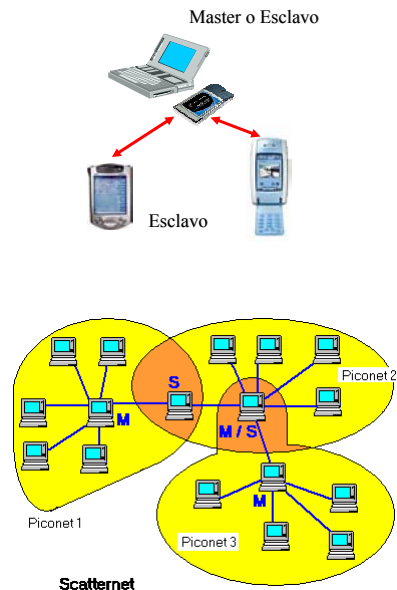
- Se pueden comunicar hasta 8 dispositivos en una pequeña red llamada piconet
- Hasta 10 piconets pueden co-existir en el mismo lugar

## Bluetooth

- Velocidad nominal
  - Velocidad en símbolos: 1 Msps
  - Velocidad de datos: Basic Rate (versión 1.2): 1 Mbps
  - Velocidad de datos: Enhanced Data Rate (versión 2.0 + EDR): 2 ó 3 Mbps
- Corrección de errores
  - FEC
  - ARQ
    - No se puede asegurar cual será la velocidad del canal, depende de las retransmisiones que deban hacerse

## Bluetooth

- Organización
  - Master: determina
    - Canal: secuencia de frec. Hopping
    - Sincronización
  - Slave
- Piconet
  - Un master y hasta 7 esclavos
- Scatternet: solapamiento que se produce cuando un dispositivo de una piconet es también parte de otra piconet, como esclavo o cliente



## Tipos de conexiones

- Asíncronas: no orientadas a conexión (ACL - Asynchronous Connection-less Link )
  - Enlace momentáneo
  - No se reservan slots
  - Son conexiones punto-multipunto entre un master y todos sus esclavos
  - Un esclavo únicamente puede transmitir si es preguntado por el master en el slot anterior, iniciado por el master
  - No se reservan slots
  - Solamente en slots no reservados por las conexiones síncronas
  - Enlaces simétricos o asimétricos

## Tipos de conexiones

- Síncronas: orientadas a conexión, para conexiones de voz (SCO - Synchronous Connection-Oriented)
  - Enlaces punto a punto simétricos (maestro – esclavo)
  - Establecidas de forma permanente hasta que algún extremo decide finalizar
  - Se reservan slots para la conexión, adecuadas para tráfico en tiempo real
  - Ancho de banda fijo entre un master y un esclavo
  - Slots espaciados en intervalos regulares
  - Hasta 3 SCO por master
  - En las conexiones SCO los paquetes nunca se retransmiten
  - Codificaciones
    - PCM ley  $\mu$  y ley A (64 Kbps)
    - CVSD (Continuos Variable Slope Delta)

## Velocidades máximas de paquete

- Conexiones asíncronas: Datos

- x-DMy
  - x: 1, 2, 3 Mbps
  - FEC
  - y-slot
- x-DHy
  - x: 1, 2, 3 Mbps
  - Unprotected
  - y-slot
- AUX:
  - Igual DH pero sin CRC

Type	Payload Header (bytes)	User Payload (bytes)	FEC	CRC	Symmetric Max. Rate (kb/s)	Asymmetric Max. Rate (kb/s)	
						Forward	Reverse
DM1	1	0-17	2/3	yes	108.8	108.8	108.8
DH1	1	0-27	no	yes	172.8	172.8	172.8
DM3	2	0-121	2/3	yes	258.1	387.2	54.4
DH3	2	0-183	no	yes	390.4	585.6	86.4
DM5	2	0-224	2/3	yes	286.7	477.8	36.3
DH5	2	0-339	no	yes	433.9	723.2	57.6
AUX1	1	0-29	no	no	185.6	185.6	185.6
2-DH1	2	0-54	no	yes	345.6	345.6	345.6
2-DH3	2	0-367	no	yes	782.9	1174.4	172.8
2-DH5	2	0-679	no	yes	869.7	1448.5	115.2
3-DH1	2	0-83	no	yes	531.2	531.2	531.2
3-DH3	2	0-552	no	yes	1177.6	1766.4	235.6
3-DH5	2	0-1021	no	yes	1306.9	2178.1	177.1

Table 6.9: ACL packets

## Velocidades máximas de paquete

- Conexiones síncronas

- HV:
  - No retransm.
  - No CRC
- DV (combinado):
  - Datos aplicac.
    - CRC
    - Retransm.
  - Datos voz
    - No CRC
    - No retrans.
- EV:
  - CRC y retransmisión

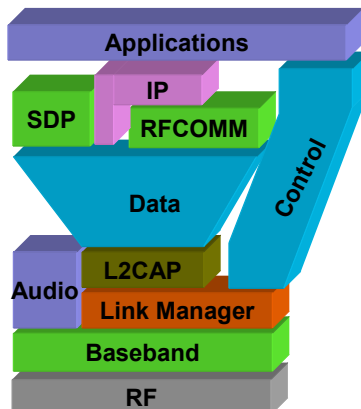
Type	Payload Header (bytes)	User Payload (bytes)	FEC	CRC	Symmetric Max. Rate (kb/s)
HV1	na	10	1/3	no	64.0
HV2	na	20	2/3	no	64.0
HV3	na	30	no	no	64.0
DV <sup>1</sup>	1 D	10+(0-9) D	2/3 D	yes D	64.0+57.6 D
EV3	na	1-30	No	Yes	96
EV4	na	1-120	2/3	Yes	192
EV5	na	1-180	No	Yes	288
2-EV3	na	1-60	No	Yes	192
2-EV5	na	1-360	No	Yes	576
3-EV3	na	1-90	No	Yes	288
3-EV5	na	1-540	No	Yes	864

Table 6.10: Synchronous packets

## Especificaciones

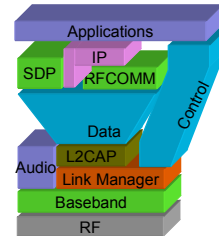
Tipo de conexión	Spread Spectrum (Frequency Hopping)
Esquema MAC	FH-CDMA (1600 ó 3200 hops per sec)
Espectro	2.4 GHz ISM; 79 frecuencias de 1 MHz 2.402 GHz - 2.480 GHz
Modulación	Gaussian Frequency Shift Keying
Velocidad de transmisión	1, 2 ó 3 Mbps
Sensibilidad	-70 dBm
Número de terminales por red	8 dispositivos
Canales de voz	3
Clave de autenticación	Clave de 128 bits
Clave de encriptación	8 -128 bits (configurable)

## Arquitectura del sistema Bluetooth



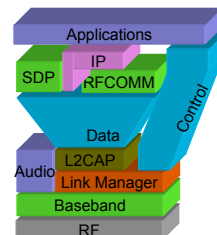
## Grupo de protocolos de transporte

- Permiten a los dispositivos de Bluetooth localizarse entre ellos, crear, configurar y gestionar enlaces físicos y lógicos, permitiendo a las aplicaciones disponer de estos canales
- Radiofrecuencia (RF):
  - Envía y recibe flujos de bits
  - Frequency hopping,
  - Modulación, potencia de transmisión
- Bandabase:
  - Define el sincronismo y el entramado
  - Control de flujo del enlace



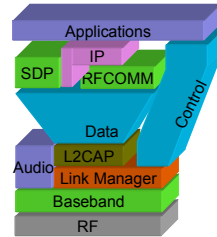
## Grupo de protocolos de transporte

- Link Manager:
  - Gestiona los estados de la conexión
  - Fuerza fairness entre esclavos
  - Gestión de la energía
- Logical Link Control and Adaptation Protocol (L2CAP)
  - Gestiona la multiplexación de los protocolos de niveles superiores
  - Segmenta y reensambla paquetes grandes
  - Descubre dispositivos y realiza calidad de servicio (QoS)



## Grupo de protocolos Middleware

- RFCOMM:
  - Emulación de un puerto serie inalámbrico
  - Utilizado para conexiones de red, interoperabilidad con IrDA y telefonía
- Service Discovery Protocol (SDP):
  - Descubrimiento de servicios
  - Localización de servicios por clase (impresoras) y atributos (láser a color)
  - Se debe establecer la conexión para intercambiar la información SDP con el otro elemento
  - Resulta un proceso lento



## Perfiles Bluetooth

- Los perfiles surgen de los casos de uso
- Según la utilización del dispositivo, no debe implementarse todo el estándar, sólo aquellos elementos que son necesarios.
- Perfiles:
  - Hands free profile
  - Headset profile
  - Personal Area Networking profile
  - Serial Port profile
  - Video Distribution profile
  - Basic Printing profile
  - Cordless Telephony profile



## Banda base

- 1 slot = 0.625 ms
- Paquetes de 1, 3 o 5 slots
- Tráfico SCO y ACL en una piconet

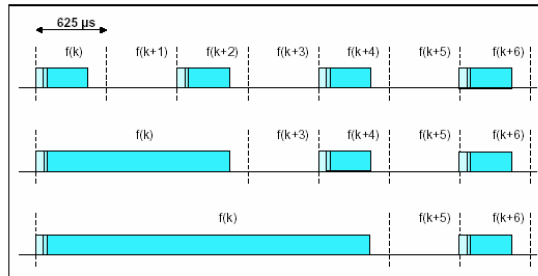
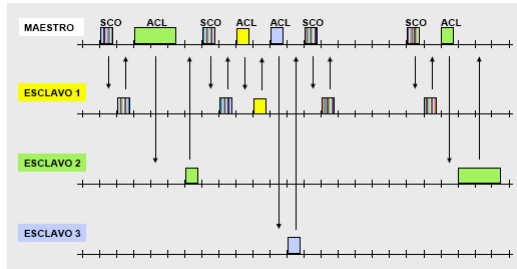


Figure 2.14: Single- and multi-slot packets.



## Banda base

- Durante la transmisión de un paquete la frecuencia no varía.
  - Los paquetes multi-slot pueden sufrir de mayor interferencia
- La secuencia de frequency hopping viene determinada por el Master según algoritmo en base a:
  - La dirección MAC
  - El reloj

## Formato del paquete

- Basic Rate

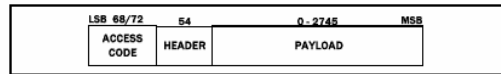


Figure 6.1: General Basic Rate packet format.

- Enhanced Data Rate

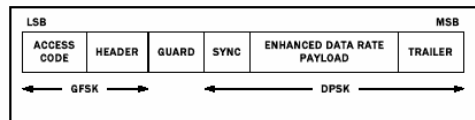


Figure 6.2: General enhanced data rate packet format.

