

# CAPÍTULO 6º

## REDES DE ACCESO INALAMBRICO ESTANDARES IEEE 802.11.WIFI ESTANDARES 802. WIMAX COBERTURA Y CAPACIDAD



### REDES DE DATOS

- La terminología siguiente se aplica a redes cableadas o inalámbricas (*Wireless*). En este último caso suele anteponerse la “W”.
  - PAN (*Personal Area Network*), personales, con alcance de algunas decenas de metros. Ejemplo de WPAN: Bluetooth.
  - LAN (*Local Area Network*), locales, con extensión de centenares de metros. Ejemplo de WLAN: Wi-Fi.
  - MAN (*Metropolitan Area Network*), metropolitanas, con extensión equivalente a municipios enteros. Ejemplo de WMAN: WiMAX.
  - WAN (*Wide Area Network*) o RAN (*Regional Area Network*), se refieren a redes con cobertura regional.
- *Wireless Ethernet* es un concepto que engloba toda una serie de redes de datos, basadas en los protocolos TCP/IP y en la tecnología *Ethernet*, en las que el tramo último de conexión con el usuario se realiza vía radio. Están basadas en la familia de estándares de redes de datos IEEE 802, que incluye especificaciones de capa física y nivel de enlace. Incluye redes cableadas, como *Ethernet* (802.3), y otras inalámbricas.



## REDES INALÁMBRICAS DE DATOS

- Surgen como complemento o sustitución de redes de datos cableadas, inicialmente para la conexión de ordenadores, en interiores, y en el entorno empresarial. Actualmente permiten conectar todo tipo de dispositivos, en interiores y exteriores, en uso personal o profesional.
- Ventajas:
  - Ubicuidad. Acceso en cualquier punto del área de cobertura.
  - Instalación sencilla y rápida. El tendido de cables es mínimo.
  - Flexibilidad y escalabilidad.
- Inconvenientes:
  - Interferencias intrasistema impredecibles. Ausencia de planificación.
  - Interferencias intersistema con Bluetooth y otros sistemas.
  - Cobertura y capacidad limitadas por la potencia autorizada (reducida) y el ancho de banda disponible.
  - Seguridad comprometida, aunque los nuevos protocolos han mejorado este aspecto.



## ESTANDARIZACIÓN DE WLAN

- En los años 90 se desarrollan en paralelo dos estándares en diferentes ámbitos.
- El IEEE (*Institute of Electrical and Electronic Engineers*) desarrolla el estándar original 802.11, dentro de la familia 802 de estándares relativos a redes de área local. Este estándar incorpora tres modalidades de capa física, una de infrarrojos, con modulación PPM (*Pulse Position Modulation*) y dos de radiofrecuencia, en la banda de 2,4 GHz (de uso común). En las dos se utiliza espectro ensanchado con las modalidades FHSS (*Frequency Hopping Spread Spectrum*) y DSSS (*Direct Sequence Spread Spectrum*).
- El ETSI desarrolla el estándar HIPERLAN, dentro de su proyecto BRAN (*Broadband Radio Access Network*). HIPERLAN/1 utiliza la banda de 5 GHz prevista por la CEPT para sistemas WLAN.
- Ninguno de los dos llega al mercado de modo importante, pero la norma 802.11 es la base de las redes Wi-Fi actuales. Por otra parte la transmisión FHSS se utiliza, con pequeñas diferencias, en el sistema Bluetooth.



## ESTANDARIZACIÓN DE WLAN(2)

- El desarrollo del estándar 802.11 tardó bastantes años. Una vez aprobado en 1997 se comprobó que las velocidades de transmisión previstas (1 y 2 Mbit/s) resultaban demasiado reducidas. En 1999 se aprobaron dos enmiendas (802.11a y 802.11b) que aumentaban la velocidad de transmisión, y que solo afectaban a la capa física.
- En paralelo el ETSI define el estándar HIPERLAN/2, cuya capa física es similar a la de 802.11a, y a la definida en el proyecto japonés MMAC. Ninguno de ellos ha tenido trascendencia en el mercado.
- En los años 90 también se estandarizan, en diferentes foros, otros sistemas como DECT, IrDa, HomeRF o Bluetooth, para conectividad entre equipos. Todos ellos han encontrado aplicación en determinados nichos del mercado de comunicaciones de datos entre dispositivos.
- Wi-Fi (*Wireless Fidelity*) es el nombre de la certificación que asegura la interoperabilidad con equipos de diferentes fabricantes, basados en 802.11. La *Wi-Fi Alliance* se creó en 1999 para promover la comercialización de equipos, basados inicialmente en 802.11b, con gran éxito de mercado.



## EVOLUCIÓN DE IEEE 802.11

- El estándar original, aprobado en 1997, incluye especificaciones de capa física y control de acceso al medio (MAC), que forma parte de la capa de enlace.
- La capa MAC incluye dos funciones de coordinación: puntual (centralizada) y distribuida (CSMA/CA, inspirada en Ethernet). Permite redes basadas en infraestructura (con puntos de acceso) y redes “ad-hoc”. Aunque ha sufrido evoluciones, las redes actuales se basan en gran medida en el original.
- Incorpora el protocolo de seguridad WEP (*Wired Equivalent Privacy*), que pronto demostró deficiencias importantes.
- Los primeros equipos comercializados, responsables del gran éxito del estándar, utilizaban la capa MAC de la norma original, con la capa física definida en la enmienda 802.11b. Ésta se basa en la modalidad DSSS, en 2,4 GHz, pero incorpora un sistema de modulación CCK (*Complementary Code Keying*), que añade a las velocidades de 1 y 2 Mbit/s dos adicionales de 5,5 y 11 Mbit/s.