## Formato del paquete

- Access Code
  - Sincronización, identificación
  - Paging, Inquiry, Park
  - Todos los paquetes de un mismo canal tienen el mismo código de acceso
  - Tipos:
    - Channel Access Code (CAC): identifica una piconet
    - Device Access Code (DAC): utilizado para procedimientos de señalización como en el paging
    - Inquiry Access Code (IAC): utilizado en el procedimiento de inquiry

## Formato del paquete

- Header:

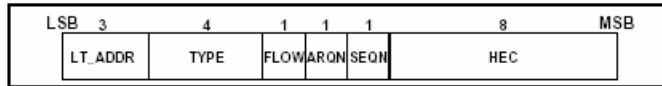


Figure 6.8: Header format.

- LT\_ADDRESS: dirección de nivel de transporte
  - Dispositivo esclavo destino o origen
- TYPE: tipo de paquete
- FLOW: Control de flujo
- ARQN: Reconocimiento del paquete anterior
- SEQN: Número de secuencia (0 y 1 alternados)
- HEC: Header Error Check

## Formato del paquete

- Payload:

- Dos campos: depende del tipo de paquete puede tener 1 o 2 campos
  - Campo de datos síncronos
    - Solamente contiene datos
  - Campo de datos asíncronos
    - Contiene datos y cabecera de datos

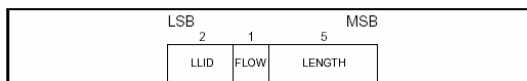


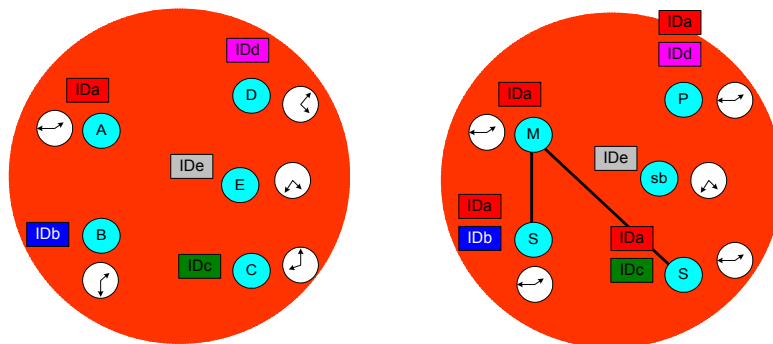
Figure 6.12: Payload header format for Basic Rate single-slot ACL packets.

- » Logical Link Identification: para fragmentación L2CAP
- » Bit de control de flujo
- » Longitud de los datos

## Red Piconet

- Una secuencia de frequency hopping define una piconet
- Todos los dispositivos de la piconet saltan juntos
  - Cuando el maestro forma una piconet entrega a sus esclavos el reloj y el identificador de dispositivo
    - La secuencia de salto viene determinada por el ID de dispositivo (48 bits)
    - La fase de la secuencia de salto viene determinada por el reloj
- Los dispositivos que no forman la piconet están en standby
- Direcciones de la piconet:
  - Active Member Address (AMA, 3-bits)
  - Parked Member Address (PMA, 8-bits)

## Red Piconet



## Máquina de estados de la conexión

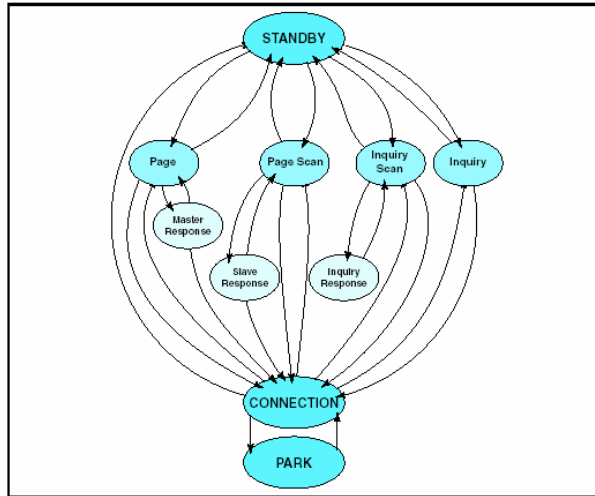


Figure 8.1: State diagram of link controller.

## Máquina de estados de la conexión

- Standby:
  - Estado por defecto de un dispositivo Bluetooth
  - Funciona con su propio reloj y en modo bajo consumo
- Connected:
  - El dispositivo forma parte de una piconet
    - Tiene un estado de activo y tres estados de ahorro de energía

## Máquina de estados de la conexión

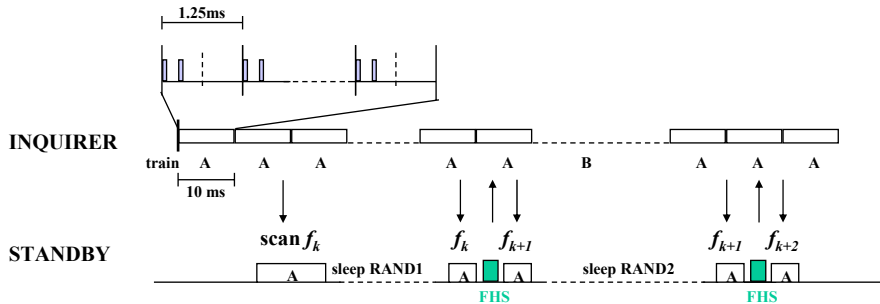
- Inquiry:
  - Un dispositivo que quiere descubrir vecinos envía paquetes inquiry
  - Se envía el mensaje de Inquiry en 32 frecuencias
- Inquiry scan:
  - Un dispositivo que quiere ser descubierto entra en este modo de forma periódica y escucha si recibe paquetes inquiry
- Inquiry response:
  - Cuando se ha recibido un paquete inquiry estando en el estado de inquiry scan se envía un paquete de respuesta con el identificador de dispositivo, después de un número aleatorio de slots para evitar colisiones

## Procedimiento de Inquiry

- El maestro y los esclavos están desincronizados
  - No saben a que frecuencia transmite el otro ni cuando
- Se definen 32 frecuencias de inquiry donde se van repitiendo las transmisiones (maestro) y las escuchas (esclavos)
  - El maestro transmite un mensaje a  $f_i$  y otro a  $f_i+1$  en un slot ( $625 \mu s$ )
  - En el siguiente escucha si hay respuesta
  - En el otro tx a  $f_i+2$  y  $f_i+3$
  - Así sucesivamente, repite toda la secuencia cada 10 ms
    - $(32/2 * 625 \mu s)$
  - El esclavo escucha una frecuencia y cambia cada 1.28 s.
    - Cuando detecta la solicitud responde con un mensaje FHS

## Procedimiento de Inquiry

- Para no colisionar, un esclavo después de recibir un Inquiry espera un número aleatorio de slots, despierta y contesta en el siguiente mensaje de inquiry que oiga



## Máquina de estados de la conexión

- Page:
  - El dispositivo invita a otro a formar parte en una piconet
  - El maestro será quien invite
  - El maestro con la información de reloj del esclavo determina a que frecuencia estará escuchando y envía un mensaje de page.
- Page scan:
  - El esclavo escucha para recibir paquetes de invitación
  - Se puede entrar en este estado desde un estado de inquiry o de standby
- Page response:
  - Cuando se recibe un mensaje de page, el esclavo envía una respuesta con su identificador y su dirección, a la frecuencia del siguiente slot del que se ha recibido el page.

## Máquina de estados de la conexión

- Sniff Mode:
  - Estado de bajo consumo donde se reduce la actividad de escucha
  - Se escucha sólo en determinados intervalos de tiempo
- Hold Mode:
  - El esclavo no soporta temporalmente paquetes ACL (asíncronos) sólo SCO
  - Con ello se puede dedicar a escanear o realizar funciones de paging, inquiring o atender a otra piconet
- Park Mode:
  - Estado de muy baja actividad
  - Se le envían mensajes a través de broadcast

## Bluetooth

- Tiempos de conexión
  - Descubrimiento de dispositivos. Inquiry
  - Establecimiento de la conexión. Paging

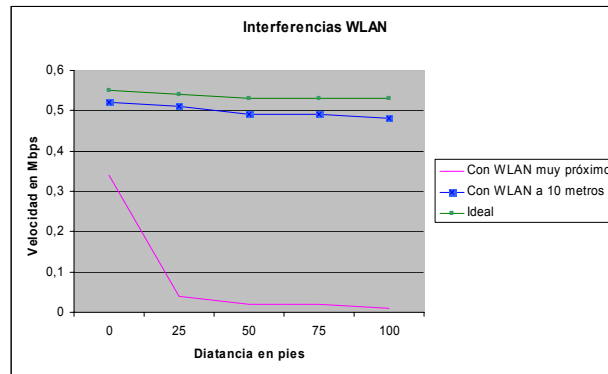
Operación	Tiempo mínimo (seg)	Tiempo medio (seg)	Tiempo máximo (seg)
Inquiry	0.00125	3 – 5	10.24 – 30.72
Paging	0.0025	1.28	2.56
Total	0.00375	4.28 – 6.28	12.8 – 33.28

- No se soportan respuestas rápidas



# Bluetooth

- Interferencias
  - Sensible a WLAN (IEEE802.11)

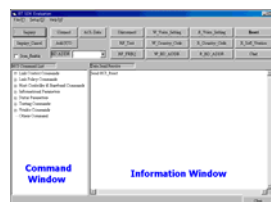


# Bluetooth

## Dispositivos



## Equipos de desarrollo

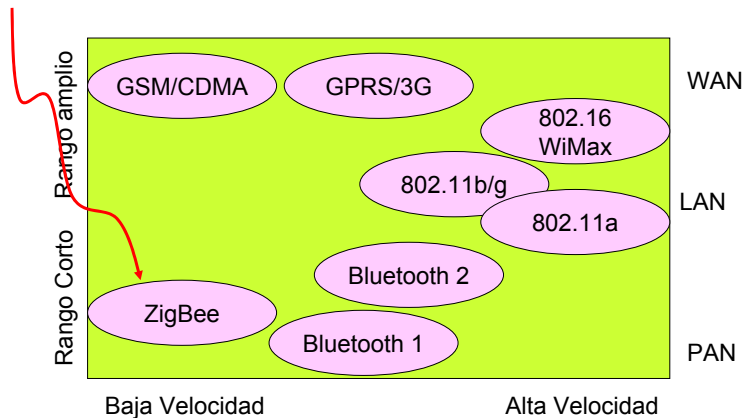


## IEEE 802.15.4 – ZigBee

- Aplicaciones
- Características
- Arquitectura de protocolos

## Comparativa

Low Range WPAN (LR-WPAN)



## Zig-Bee

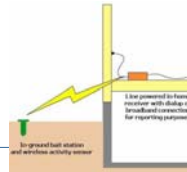
- Grupo formado por más de 150 compañías para promover, estandarizar, definir y certificar los protocolos que forman el ZigBee
  - [www.zigbee.org](http://www.zigbee.org)
- Soporta redes mesh de nodos 802.15.4
- Permite entrar y salir de la red de forma rápida (< 30 ms)
- Soporta descubrimiento de rutas y recuperación de caída de rutas
- Servicios:
  - Descubrimiento de dispositivos y servicios
  - Perfiles de dispositivos estandarizados

## 802.15.4 + Zig-Bee

- Objetivos
  - Muy bajo consumo
  - Baja complejidad
  - Bajo coste
  - Seguro: AES-128
  - Auto-configurable:
    - Permite redes ad hoc
    - Fácil instalación y configuración
- Hipótesis
  - Se transmite poco y con poca frecuencia
  - Se pueden tener ciclos de trabajo muy pequeños
  - Cabeceras de tamaño mínimas

## Aplicaciones

- Periféricos ordenador
  - Teclado, ratón, periféricos de juegos
- Dispositivos de electrónica de consumo
  - Controles remoto universales
- Domótica
  - Iluminación, sensores
- Monitorización médica
- Ejemplo comercial: detector de termitas



Redes inalámbricas

327 / 416

## Dispositivos

- Telos. Primer dispositivo IEEE802.15.4
- Requerimientos hardware
  - $\mu$ C de 8 bits, 80c51
  - Pila completa en < 32 KBytes
  - Nodo en < 4 KBytes
  - Controlador requiere memoria RAM < 8 KBytes



### Specifications

CPU	
Bus Speed	20 MHz
RAM	4 Kb
Program Space	60 Kb
External Flash	256 Kb
Serial Communications	DIO, SPI, I2C, UART
Current (active w/ Radio on)	19 mA
Current (sleep)	0.7 $\mu$ A
Voltage	1.8-3.6 V
Radio	
Frequency	2400-2483 MHz
Data rate	250 kbps
Output Power	-25 to 0 dBm
Antenna Gain	+3 dBi
Humidity Sensor	
Humidity Accuracy	3.5% RH
Temperature Accuracy	0.5 $^{\circ}$ C
Sampling Rate	90 Hz
Electromechanical	
Battery	AA, 2/3A, coin cell

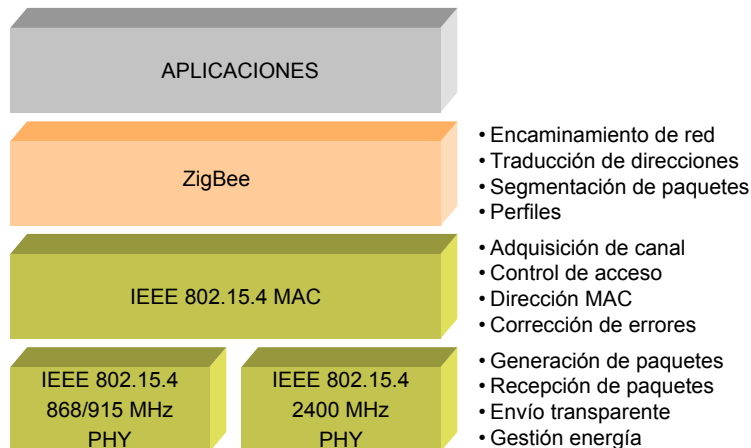
Redes inalámbricas

328 / 416

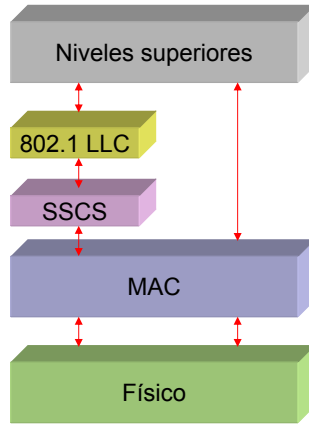
## Comparativa con otros sistemas

Sistema	GPRS/GSM	802.11g	Bluetooth 802.15.1	ZigBee 802.15.4
Aplicación	Voz y datos	Web, e-mail, video	Sustitución cable	Control y monitorización
Recursos	16MB+	1 MB+	250kB+	4kB-32kB
Batería (días)	1 - 7	0.5 - 5	1 - 7	100 - 1000+
Tamaño red	1	32	7	255/65000
Velocidad (Kbps)	64 -128+	54000+	3000	20 - 250
Alcance (metros)	1000+	1 - 100	1 - 10+	1 - 100+
Criterio éxito	Calidad, alcance	Velocidad, flexibilidad	Coste	Disponibilidad, potencia, coste

## Arquitectura de protocolos

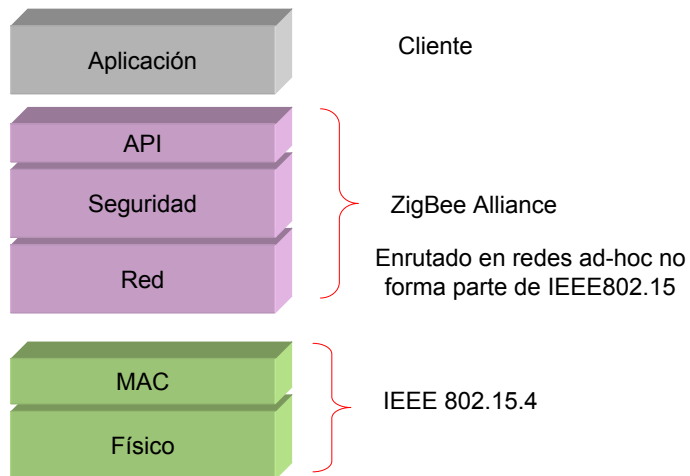


# Arquitectura IEEE802.15.4



SSCS Service Specific Convergence Sublayer

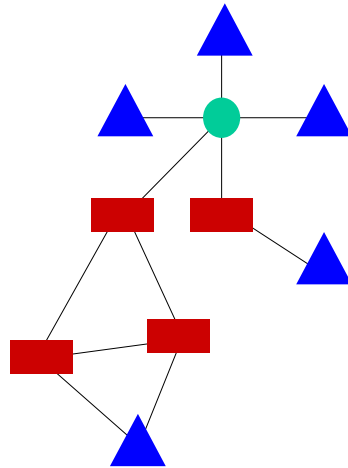
# Arquitectura ZigBee



## ZigBee – Tipos de nodos

- Diferentes tipos de nodos

- Controlador ●
  - PAN Coordinator
  - FFD
- Nodo ▲
  - RFD o FFD
- Router ■
  - FFD



## ZigBee – Tipos de nodos

- Full function device (FFD)
  - Cualquier topología
  - Posibilidad de ser coordinador de red
  - Puede comunicarse con cualquier otro dispositivo
- Reduced function device (RFD)
  - Limitado a topología en estrella
  - No puede ser coordinador de red
  - Puede comunicarse únicamente con el coordinador de red
  - Implementación muy sencilla
  - Sensores o actuadores



## ZigBee – Tipos de nodos

- ZigBee Coordinator (ZBC)
  - Es el “dueño” de la red y la crea
    - Nodo “0”
  - Especifica el PAN ID: identificador de la red de 16 bits
  - Escoge el mejor canal radio
  - Escoge el modelo de seguridad de la red
  - Inicia el proceso de formación de la red utilizando los parámetros especificados
  - Permite a otros dispositivos que se asocien a ella
  - Distribuye la tabla de enlaces entre servicios y direcciones
  - Guarda mensajes de los nodos hasta que pueden entregarse
  - Normalmente está alimentado de la red eléctrica

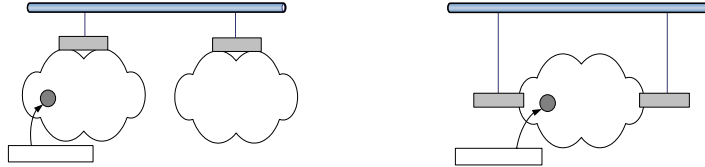
## ZigBee – Tipos de nodos

- ZigBee Routers (ZBR)
  - Encaminan mensajes
  - No inician ninguna red
    - Tienen que hacer un barrido para encontrar una red y asociarse
  - Tienen un bloque de direcciones para asignar
  - Normalmente alimentados por red eléctrica aunque depende de la topología



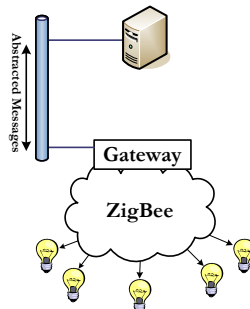
## ZigBee – Tipos de nodos

- ZigBee Extension Device (ZED)
  - Router ZigBee con una interfaz fija
  - Extiende la capa de red de ZigBee
  - Permite aumentar la cobertura de la red con cableado



## ZigBee – Tipos de nodos

- Gateways a redes ZigBee:
  - Permite conectar dos redes con diferentes protocolos
  - Permite a dispositivos no-ZigBee conectarse con dispositivos ZigBee sin conocer el protocolo



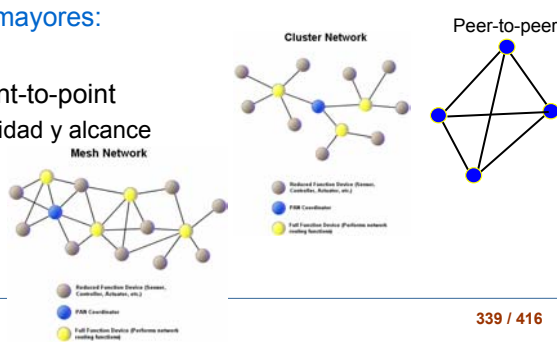
# ZigBee - Topologías

- Diversas configuraciones
  - Estrella
    - Comunicación entre el coordinador y los nodos
  - Peer-to-peer
    - Comunicación entre nodos, siempre que estén al alcance
  - Configuraciones mayores:
    - Cluster - Tree
    - Mallada – Point-to-point
      - Mejor fiabilidad y alcance