## EVOLUCIÓN DE IEEE 802.11(2)

- Enmiendas relativas fundamentalmente al nivel físico:
  - 802.11a. (1999). Nivel físico de alta velocidad en 5 GHz. Permite llegar a 54 Mbit/s con modulación OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*). Su uso es por ahora limitado, fundamentalmente en enlaces punto a punto o punto a multipunto fijos.
  - 802.11b. (1999). Extensión de la capa física de 2,4 GHz con velocidad más alta. Permite llegar a 11 Mbit/s.
  - 802.11g (2003). Extensión de la capa física de 2,4 GHz para velocidades aún más altas. Incorpora en esta banda la modulación OFDM, con posibilidad de alcanzar los 54 Mbit/s.
  - 802.11h (2004) Adaptación a la regulación europea en 5 GHz. Sobre el 802.11a añade control de potencia y selección dinámica de canal.
  - 802.11n (en proceso de aprobación). Permitirá velocidades del orden de 100 Mbit/s para el usuario. Esto exige velocidades muy superiores en la capa física, lo que se consigue con tecnología MIMO. Existen ya equipos que cumplen esta versión de la norma.



## EVOLUCIÓN DE IEEE 802.11(3)

- Otras enmiendas:
  - 802.11d (2001) Permite la operación en entornos regulatorios diferentes de los previstos inicialmente (Europa, USA, Japón)
  - 802.11e (2003 y 2005) Para soporte de calidad de servicio. Permite incorporar aplicaciones sensibles al retardo o a sus fluctuaciones.
  - 802.11f (2003) Relativa al sistema de distribución (conexión entre puntos de acceso). Retirada en 2006.
  - 802.11i (2004) Seguridad mejorada. Sistema WPA. (*Wi-Fi Protected Access*). Nuevo sistema que evita los problemas de seguridad que presentaba el antiguo WEP.
  - 802.11j (2004) Operación en las bandas de 4.9 y 5 GHz de Japón



## OBJETO DEL ESTÁNDAR

- Describe las funciones y servicios que debe implementar un dispositivo para poder integrarse en una red 802.11 y poder moverse dentro de ella.
- Permite la superposición de diferentes redes 802.11 en una misma zona sin problemas de funcionamiento en cada una de ellas ni de transferencia de tráfico entre ellas.
- Incluye procedimientos de autenticación y cifrado de las comunicaciones para garantizar la privacidad de las mismas.
- Se incluyen dos tipos de redes: Redes “ad-hoc” y redes basadas en infraestructura.

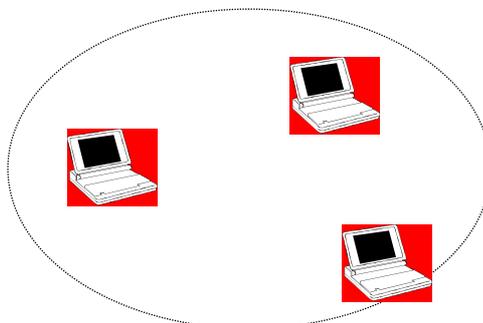


8



## REDES “AD-HOC”

- Constituidas por estaciones situadas de forma que todas ellas reciben de todas las demás.
- Las redes “ad-hoc” se generan de manera espontánea y muchas veces por tiempo limitado, por ejemplo durante una reunión de trabajo.



Red *ad-hoc*  
o  
BSS (*Basic Service Set*)



9



## REDES BASADAS EN INFRAESTRUCTURA

- Basadas en un sistema de distribución (DS, *Distribution System*) que interconecta subconjuntos de estaciones o BSS. El DS puede ser inalámbrico o cableado.
- En cada BSS (*Basic Service Set*) las estaciones están en mutuo alcance. Cada uno tiene un identificador SSID (*Service Set Identifier*).
- Cada BSS accede al sistema de distribución a través de un punto de acceso (AP, *Access Point*). El AP gestiona también la función de coordinación de las transmisiones internas del BSS.
- El DS puede incluir accesos (*portals*) a redes LAN tradicionales. En muchos casos está integrado con otras redes de datos y, a través de ellas, permite el acceso a Internet.
- El conjunto de BSS interconectadas por el DS forma un *Extended Service Set* (ESS) equivalente a una LAN de tamaño y distribución arbitrarias y sin limitaciones.