Star Topology Network

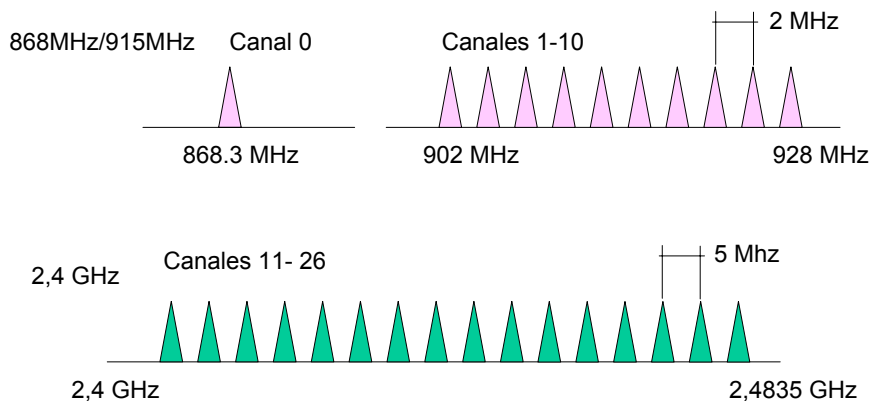


 Reduced Function Device (Sensors, Controllers, Actuators, etc.)  
 FIM Coordinator



# Rango de frecuencias

- Canales de uso



## Características de los canales

- Depende de la frecuencia

Frecuencia	Banda	Disponibilidad	Velocidad	Canales
2,4 GHz	ISM	Mundial	250 Kbps	16
915 MHz	ISM	América	40 Kbps	10
868 MHz		Europa	20 Kbps	1

## 802.15.4 – Nivel Físico

- Dos niveles
  - Todos ellos basados en DSSS
  - Potencia de 1 mW
  - Low-Band
    - BPSK
    - Sensibilidad de -92 dBm
  - High-Band
    - O-QPSK (Offset Quadrature PSK)
    - Canales de 5 MHz
    - Sensibilidad de -85 dBm

## 802.15.4 – Nivel Físico

- Preámbulo de 32 bits
  - Sincronismo de bit y de trama
  - Start: delimitador de inicio



- Facilidades para la selección dinámica de canal
  - Escaneo espectro
    - Se da información a los niveles superiores para una selección dinámica de canal.

## 802.15.4 – Nivel MAC

- Responsabilidades
  - Control de acceso al medio
  - Control de flujo y errores
    - ACKs
  - Sincronización
    - Beacons
  - Seguridad
  - Asociación y disociación

## 802.15.4 – Control de acceso al medio

- Dos posibilidades:
  - CAP (Contention Access Period): CSMA/CA (ranurado o no)
  - CFP (Contention Free Period): Beacon (opcional) y slots asignados
- Aplicaciones de baja latencia
  - Acceso asegurado: Reserva de slots (listados en el beacon)
  - Ineficiencia: Puede ser que no se usen los slots reservados
- Aplicaciones sin requerimientos de latencia
  - Acceso por contienda
    - Tráficos de coordinador de la PAN al FFN/RFN
    - Tráficos de FFN/RFN al coordinador de la PAN
    - Tráfico entre FFNs

## 802.15.4 – Nivel MAC

- Direccionamiento
  - Direcciones MAC de 64 bits
- Tipos de tramas
  - Datos
  - Control
  - ACK
  - Beacon

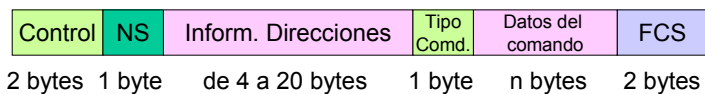
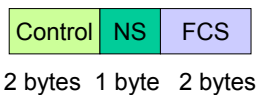
## 802.15.4 – Nivel MAC

- Trama datos
  - NS: Numero de secuencia para control de errores
  - Información de direcciones: 20 bytes
    - 2 identificador PAN origen
    - 8 bytes identificador dispositivo origen
    - 2 identificador PAN destino
    - 8 bytes identificador dispositivo destino



## 802.15.4 – Nivel MAC

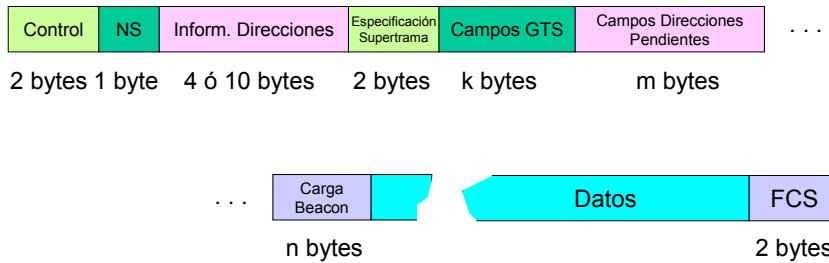
- Trama ACK:
  - Control y configuración de nodos remotos
  - Permite una gestión centralizada



## 802.15.4 – Nivel MAC

- Trama de Beacon

El coordinador guarda tramas para nodos de la red hasta que estos los requieren. En este campo se indica aquellos nodos con paquetes pendientes.



## 802.15.4 – Nivel MAC

- Supertrama: tiempo entre dos beacons
  - Duración básica de supertrama ( $SO=0$ ) = 960 símbolos = 16 slots
    - Normalmente tienen 16 slots (aNumSuperframeSlots)
    - 1 slot de supertrama básico ( $SO=0$ ) = 60 símbolos
  - Tiempo entre supertramas (beacons) de 15,36 ms a 245 s
- 1 unidad de backoff = 20 símbolos
- GTS Guaranteed Time Slots

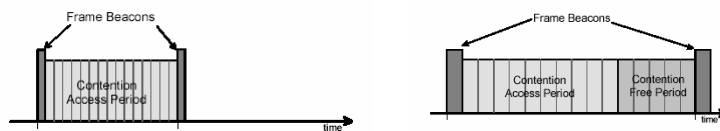
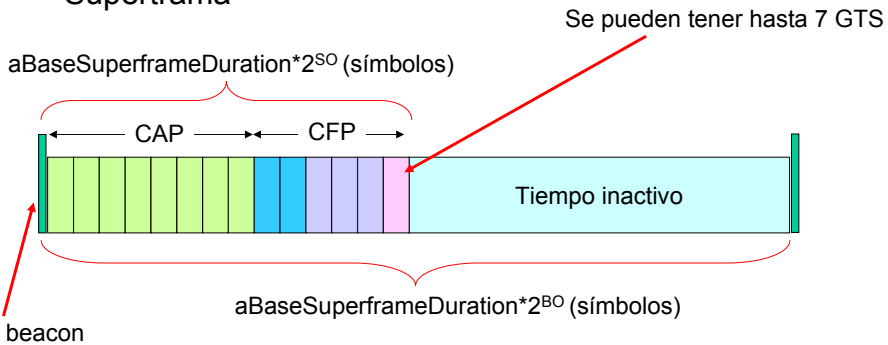


Figure 5—Superframe structure with GTS

## 802.15.4 – Nivel MAC

- Supertrama



$BO = macBeaconOrder$   
 $0 \leq BO \leq 14$

Decide la longitud de la supertrama

$SO = macSuperframeOrder$   
 $0 \leq SO \leq 14$

Decide la longitud de la parte activa

## 802.15.4 – Nivel MAC

- CSMA-CA

- IFS (Inter Frame Space): tiempo de guarda entre tramas para que los nodos puedan procesar los datos
  - No tiene nada que ver con el SIFS y el DIFS de 802.11
  - Tiempo de proceso entre tramas
    - SIFS Short IFS
    - LIFS Long IFS





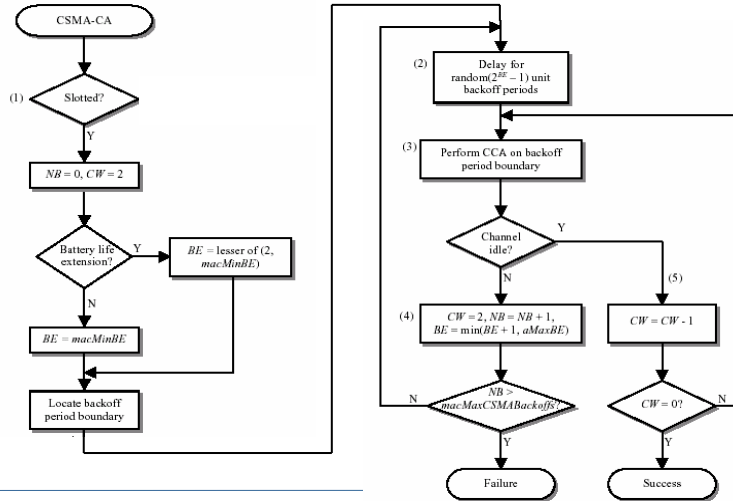
## 802.15.4 – Nivel MAC

- Uso de CSMA/CA
  - NB: Número de backoffs
    - Número de slots vacíos consecutivos antes de transmitir
    - Siempre igual a 2
  - BE: Exponente de backoff
    - Permite calcular un tiempo aleatorio de búsqueda antes de mirar el medio
    - Existe un modo de bajo consumo (Battery Life Extension) BE puede ser 2, 1 ó 0.
      - El nodo sólo compete en los primeros slots

## 802.15.4 – CSMA/CA

- Uso de CSMA/CA
  - El backoff debe empezar después de un beacon
  - Sólo se enviará una trama si cabe dentro de un CAP
    - Si no se empieza un nuevo backoff después del siguiente beacon

## 802.15.4 – CSMA/CA

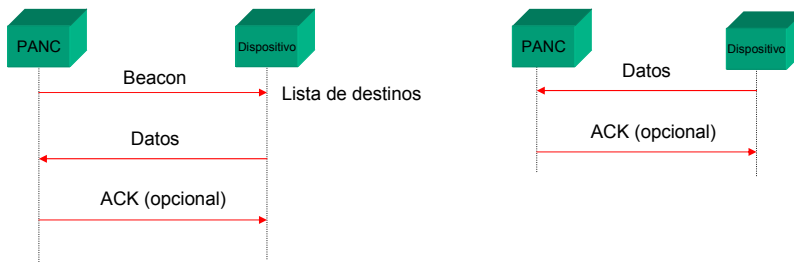


## 802.15.4 – Colisiones y errores

- En el campo de control se puede activar un bit para recibir reconocimiento (ACK) de los paquetes enviados
- Existe un temporizador de recepción de ACK
- Si no se recibe ACK, por colisión o por error se reenviará el paquete utilizando otra vez el mecanismo CSMA/CA
- Si después de varias retransmisiones no se recibe el ACK se descarta el paquete
- Si no se utiliza el ACK no se detectan colisiones ni errores a nivel MAC
  - La corrección la deberá realizar otro protocolo de nivel superior