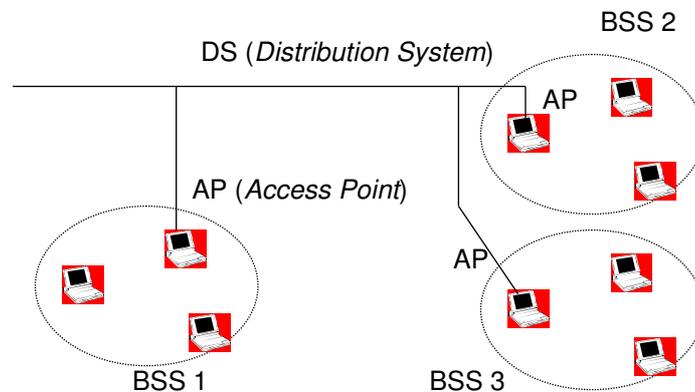


10



## REDES BASADAS EN INFRAESTRUCTURA(2)

- Las estaciones pueden moverse de un BSS a otro sin perder conectividad.
- Las áreas que cubren las BSS pueden ser adyacentes, solapadas o disjuntas, según las necesidades.



11



## SERVICIOS DE RED

- Se han definido cuatro servicios elementales:
  - Autenticación. Proceso mediante el cual un equipo se identifica en un BSS y se conecta, si se le autoriza.
  - Des-autenticación. Proceso de desconexión.
  - Envío de datos. Gestión de los flujos de datos.
  - Privacidad. Mecanismos de seguridad.
- Servicios ofrecidos por el sistema de distribución:
  - Asociación. La dirección MAC de un equipo queda asociada a un AP, a través del cuál se gestionará el tráfico que genere o reciba.
  - Re-asociación. Tras una pérdida temporal de la conexión con el AP.
  - Des-asociación. Proceso por el que se da de baja en un AP.
  - Integración. Conversión de formatos de datos con otras redes (por ejemplo, Ethernet).



## EQUIPOS

- En la actualidad la mayoría de los ordenadores portátiles incorporan un terminal Wi-Fi. Existen en el mercado además terminales muy variados, con conexión PCI (en ordenadores de sobremesa), PCMCIA (portátiles) o USB. Los puntos de acceso suelen ser equipos autónomos con conexión Ethernet a las redes de datos.
- Las antenas de los terminales suelen ser antenas lineales integradas en los equipos, con diagrama de radiación omnidireccional, y en ocasiones con diversidad. Por ejemplo, los ordenadores portátiles frecuentemente integran dos antenas, una a cada lado de la tapa.
- Los puntos de acceso incorporan por defecto antenas lineales, generalmente externas, de reducidas dimensiones, omnidireccionales y de baja ganancia. Además, existen numerosos modelos de antenas, con ganancias que pueden superar en algunos casos los 20 dB.
- La selección de la antena debe hacerse en función de las características de la zona a la que se desea dar servicio.



## EQUIPOS (2)

- Ejemplos de antenas utilizadas en los AP:
  - Antenas de techo, con diagrama orientado hacia abajo.
  - Paneles para colocar en paredes, con cobertura en un ángulo de 180°, para uso en interiores.
  - Paneles sectoriales, similares a los que se utilizan en telefonía móvil, para coberturas exteriores.
  - Antenas aún más directivas, tipo Yagi u otros, útiles cuando la cobertura se limita a una zona de extensión reducida, o para establecer enlaces punto a punto.
- El éxito de la tecnología Wi-Fi ha favorecido la aparición de un gran número de aplicaciones, con necesidades diferentes.
- Un aspecto importante a considerar es el cable de unión entre el AP y la antena, cuya longitud no debería superar los 10 metros, ya que en las bandas de 2,4 y 5 GHz los cables presentan pérdidas que pueden ser muy altas.



## CONTROL DE ACCESO AL MEDIO (MAC)

- La capa MAC (*Medium Access Control*) comprende los mecanismos que gestionan el acceso al medio (canal de RF o de infrarrojos) en las redes Wi-Fi. También incluye los protocolos WEP y WPA de seguridad.
- En la función de coordinación distribuida, el protocolo utilizado es CSMA/CA (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*). Es similar al utilizado en las redes Ethernet.
- En las redes Wi-Fi pueden existir nodos ocultos (*hidden nodes*), cuyas transmisiones se pueden solapar en destino (AP), pero que entre sí no se detectan por estar a mayor distancia (A y B en la figura).
- Para evitar este problema, se habilitan peticiones previas de transmisión (RTS, *Request to Send*) y autorizaciones (CTS, *Clear to Send*). En la figura, el terminal B puede escuchar un CTS del AP dirigido a otro terminal, lo que le llevaría a inhibir durante un tiempo su propia transmisión.



- Existe también la función de coordinación puntual, de tipo *polling*.



## NIVEL FISICO: RADIO

- Los equipos IEEE 802.11 que utilizan transmisión por radio usan bandas de uso común, originalmente la de 2,4 GHz y después la de 5 GHz.
  - Los usuarios no precisan pedir una licencia ni pagar un canon por uso del espectro.
  - A cambio, no pueden reclamar protección frente a interferencias procedentes de otros usuarios de la banda. Los conflictos deben solucionarse por acuerdos privados.
  - Los equipos deben cumplir estrictas regulaciones que facilitan la coexistencia de diferentes usuarios. En particular la potencia de transmisión suele estar limitada a niveles del orden de 10 ó 100 mW en la mayoría de los casos.
  - En la banda de 2,4 GHz en EE.UU. se permite transmitir hasta 1 W con espectro ensanchado.
- Aunque originariamente se definió también una especificación para transmisión por infrarrojos, ésta no ha tenido éxito comercial.



## BANDAS DE FRECUENCIAS

- Se describen a continuación las atribuciones del CNAF español, que coinciden con la regulación europea (CEPT). Con pequeñas diferencias, en otros países del mundo existen regulaciones similares para estas bandas.
- La nota UN-85 del CNAF prevé la utilización de la banda de 2,400 a 2,483 GHz para redes de área local y otros usos, preferentemente en interiores, con una pIRE total inferior a 100 mW.
- En esta banda se han definido 13 canales, con separación de 5 MHz y anchura de banda de 22 MHz, para su uso en 802.11b/g. Solo pueden establecerse tres canales sin solape.

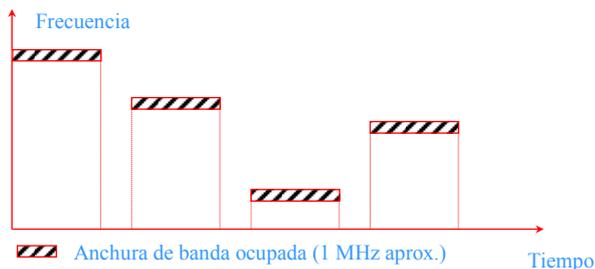
$$f_n (\text{MHz}) = 2412 + 5 \cdot (n - 1) \quad n = 1, 2, \dots, 13$$

- La nota UN-128 establece varias subbandas, con obligación de utilizar técnicas de selección aleatoria de canal y posibilidad de control de potencia de transmisión (TPC):
  - 5150-5350 MHz, interiores, pIRE hasta 200 mW (con TPC) ó 100 mW (sin TPC).
  - 5470-5725 MHz, exteriores, pIRE hasta 1 W (con TPC) ó 500 mW (sin TPC).



## CAPA FÍSICA FHSS

- En el modo *Frequency Hopping Spread Spectrum* (FHSS):
  - El canal se define por una secuencia de saltos de frecuencia, con cierta periodicidad. Se utilizan hasta 79 frecuencias, separadas 1 MHz. La modulación es 2-GFSK y 4-GFSK, para 1 y 2 Mb/s. La primera se utiliza, con mínimas variaciones, en el sistema *Bluetooth*.
  - La capa MAC gestiona cómo compartir el canal entre los usuarios.
  - Técnica muy robusta frente a interferencias de banda estrecha.
- Ejemplo de transmisión FHSS:



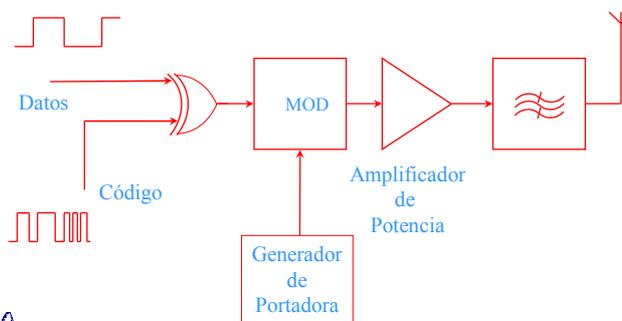
SSR

18



## CAPA FÍSICA DSSS

- En la capa física *Direct Sequence Spread Spectrum* (DSSS):
  - La señal se combina con una secuencia de alta velocidad antes de modular. La potencia se reparte en un gran ancho de banda.
  - El receptor realiza la operación inversa, para lo cual debe conocer la secuencia utilizada en transmisión y sincronizarse.
- Ejemplo de transmisión DSSS:



SSR

19



## NIVEL FISICO DSSS EN IEEE 802.11

- Las dos velocidades de transmisión se traducen en una velocidad de símbolo de 1 Msímbolo/s, mediante el uso de DBPSK (1 Mbit/s) ó DQPSK (2 Mbit/s)
- La señal se combina con una secuencia de Barker única, con velocidad de 11 Mchip/s. El ancho de banda es del orden de 22 MHz. La ganancia de proceso, relación entre el régimen de chip y el régimen binario, es de 10,4 y 7,4 dB, respectivamente. La secuencia de Barker es:

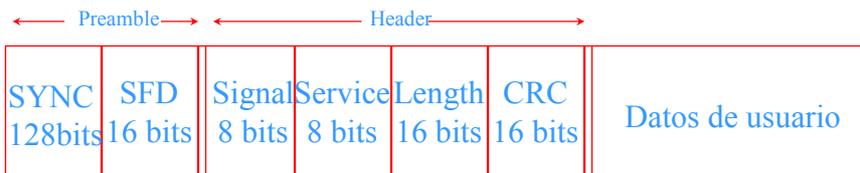
$$c = \{+1, -1, +1, +1, -1, +1, +1, +1, -1, -1, -1\}$$

- La potencia de transmisión está limitada a 100 mW (pire) en Europa. En USA se permite hasta 1 W. La sensibilidad del receptor es del orden de -80 dBm.
- Las modulaciones básicas DSSS, a 1 y 2 Mb/s, se mantienen en las normas 802.11b y 802.11g.