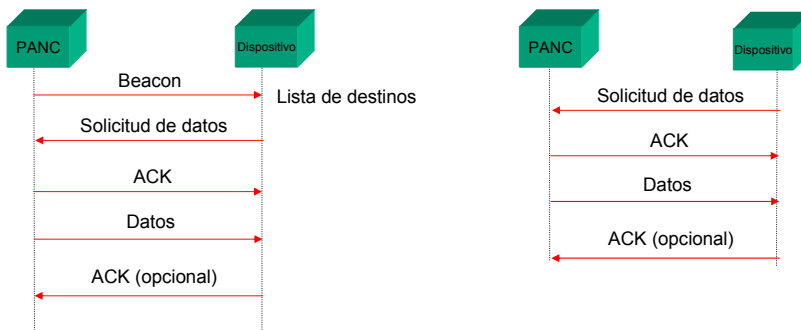
## 802.15.4 – Mecanismos de transmisión

- Mecanismo de transmisión de dispositivo a controlador
  - Con beacon
  - Sin beacon



## 802.15.4 – Mecanismos de transmisión

- Mecanismo de transmisión de controlador a dispositivo
  - Con beacon
  - Sin beacon

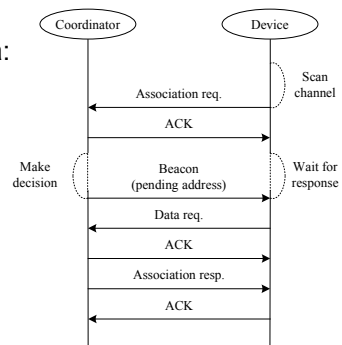


## 802.15.4 – Sincronización

- Escucha permanente del beacon
  - El resto del tiempo el dispositivo esta en reposo (bajo consumo)
  - Modo tracking
- Escucha antes de transmitir
  - Se activa la escucha para buscar el tracking del beacon
  - El resto del tiempo el dispositivo esta en reposo (bajo consumo)

## 802.15.4 – Asociación

- Un nodo debe pedir permiso al coordinador
- El resultado se anuncia de forma indirecta:
  - El coordinador, si acepta, añade la dirección larga del nodo solicitante en el beacon
- Los dispositivos acaban la confirmación con un data\_request
- El coordinador asigna la dirección corta (16 bits)
- Prestaciones
  - 30 ms para pasar a miembro de la red
  - 15 ms desde estado dormido a activo
  - 15 ms para acceso al canal



## 802.15.4 – Parámetros

Attribute	Value
CCA duration	8 symbol periods
PHY acknowledgement frame length	11 octets
PHY beacon frame length	23--100 octets
PHY data frame length	15--133 octets
<b>aBaseSlotDuration</b>	60 symbol periods
<b>aMaxBE</b>	5
<b>aMaxFrameRetries</b>	3
<b>aMaxSIFSFrameSize</b>	18 octets
<b>aMinCAPLength</b>	440 symbol periods
<b>aMinLIFSPeriod</b>	40 symbol periods
<b>aMinSIFSPeriod</b>	12 symbol periods
<b>aTurnaroundTime</b>	12 symbol periods
<b>aUnitBackoffPeriod</b>	20 symbol periods
<b>macAckWaitDuration</b>	120 or 54 symbol periods (channels 0 to 10 and 11 to 26, respectively)
<b>macBeaconOrder</b>	0-15 (default 15)
<b>macMaxCSMABackoffs</b>	0-5 (default 4)
<b>macMinBE</b>	0-3 (default 3)
<b>macSuperframeOrder</b>	0-15 (default 15)

## 802.15.4 – Prestaciones

- G. Lu, B. Krishnamachari, C. Raghavendra, "Performance evaluation of the IEEE 802.15.4 MAC for low-rate low-power wireless networks", 2004 IEEE International Conference on Performance, Computing, and Communications.
- **Rojo: 1 nodo (38 Kbps en lugar de 250 Kbps)**
- **Azul: 20 nodos**
- **Negro: 40 nodos**
- Las colisiones hacen inestable el sistema a partir de un cierto tráfico ofrecido

Throughput vs. Tráfico ofrecido

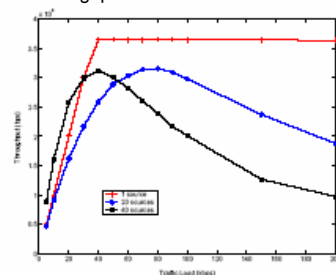


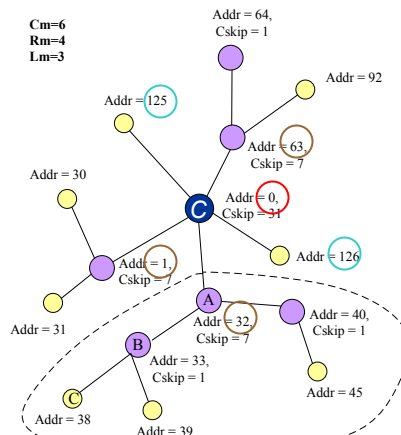
Figure 2: Throughput of CSMA-CA in beacon-enabled IEEE 802.15.4.

## ZigBee – Nivel de red

- Direccionalment
  - Cada dispositivo tiene una dirección MAC de 64 bits única
  - Cuando se asocia a una red se le asigna una dirección de red de 16 bits (65536 posibles nodos)
    - Cuando el dispositivo deja la red su dirección de red se puede asignar a otro dispositivo
  - Para encaminar paquetes dentro de la red se utilizan las direcciones de red
  - Dirección de broadcast de la red 0xFFFF
- Descubrimiento de dispositivos y servicios
  - Mensajes de control solicitando y respondiendo sobre dispositivos y servicios
  - La función de Binding asocia dispositivos a servicios

## ZigBee – Encaminamiento

- Las direcciones de red se asignan de forma ordenada que permite cierto encaminamiento
- En redes con topología en árbol se utiliza el encaminamiento por direcciones
  - Cada router sabe las direcciones que tiene por debajo y por arriba del árbol



## ZigBee – Encaminamiento

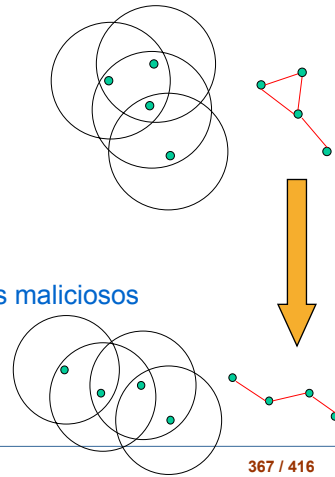
- En redes con topología mallada
  - 2 opciones
    - Encaminamiento en árbol: si los nodos routers y coordinador no tienen capacidad de encaminar
    - Encaminamiento reactivo: si los nodos routers y coordinador tienen capacidad de encaminar
  - Mecanismo de descubrimiento de rutas similar al protocolo AODV (Ad Hoc On-Demand Distance Vector Routing)
    - Se envían solicitudes de descubrimiento de camino en broadcast que se van transmitiendo hacia el destino, los nodos intermedios guardan el camino por donde pasa la solicitud
    - El destino escoge la solicitud con menor coste y responde al origen
    - Se escogen los enlaces con menor coste
    - El coste del enlace se define en base a la probabilidad de envío correcto de un paquete por ese enlace

## Nuevas redes donde aplicar estas tecnologías

- Redes ad hoc
- Redes mesh
- Redes de sensores

## Mobile Ad hoc NETWORKS (MANET)

- Redes normalmente temporales
- Sin estructura fija
- Características clave:
  - Topología de red dinámica
  - Naturaleza distribuida
  - Comunicación multisalto (opcional)
  - Anchos de banda limitados
  - Limitaciones de energía
  - Vulnerabilidades a intrusos y ataques maliciosos
- Ventajas
  - Fáciles de instalar
  - No requieren infraestructura



## Redes Ad hoc

- Orígenes en 1972: programa Packet Radio NETWORK (PRNET)
- Otras organizaciones que han trabajado en ellas:
  - IEEE (802.11, 802.15, 802.16), IETF (MANET WG), ETSI (HIPERLAN)
- Tipos de redes ad hoc
  - Mobile Ad Hoc NETWORKS: MANET
    - Sentido global pero más enfocadas a Wide Area Networks
  - Wireless Personal Area Networks: WPAN (802.15.1 - Bluetooth)
    - Centradas en las personas
  - Wireless Local Area Networks: WLAN (802.11 - Wi-Fi)
    - Entornos de hogar y oficinas
  - Wireless Sensor Networks: WSN (802.15.4 - ZigBee)



## Aplicaciones de MANET multisalto

- Redes personales
- Comunicaciones peer-to-peer en áreas sin cobertura
  - Grupo de excursionistas
- Trabajo colaborativo
  - Reunión de trabajo
- Establecimiento de comunicaciones en exposiciones
- Operaciones de rescate Operaciones militares
- Red de comunicaciones de vehículos
- Sistema de prevención de accidentes
- Comunicaciones en situaciones de emergencia

## Problemas a resolver en MANET

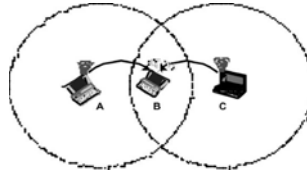
- Organización de la red
  - Auto-organización
    - Conseguir la configuración del interfaz de red
    - Encaminamiento
  - Auto-mantenimiento
    - Reaccionar a cambios topológicos: movilidad, fallo, baterías
    - Gestionar la movilidad del usuario
  - Procedimientos requeridos:
    - Descubrimiento de vecinos
      - Transmisiones de beacon
      - Escucha promiscua en el canal
    - Organización topológica: Descubrir información de toda la red

## Problemas a resolver en MANET

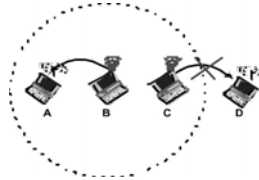
- Aspectos de la capa física

- Terminal oculto:

- RTS/CTS



- Terminal expuesto:



## Problemas a resolver en MANET

- Aspectos de la capa física

- Técnicas de transmisión que mejoren la cobertura, la eficiencia del espectro y aumente la velocidad de transmisión de datos

- Nuevas modulaciones: OFDM
- Nuevas antenas: antenas inteligentes
- Procesado de señal avanzado: MIMO (Multiple Input Multiple Output)

- Gestión de interferencias con otros sistemas (Bluetooth – Wi-Fi)

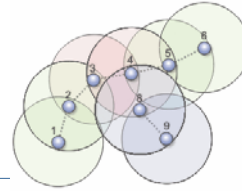
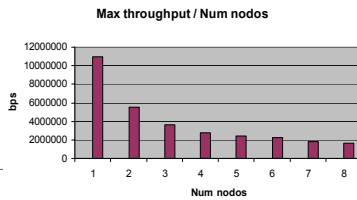
- Fairness

- Los protocolos con resolución de colisiones de ventana exponencial no son justos