## FORMATO DE TRAMA DSSS

- La trama consta de:
  - Preámbulo (Preamble): Campos de sincronismo y delimitador de trama
  - Cabecera (Header): Velocidad de transmisión, longitud de trama, datos de servicio y CRC para control de errores.
  - Datos: Número variable de entre 0 y 4095 octetos. Los datos son aleatorizados y compensados en continua.
- Cabecera y preámbulo se transmiten a 1 Mbit/s, de forma que todos los terminales puedan decodificarlos. Los datos de usuario se transmiten, en función del canal, a la velocidad de 2 Mbit/s o, en 802.11b, a las adicionales de 5,5 y 11 Mbit/s. En 802.11b se define también un formato corto de trama, de uso opcional, en que parte de la información de cabecera se transmite a velocidad más alta.



## IEEE 802.11b

- Se basa en la definición de capa física DSSS, utilizando el mismo periodo de chip. Utiliza un sistema diferente de modulación (CCK) para obtener velocidades de 5,5 y 11 Mbit/s. Además introduce un formato más ágil de trama, con tara reducida.
- Introduce, como opcional, la utilización de modulación convolucional y agilidad de canal (cambio de canal en caso de interferencia estable).
- Cambios menores en la capa MAC para soportar todas las innovaciones.
- *Complementary Code Keying* (CCK) o Modulación por códigos complementarios.
  - El ancho de banda es el mismo de DSSS.
  - Cada símbolo está formado por 8 chips complejos (QPSK), cuya velocidad es 11 Mchip/s. Velocidad de símbolo: 1,375 Msímbolo/s.
  - Para obtener la velocidad de 5,5 Mbit/s, cada símbolo codifica cuatro bits. Para la velocidad de 11 Mbit/s, cada símbolo codifica 8 bits. Con relación a DSSS se pierde inmunidad frente al ruido y las interferencias.
  - La sensibilidad de referencia es -76 dBm para 11 Mbit/s.
  - La detección se realiza por símbolos. Los diferentes símbolos tienen buenas propiedades de correlación cruzada.

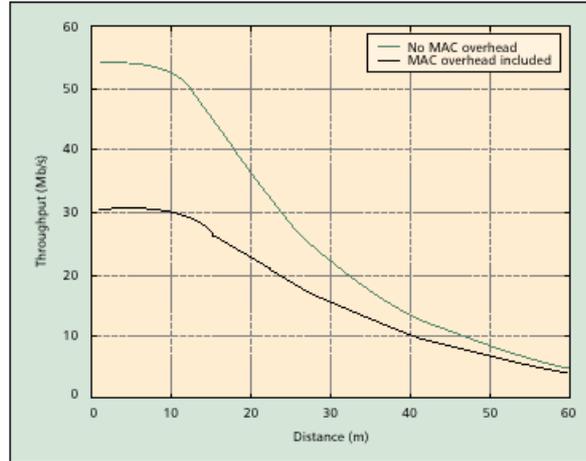


## IEEE 802.11a

- Se aprueba también en 1999. Define una capa física para la banda de 5 GHz, basada en OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplex*), con una velocidad de transmisión comprendida entre 6 y 54 Mbit/s.
- Debe tenerse en cuenta que esta tasa debe compartirse entre todos los usuarios del mismo BSS. Incluso cuando solo hay un usuario con información a transmitir, la tasa útil es más reducida, pues hay que descontar toda la información de control de todas las capas y los intervalos de tiempo en que no se transmite.
- Todos estos tiempos muertos son más relevantes en las velocidades más altas. La velocidad máxima de usuario ronda los 30 Mbit/s en las mejores condiciones.
- La velocidad es además variable, con adaptación del enlace a las condiciones del canal, entre ellas la distancia y las interferencias.



## CAUDAL BINARIO DE 802.11a (SIMULACIONES)



■ Figure 1. 802.11a achievable throughput vs. distance, typical indoor office environment.



## PARÁMETROS DE MODULACIÓN 802.11a

- Se utilizan los siguientes:
  - Canalización: 20 MHz
  - Frecuencia de muestreo  $F_s = 20$  MHz
  - Subportadoras: 52 (48 de tráfico + 4 pilotos).  $N_{used} = 52$
  - Tiempo útil de símbolo:  $T_u = 3,2 \mu s$
  - Tiempo de guarda:  $T_g = 0,8 \mu s$ .  $G = T_g / T_u = 1/4$
  - Separación entre subportadoras  $\Delta f = 1 / T_u = 1/3,2 \mu s = 312,5$  KHz
  - Ancho de banda:  $BW \cong N \cdot \Delta f = 16,25$  MHz
  - Periodo de símbolo:  $T = T_g + T_u = 4 \mu s$ .  $R_s = 250$  ksimb/s.
  - Modulación de las subportadoras: BPSK, QPSK, 16-QAM o 64-QAM.
  - Velocidad binaria bruta:  $R_b = (1, 2, 4, 6) \cdot 48 \cdot 250$  ksimb/s (según modulación).
  - Codificación: Tasas  $R_{cc} = 1/2, 2/3$  y  $3/4$ .
  - Velocidad binaria útil:  $R_u = R_{cc} \cdot R_b$



## FORMATOS DE MODULACIÓN EN 802.11a

- Las diferentes velocidades de transmisión se consiguen combinando las tres posibles modulaciones con las tasas de codificación de canal. La tasa de datos se obtiene multiplicando la última columna por 250 ksímbolo/s.

Data rate (Mbits/s)	Modulation	Coding rate (R)	Coded bits per subcarrier ( $N_{BPSK}$ )	Coded bits per OFDM symbol ( $N_{CBPS}$ )	Data bits per OFDM symbol ( $N_{DBPS}$ )
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



26



## PARÁMETROS DE 802.11a

- Algunos datos adicionales:
  - La canalización es de 20 MHz. Los canales disponibles dependen de regulaciones locales. En Europa están previstos 19 canales, en 5,15-5,35 GHz y 5,47-5,725 GHz.
  - En interiores la potencia máxima en Europa es de 200 mW, con control de potencia y selección dinámica de frecuencia. En exteriores puede llegarse a 1 W. En ambos casos la limitación se aplica a la pira del transmisor, y afecta por igual a los puntos de acceso y los terminales de usuario.
  - La sensibilidad del receptor depende del formato de modulación. Varía entre -65 dBm para 54 Mbit/s y -82 dBm para 6 Mbit/s.



27



## IEEE 802.11g

- Estándar aprobado en 2003 que define un nivel físico con velocidades de transmisión aún más altas en la banda de 2,4 GHz.
- Debe tenerse en cuenta que las velocidades más altas solo se obtienen en distancias reducidas, tal como se apuntó al presentar el 802.11a. Al tratarse de una frecuencia más baja, las distancias son mayores.
- Añade a las velocidades de 1, 2, 5,5 y 11 Mbit/s, previstas en 802.11b, todas las definidas en 802.11a, entre 6 y 54 Mbit/s, con OFDM.
- Además incorpora opcionalmente dos formatos nuevos.



## IEEE 802.11g(2)

- El nivel físico definido en este estándar se conoce como ERP (*Extended Rate Physical Layer*), con las siguientes variantes:
  - ERP-DSSS/CCK. Prácticamente idéntico (salvo detalles) al definido en 802.11b. El formato de trama con preámbulo corto pasa a ser obligatorio.
  - ERP-OFDM. Incorpora las modulaciones OFDM de 802.11a, con mínimas diferencias técnicas.
  - ERP-PBCC. Formato de modulación combinada con codificación, opcional en 802.11b. Sigue siendo opcional, pero incorpora velocidades de 22 y 33 Mbit/s.
  - DSSS-OFDM. Formato opcional para compatibilidad con 802.11b. Preámbulo y cabecera se transmiten en DSSS y los datos en OFDM. La transición entre ambos formatos se trata con cierto detalle, ya que supone un cambio de reloj y el paso de portadora única a multiportadora.
- En la actualidad la mayor parte del equipamiento Wi-Fi utiliza 802.11b/g.



## IEEE 802.11n

- Utiliza canales de 20 y 40 MHz, en las dos bandas de 2,4 y 5 GHz.
- Modulación OFDM, similar a la del 802.11a, aunque permite combinaciones nuevas (64-QAM 5/6)
- Permite la transmisión de hasta 4 flujos binarios, con MIMO, lo que eleva la máxima tasa binaria a 600 Mb/s en el nivel físico.
- Parámetros para obtener 150 Mb/s:
  - BW = 40 MHz      - 108 portadoras datos      - 64-QAM 5/6
  - Tiempo útil 3,2  $\mu$ s      - T. de guarda 0,4  $\mu$ s (opcional)
  
  - Velocidad de símbolo:  $1/(3,6 \mu\text{s}) = 277,78 \text{ ksimb/s}$
  - Bits/símbolo:  $108 \times 6 = 648 \text{ bits brutos con 64-QAM}$
  - Bits netos por símbolo:  $648 \times 5/6 = 540$
  - Velocidad binaria neta:  $540 \times 277,78 \text{ ksimb/s} = 150 \text{ Mb/s por flujo binario}$

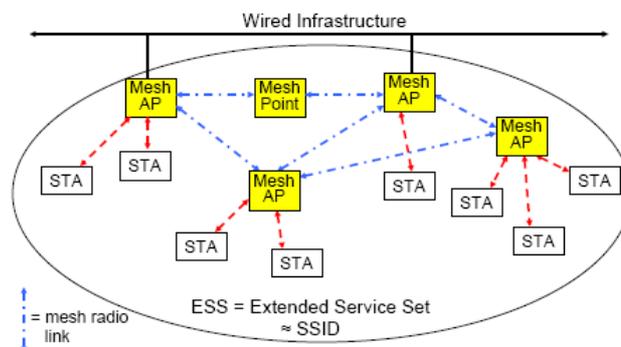


30



## Redes en malla ("mesh")

- Se utilizan en zonas abiertas, en exteriores. La ventaja es que no todos los puntos de acceso necesitan conexión directa a la infraestructura cableada.
- Los terminales no son especiales.
- En proceso de estandarización (802.11s).