- Dispositivos con varios interfaces utilizando diferentes canales

## Problemas a resolver en MANET

- Límites de capacidad
  - Encaminamiento multisalto: se utilizan otros nodos de la red
    - El mismo paquete debe transmitirse varias veces gastando ancho de banda
  - Dos nuevas métricas de capacidad:  $Per - node - throughput \propto \frac{\alpha}{\sqrt{n}}$ 
    - Capacidad de transporte: (bits \* distancia) / tiempo
    - Capacidad de throughput: throughput máximo que puede proveerse en cada nodo en media cuando se comunica de forma aleatoria con cualquier otro

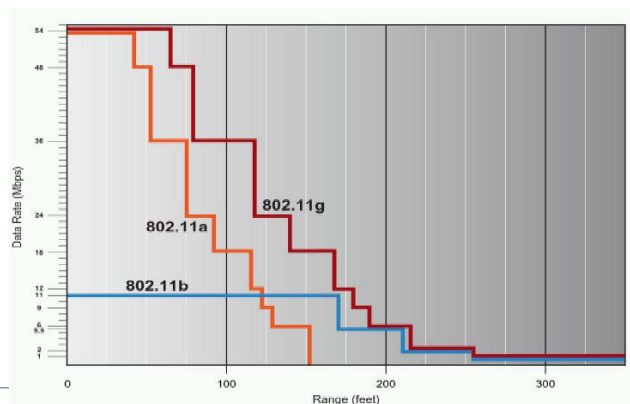


Redes inalámbricas

373 / 416

## Problemas a resolver en MANET

- Buscar la ruta más rápida
  - Es más rápido realizar dos saltos que uno solo, por la adaptación de modulación

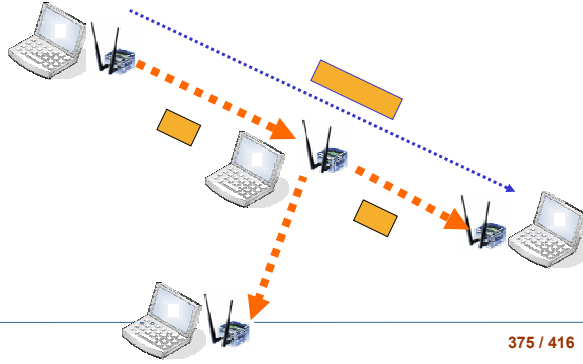


Redes inalámbricas

374 / 416

## MANET multisalto

- Buscar la ruta más rápida
  - Problema:
    - Más interferencia en 2 saltos que en 1
    - Terminal expuesto: otros terminales no pueden transmitir
  - Es posible utilizar varios canales, pero no es usual



## Problemas a resolver en MANET

- Consumo de energía
  - Normalmente los dispositivos móviles funcionan con baterías
    - Sistemas de ahorro de energía
      - Recepción discontinua: sleep mode + despertar sincronizado
    - Control de potencia:
      - Reduce la potencia transmitida y ahorra batería
      - Diferentes mecanismos:
        - » Lazo abierto: no se tiene información del receptor (basado en la propia potencia recibida y los errores)
        - » Lazo cerrado: basado en información del receptor
    - Protocolos de encaminamiento que utilizan el camino que consume menos

## Problemas a resolver en MANET

- Ataques de seguridad:
  - Captura pasiva de datos:
    - Imposible de detectar porque no genera tráfico
  - Impersonalización: envío de información de encaminamiento falsa con la identidad de algún nodo real
    - Envío hacia un nodo que recibe todos los paquetes y se satura
    - Envío hacia el atacante para capturar todos los paquetes
  - Denial of service (DoS): Intenta que los nodos no puedan transmitir
    - Saturación de las tablas de encaminamiento: envío indiscriminado de estas
    - Agotamiento de batería: se le hace reenviar muchos paquetes hasta que agota la batería

## Protocolos de encaminamiento

- Muchos protocolos
  - Adaptados de los existentes en redes fijas
  - Nuevos protocolos específicos para ad hoc
  - Ninguno se comporta bien en todos los entornos
- Protocolos proactivos
  - Siempre tienen una ruta establecida hacia todos los destinos
  - Baja latencia (retardo)
  - Muchos paquetes de control
- Protocolos reactivos
  - Las tablas de encaminamiento sólo se buscan cuando se necesitan
  - Menos paquetes de control pero más retardo
- Protocolos híbridos

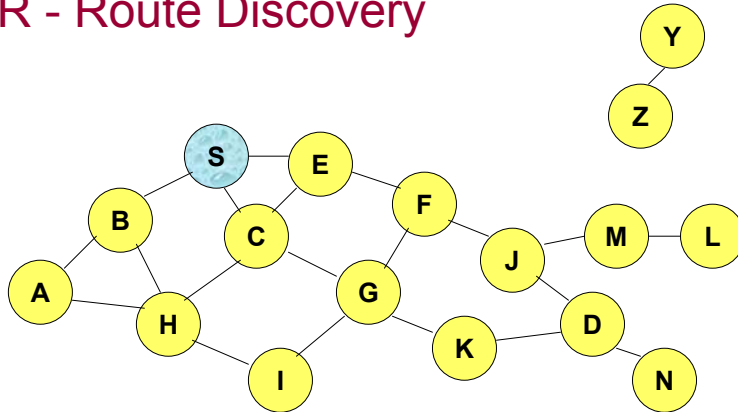
## Protocolos de encaminamiento

- Proactivos
  - DSDV: Destination Sequenced Distance Vector
  - WRP: Wireless Routing Protocol
  - CGSR: Cluster Switch Gateway Routing
- Reactivos
  - ABR: Associability Based Routing
  - DSR: Dynamic Source Routing
  - TORA: Temporally Ordered Routing Algorithm
  - AODV: Ad Hoc On-Demand Distance Vector Routing
  - RDMAR: Relative Distance Microdiversity Routing
  - SSR: Signal Stability Routing
  - LAR: Location-Aided Routing
  - PAR: Power-Aware Routing
- Híbridos
  - ZRP: Zone Routing Protocol

## Dynamic Source Routing - DSR

- Protocolo reactivo
- Los nodos tienen las rutas en memorias cache
- Funcionamiento:
  - Cuando un nodo S tiene que enviar un paquete al nodo D y no conoce la ruta inicia el procedimiento de Descubrimiento de Ruta (RREQ)
  - Los paquetes RREQ se propagan hasta el destino o hasta un nodo que conoce como llegar al destino
  - Los paquetes RREQ almacenan la ruta por donde pasan
  - Al llegar al destino, éste envía un RREP por la misma ruta por donde ha pasado RREQ
  - Después S almacena la ruta y envía sus paquetes de datos

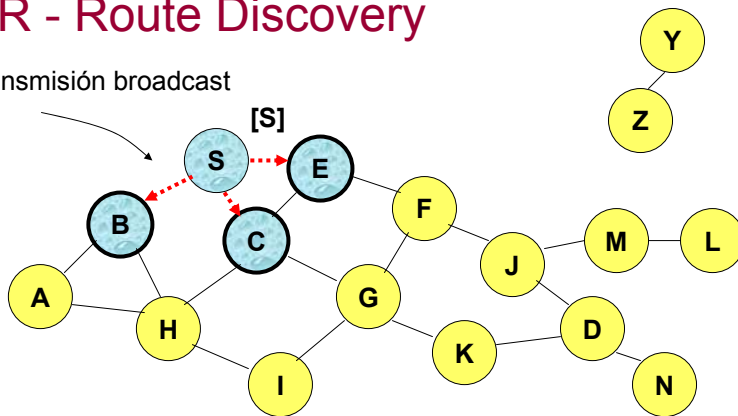
## DSR - Route Discovery



Nodo que recibe un RREQ hacia D desde S

## DSR - Route Discovery

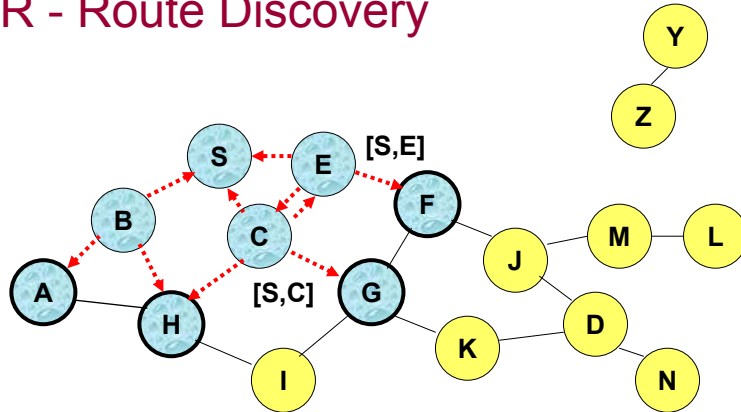
Transmisión broadcast



.....> Transmisión RREQ

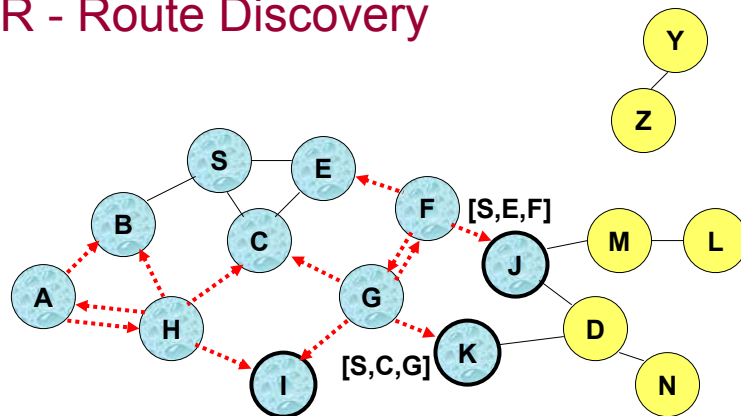
[X,Y] Ruta hacia D almacenada en el paquete RREQ

## DSR - Route Discovery



H recibe dos paquetes RREQ. Posible colisión.