31



## SISTEMAS y REDES WiMAX



## IEEE 802.16 y WiMAX

- La norma IEEE 802.16 se enmarca en la familia 802 de estándares para redes de área local y metropolitana. Define una interfaz aire para sistemas de acceso fijo inalámbrico de banda ancha, punto a multipunto, para servicios de WMAN.
- Establece una capa de control de acceso al medio (MAC, Medium Access Control), capaz de soportar múltiples especificaciones de nivel físico.
- La primera versión del estándar (2001) se especificó para aplicaciones en la banda 10-66 GHz. Incluía una especificación de capa física SC (*Single carrier*). En 2003 se publicó la especificación 802.16a, con tres nuevas especificaciones de capa física para operar entre 2 y 11 GHz.
- Todas las especificaciones para terminales fijos se agruparon en la norma IEEE 802.16-2004, (conocida también como 802.16d). En 2005 se aprobó la enmienda 802.16e, que incorpora movilidad para frecuencias hasta 6 GHz, con 15 Mbit/s.
- WiMAX (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*) es la denominación comercial de un subconjunto del estándar IEEE 802.16. Certificación de cumplimiento del estándar y de interoperabilidad gestionada por el denominado *WiMAX Forum*.



## RELACIÓN CON OTROS SISTEMAS

- Desarrollado en colaboración con el ETSI (HIPERMAN).
- LMDS: (*Local Microwave Distribution Systems*). Sistemas propietarios que ofrecen servicios de acceso. En España y en otros países se han instalado en dos modalidades:
  - Banda estrecha (3,5 MHz por canal) en la banda de 3,5 GHz. Aplicaciones de voz y datos a velocidades más bajas.
  - Banda ancha en la banda de 26 GHz. Aplicaciones de datos de alta velocidad.
- Originariamente, los estándares 802.16 se dirigen a las mismas aplicaciones, con las ventajas derivadas de la estandarización (coste reducido de terminales por economías de escala) e incorporando avances tecnológicos. En la actualidad, se plantean aplicaciones mucho más amplias, incluyendo movilidad.
- En comparación con Wi-Fi, es un sistema desarrollado para permitir distancias de hasta 50 km en exteriores, y con calidad de servicio.



Estándar	802.16	802.16a	802.16e
Espectro	10 - 60 GHz	< 11 GHz	< 6 GHz
Funcionamiento	Sólo con visión directa	Sin visión directa (NLOS)	Sin visión directa
Tasa de bits	32 - 134 Mbit/s con canales de 28 MHz	Hasta 75 Mbit/s con canales de 20 MHz	Hasta 15 Mbit/s con canales de 5 MHz
Modulación	QPSK, 16QAM, 64QAM	OFDM con 256 subportadoras QPSK, 16QAM, 64QAM	OFDM con 256 subportadoras QPSK, 16QAM, 64QAM
Movilidad	Sistema fijo	Sistema fijo	Movilidad pedestre
Anchos de banda	20, 25 y 28 MHz	Seleccionables entre 1,25 y 20 MHz	Seleccionables entre 1,25 y 20 MHz, con los canales de subida para ahorrar potencia
Radio de celula típico	2 - 5 km aprox.	5 - 10 km aprox. (alcance máximo de unos 50 km)	2 - 5 km aprox.

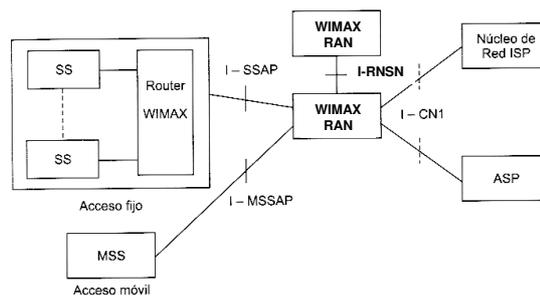


## CARACTERÍSTICAS Y APLICACIONES

- Acceso fijo inalámbrico (“última milla”) para aplicaciones de voz, datos, vídeo, etc.. Posibilidad de enlaces sin línea de vista.
- Servicios con conmutación de circuitos o paquetes, con calidad de servicio garantizada.
- Utilización en redes de transmisión, con red de acceso fija o móvil.
- Radioenlaces fijos de alta capacidad.
- Utilización en combinación con Wi-Fi
- Servicios especiales: localización, mensajería, etc...
- Primeros perfiles definidos por el *WiMAX Forum* para servicio fijo:
  - Banda de 3,5 GHz, con TDD o FDD. Canales de 3,5 y 7 MHz. Banda de uso privativo (con licencia). En caso de utilizar FDD, se prevé la transmisión dúplex o semidúplex, si los terminales de usuarios no disponen de la capacidad de transmitir y recibir simultáneamente.
  - Banda de 5,8 GHz, TDD. Canales de 10 MHz. Está prevista la canalización de 20 MHz, con capacidad hasta 75 Mbit/s. Banda de uso común (sin licencia).



## ARQUITECTURA DE WiMAX



SS: *Subscriber Station*

MSS: *Mobile Subscriber Station*

RAN: *Radio Access Network*

ISP: *Internet Service Provider*

I-SSAP: Interfaz SS-AP

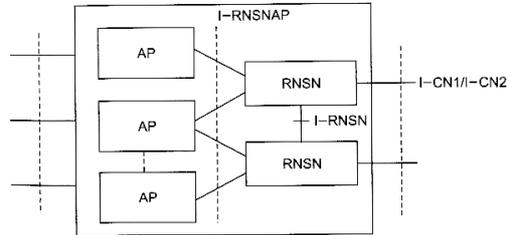
I-MSSAP: Interfaz MSS-AP

I-CN: Interfaz con el núcleo de red (*Core Network*).