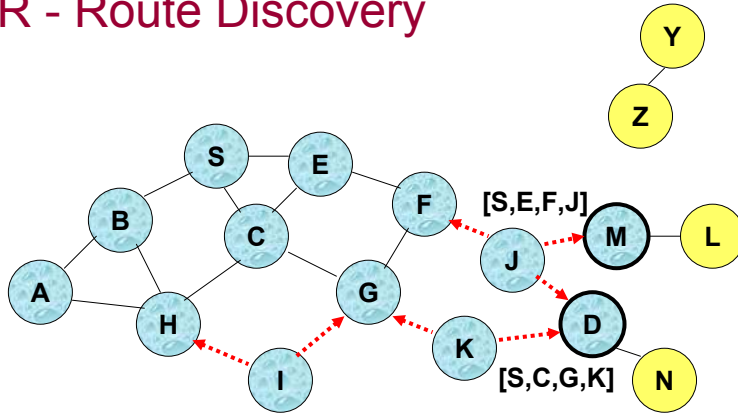
## DSR - Route Discovery



El nodo C recibe un RREQ desde G y H, pero no lo reenvía porque ya lo ha hecho anteriormente

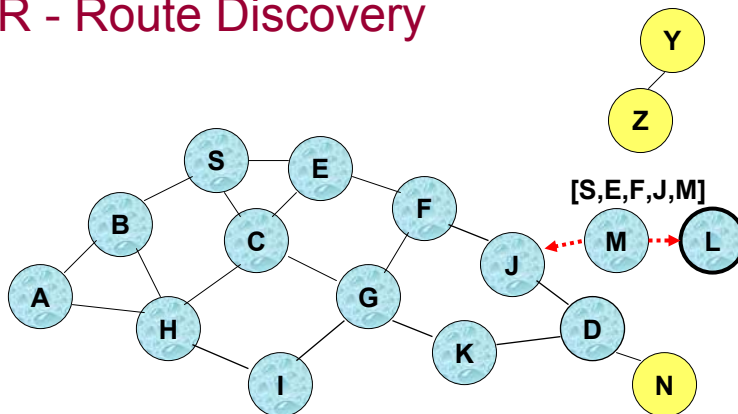


## DSR - Route Discovery



Los nodos J y K reenvían el paquete RREQ al nodo D

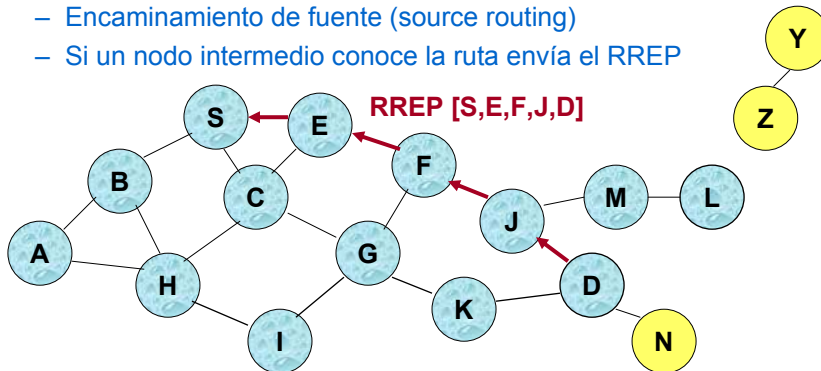
## DSR - Route Discovery



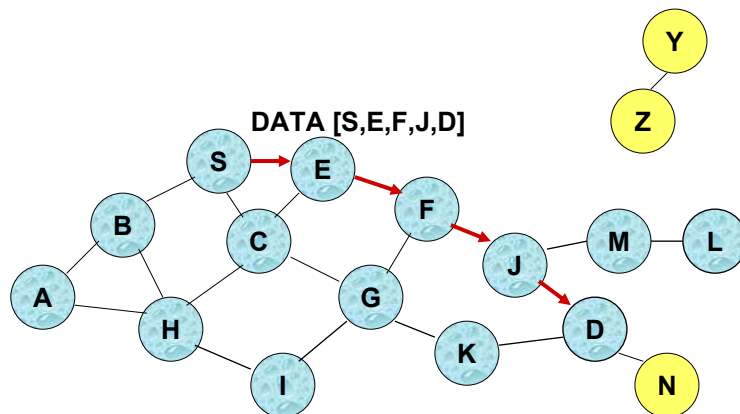
El nodo D no reenvía el RREQ porque es su destino  
 El paquete RREQ se va reenviando hasta los límites de la red

## DSR - Route Reply

- Cuando D recibe el RREQ contesta con un RREP
  - Sigue la ruta almacenada en RREQ hasta S
  - Funciona con enlaces bidireccionales
  - Encaminamiento de fuente (source routing)
  - Si un nodo intermedio conoce la ruta envía el RREP



## DSR – Transmisión de los datos



## DSR

- Ventajas:
  - Solamente se mantienen las rutas que se utilizan
  - Un solo procedimiento de descubrimiento permite descubrir muchos destinos (todos los de la ruta)
- Inconvenientes:
  - Las rutas envejecen por la movilidad o apagado de nodos
    - Se puede reintentar el envío varias veces inútilmente
  - La longitud del paquete crece con el número de saltos
  - Los RREQ llegan a todos los nodos de la red: innecesario
  - Posibles colisiones de RREQ: backoff aleatorio
  - Tormenta de RREP si muchos vecinos conocen la ruta al destino
  - Un nodo intermedio puede enviar un RREP inválido

## AODV

- Ad Hoc On-Demand Distance Vector Routing
  - Protocolo reactivo
  - Mejoras respecto al DSR:
    - Las rutas tienen identificación para detectar las viejas
    - Las rutas tienen un tiempo de expiración
    - Cuando una ruta expira se notifica a los vecinos
    - Utiliza paquetes de HELLO para detectar vecinos
    - Los paquetes no llevan la ruta
    - Al reenviar un RREQ el nodo genera un enlace interno (en memoria) recordando el origen, el destino y de que nodo recibe el RREQ
      - Con ello puede encaminar paquetes

## Wireless Mesh Networks

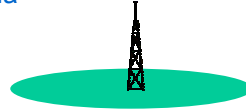
## Wireless mesh networks (WMN)

- A pesar de los esfuerzos en I+D realizados en redes ad hoc, éstas no han sido utilizadas de forma masiva
- Existen aplicaciones específicas pero la gente está más interesada en el acceso universal a Internet
- Posibilidad:

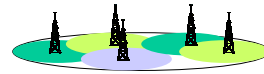
Convertir las redes ad hoc en redes flexibles y de bajo coste para acceder a redes con infraestructura

## Motivación de las WMN multisalto

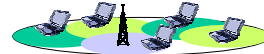
- Evolución de las técnicas de incremento de capacidad
  - Capacidad limitada con una sola celda



- Utilización del concepto celular
  - Problema de la conexión de las BS

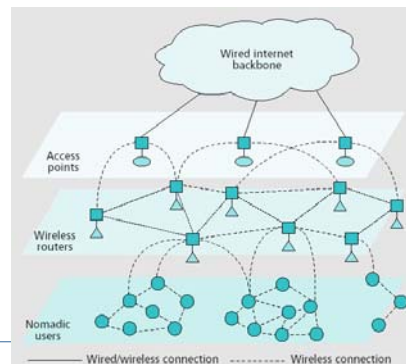
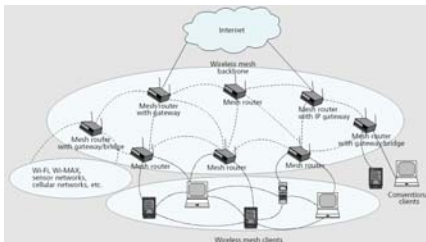


- Nueva alternativa: redes multisalto



## WMN multisalto

- Redes híbridas con nodos fijos y móviles
- Interconexión vía enlaces multisalto inalámbricos
  - Los dispositivos de los usuarios pueden funcionar como repetidores pero existen routers inalámbricos fijos

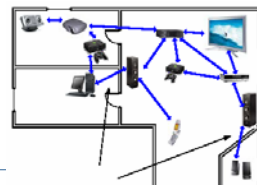
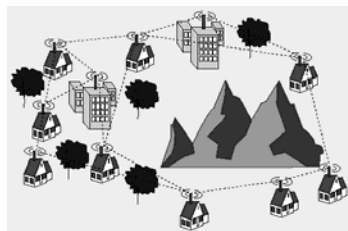
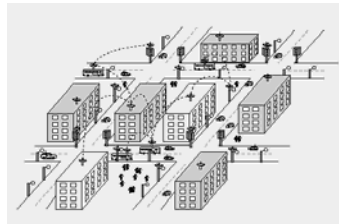


## Arquitectura de red

- Topología jerárquica
- Tipos de nodos:
  - Access Points: Dispositivos conectados a la red fija
  - Mesh routers: Forman la infraestructura de red para los clientes
    - Los enlaces entre ellos pueden ser con cable o vía radio
    - Diferentes tecnologías radio: p.e. clientes conectados con 802.11 y routers conectados con 802.16
  - Mesh clients: pueden formar redes ad hoc entre ellos

## Aplicaciones

- Sistemas de transporte inteligentes
  - Información horaria en tiempo real
  - Localización de los vehículos
- Acceso residencial a redes de banda ancha
- Seguridad pública
  - Policías con PDAs o portátiles con cobertura en toda la ciudad
- Red multimedia particular



## Comparativa con las redes ad hoc

- Redes Ad hoc
  - Multisalto
  - Los nodos normalmente móviles
  - Soporte a la movilidad
  - Normalmente sin infraestructura
  - Normalmente con una sola tecnología radio
  - Tráfico: de nodo a nodo
  - Aplicaciones específicas
- Redes mallas inalámbricas
  - Multisalto
  - Algunos nodos fijos otros móviles
  - Soporte a la movilidad
  - Siempre con infraestructura
  - Normalmente con varias tecnologías radio
  - Tráfico: normalmente de nodo a gateway
  - Aplicaciones en el acceso a redes de banda ancha (generalistas)
  - Tienen tramos que requieren de todas las funcionalidades de las redes ad hoc
    - Auto-configuración, auto-organización

## Problemas a resolver en WMN

- Todos aquellos relacionados con las redes ad hoc
- Encaminamiento:
  - El tráfico de usuario puede encaminarse hacia cualquier gateway de salida
  - Varios caminos hacia el mismo gateway
- “Cross layer” entre las funciones de capa física, de enlace y de red
  - Envío de paquetes por el camino con mejor recepción
  - Diversidad multiusuario: diferentes usuarios experimentan picos en la calidad de sus canales en instantes diferentes

# Wireless Sensor Networks (WSN)

## Introducción

- Número grande de nodos sensores pequeños, de bajo coste, bajo consumo y multifuncionales
- La posición de los sensores no estará planificada ni predeterminada
  - La red debe poseer capacidades y protocolos para la autoconfiguración
- Un nodo sensor consiste de un pequeño procesador y componentes con capacidades de comunicación
  - También denominados “mote”: pequeña parte de algo



Crossbow mote con batería



Detector de distancia



## Características de los sensores

- Transceptores de comunicación:
  - Frecuencias de funcionamiento: 400 MHz, 2.4 GHz y más
  - Bandas sin licencia
  - Funcionan mayoritariamente para Line-of-sight (LOS)
  - Poca cobertura (100 m)
- Microcontrolador
  - TI MSP430 8 MHz, 128KB Flash, 4 KB EEPROM
  - Poca potencia con modos de ahorro de batería
- Sistema operativo: TinyOS
  - Fácil programación

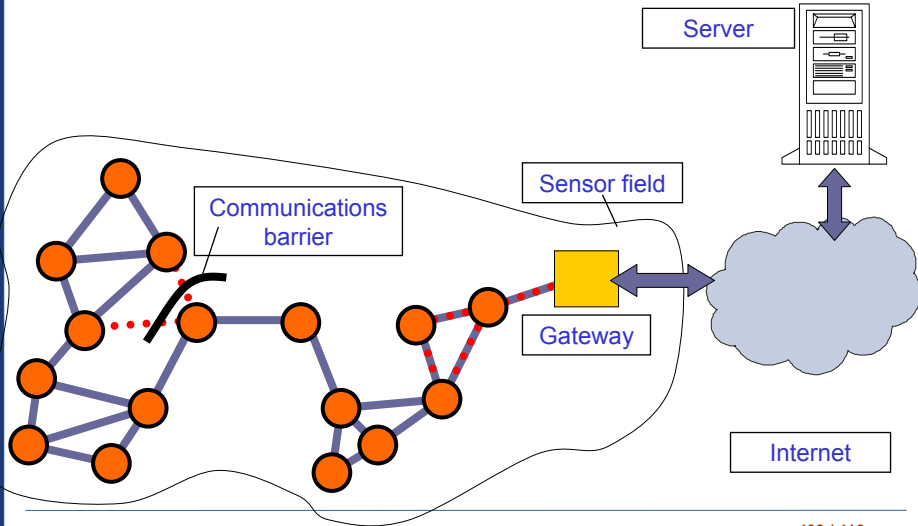


## Revolución informática

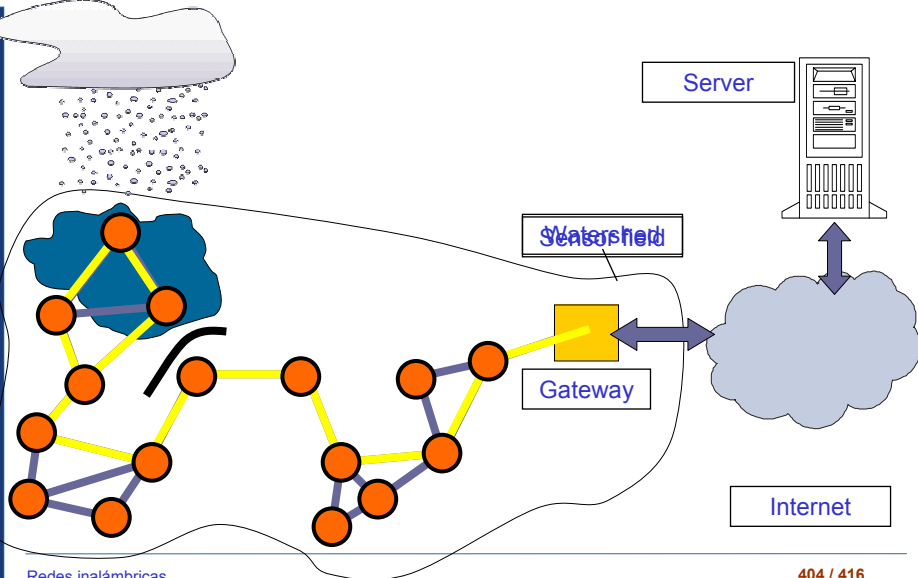


<i>Original IBM PC (1981)</i>	<i>MICAZ Mote (2005)</i>
4.77 MHz	8 MHz
16-256 KB RAM	128 KB RAM
160 KB Floppies	512 KB Flash
~ \$6K (today)	~ \$35
~ 64 W	~14 mW
10 Kg, 19.5 x 5.5 x 16 inch	200 gr, 2.25 x 1.25 x 0.25 inch

## Despliegue de una red de sensores



## Ejemplo de funcionamiento



## Aplicaciones

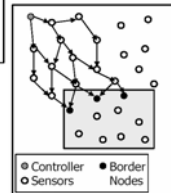
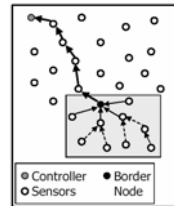
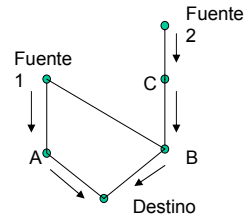
- Monitorización ambiental
  - Tráfico
  - Detección de intrusos
  - Observación meteorológica
- Sondeo industrial y diagnósticos
  - Fabricación, cadenas de montaje
- Computación ambiental
  - Casas inteligentes
- Aplicaciones militares

## Comparación con redes malladas

- |  |   |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"><li>• Redes de sensores<ul style="list-style-type: none"><li>– Gran número de nodos</li><li>– Nodos densamente desplegados</li><li>– Ancho de banda limitado</li><li>– Normalmente con limitaciones de energía</li><li>– Usualmente con recursos limitados</li><li>– Nodos normalmente fijos</li><li>– Tráfico normalmente de nodo a gateway</li><li>– Los nodos sensores son propensos a fallos</li></ul></li></ul> | <ul style="list-style-type: none"><li>• Redes malladas inalámbricas<ul style="list-style-type: none"><li>– Menor número de nodos</li><li>– Mayor ancho de banda</li><li>– Menores limitaciones de energía</li><li>– Sin restricciones de recursos</li><li>– Nodos fijos y móviles</li><li>– Tráfico normalmente de nodo a gateway</li></ul></li></ul> |
|--|---|

## Encaminamiento en WSN

- Se divide en dos categorías
  - Address centric: forma típica de encaminamiento en Internet donde se utiliza la dirección del destino
  - Data centric: forma donde se utilizan los datos que transportan los paquetes.
    - Utilizado para envío de datos de muchas fuentes a un solo destino "sink"
    - Se puede realizar agregación de datos
    - Distribución de la solicitud



## Encaminamiento Data-centric

- Requiere clasificación basada en atributos
  - Solicitud de un atributo o fenómeno, más usual que solicitar un nodo en particular
    - "Áreas con temperaturas mayores de 40°" es más común que preguntar "Temperatura del nodo x"
- Agregación de datos:
  - Técnica usada para resolver problemas de solapamiento de información
  - Los nodos repetidores en lugar de reenviar todos los paquetes que reciben agregan los datos de un mismo atributo en un solo paquete
    - Mejora la eficiencia
    - Aumenta la vida de la batería

## Nuevas propuestas

- IEEE 802.20: MBWA Mobile Broadband Wireless Access
- IEEE 802.22: WRAN Wireless Regional Area Network
- IEEE 802.15.3: High-Rate WPAN: WiMedia

## IEEE 802.20: MBWA Mobile Broadband Wireless Access

- Iniciado en diciembre de 2002
- Crear una red de bajo coste, always-on y móvil de banda ancha, apodada Mobile-Fi. Competencia con 802.16e
- Pretende especificar las capas física (PHY), de control de acceso al medio (MAC) y el Logical Link Control (LLC)
- Para operar en bandas con licencia por debajo de 3.5 GHz y con velocidades de pico de 1 Mbps por usuario.
- Enfocado a transmisión de datos
- Con roaming IP y traspaso
- Movilidad hasta 250 Km/h
- Antenas adaptativas
- Baja latencia

## IEEE 802.22: WRAN Wireless Regional Area Network

- Iniciado en 2004
- Pretende estandarizar una red punto – multipunto que utilice frecuencias de TV entre 54 y 862 MHz.
- Similar al WiMAX pero al utilizar frecuencias más bajas tiene mayor cobertura sin visibilidad directa

## IEEE 802.15.3: High-Rate WPAN: WiMedia

- Familia IEEE 802.15
  - IEEE 802.15.1 (Bluetooth)
  - IEEE 802.15.3 (WiMedia)
  - IEEE 802.15.4 (ZigBee)
- Objetivo de WiMedia
  - Promover la conectividad inalámbrica multimedia y la interoperabilidad entre dispositivos en una red de área personal

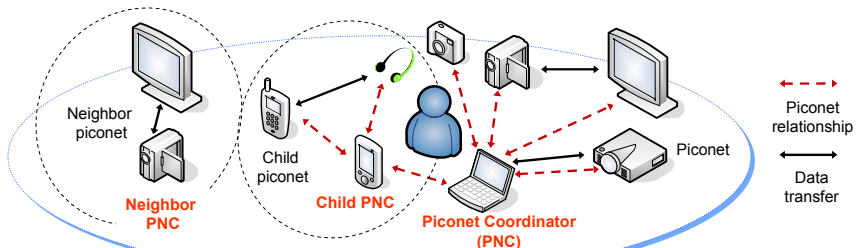


## IEEE 802.15.3: High-Rate WPAN: WiMedia

- ¿Por qué un nuevo estándar?
  - Los existentes no están optimizados para comunicaciones multimedia
- Se requiere:
  - Simplicidad de uso
  - QoS avanzado
  - Bajo coste
  - Vida de la batería larga
  - Suficiente capacidad de transmisión de datos y cobertura
  - Plataforma de seguridad
- Debe contemplar:
  - DTV / HDTV, Set Top Box (with Internet connection), altavoces, reproductores de DVD con disco duro y grabadoras de DVD, consola de juegos, cámaras digitales, teléfonos móviles y controles remotos

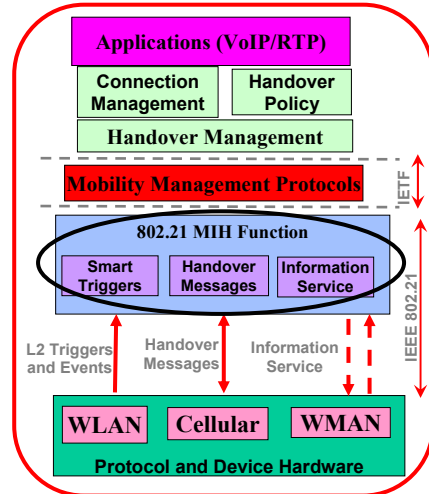
## IEEE 802.15.3: High-Rate WPAN: WiMedia

- Características
  - Soporta tráfico de streaming: video y audio
  - IEEE 802.15.3 (Junio 2003)
    - Banda ISM de 2.4 GHz
    - 11, 22, 33, 44, 55 Mbit/s
  - Red de piconets



## IEEE 802.21 Media Independent Handover Services

- Optimiza los traspasos de la capa 3 y superiores
- Facilita la selección de la red óptima
- Traspaso seamless para mantener las conexiones
- Operación de bajo consumo para dispositivos multi-radio



Gracias por su atención !!!