I-RNSN: Interfaz ente servidores radio (*Radio Network Serving Node*)



## ARQUITECTURA DE WiMAX (2)



AP: *Access Point*

RNSN: *Radio Network Serving Node*

I-RNSAP: Interfaz RNSN-AP

I-CN: Interfaz con el núcleo de red  
(*Core Network*).

I-RNSN: Interfaz ente servidores  
radio (*Radio Network Serving Node*)

La figura muestra un detalle del WiMAX RAN



38



## CONTROL DE ACCESO AL MEDIO (MAC)

- En un sistema punto-multipunto es necesario implementar funciones de control de acceso al uso del medio. En 802.16 se prevé una estación central (BS, *Base Station*), posiblemente con antenas sectoriales, y eventualmente con varios radiocanales por sector. Los terminales de usuario se denominan SS (*Subscriber Stations*) ó MSS (*Mobile Subscriber Stations*).
- En sentido descendente los terminales que comparten el sector (de la estación central) y el canal de radiofrecuencia reciben todos los mensajes, pero se quedan solo con los que les están dirigidos. Puede haber también mensajes de difusión, dirigidos a todos los usuarios. Se utiliza TDM (*Time Division Multiplex*).
- En enlace ascendente todos los terminales comparten el canal. Se prevé una combinación de técnicas de asignación fija, *polling* y mecanismos de contienda. Se usan combinaciones de TDMA (*Time Division Multiple Access*) y DAMA (*Demand Assignment Multiple Access*), que aportan gran flexibilidad al sistema.



39



## MECANISMOS DE ACCESO AL MEDIO

- La capa MAC es del tipo orientado a conexión. Las conexiones se establecen, se mantienen (modificando sus características si es necesario) y se terminan. Los servicios de tasa fija (voz o datos) requieren escaso mantenimiento. En cambio el tráfico IP puede necesitar actualizaciones frecuentes del ancho de banda asignado.
- La calidad de servicio se implementa a través del flujo de servicio sobre la conexión.
- Los terminales pueden tener garantizado un cierto ancho de banda, por ejemplo para una conexión T1. Los mecanismos de *polling* permiten además la provisión de servicios de forma determinística cuando los terminales lo requieren. Para terminales con largos periodos de inactividad son más adecuados los mecanismos de contienda.
- En función del tipo de servicio y los retardos que se toleran pueden ser más adecuados unos mecanismos u otros.



## SUBCAPA DE PRIVACIDAD

- El estándar incluye una subcapa con funciones de encriptado en la interfaz aire para garantizar la privacidad del tráfico de usuario. Asimismo se proporciona seguridad al operador frente a accesos fraudulentos.
- Se incluyen mecanismos de autenticación de red y terminales, así como un sistema de gestión de llaves de encriptado.
- El sistema implementa dos componentes:
  - Un protocolo de encriptado de los datos en la interfaz aire.
  - Un sistema de gestión de llaves para proporcionar la distribución segura de las mismas. Este sistema adicionalmente se utiliza para proporcionar el acceso condicional a los servicios de la red.



## CAPA FÍSICA EN IEEE 802.16-2004 (FIJO)

- Consolida cuatro especificaciones:
  - WirelessMAN-SC (*Single Carrier*) es la del estándar original, para la banda de 10-66 GHz, en aplicaciones con visibilidad LOS (*Line of Sight*).
  - WirelessMAN-SCa (*Single Carrier*) es similar a la anterior, para la banda de 2-11 GHz. Más robusto para permitir el establecimiento de enlaces sin visibilidad NLOS (*Non-Line of Sight*).
  - WirelessMAN-OFDM. OFDM con 200 portadoras, moduladas en QPSK, 16-QAM y 64-QAM. Los sistemas fijos WiMAX se basan en esta especificación.
  - WirelessMAN-OFDMA. Multi-acceso OFDM. 2048 portadoras (no todas se usan). Subcanales para diferentes usuarios.
- WirelessHUMAN. Incorpora algunas cuestiones para operación en bandas sin licencia. Control de potencia y selección dinámica de frecuencia.
- En la práctica se utiliza OFDM para aplicaciones fijas. OFDMA se modificó más adelante para incorporar movilidad.



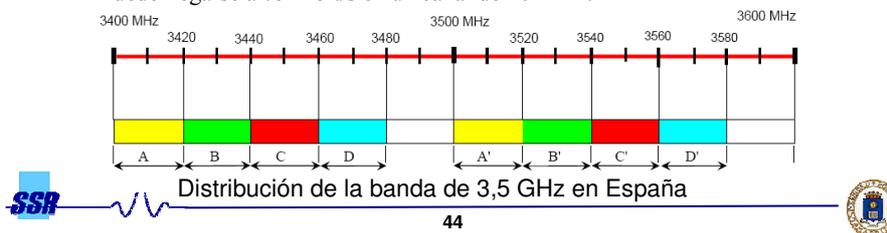
## CAPA FÍSICA OFDM EN 802.16

- Esta especificación es la que se utiliza en los sistemas WiMAX fijos.
- En la banda de 2-11 GHz en condiciones NLOS puede ser más eficiente la utilización de un esquema multiportadora. Es mucho más robusto frente al multitrayecto. La especificación OFDM tiene:
  - Modulación OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplex*) con FDD o TDD. Se basa en una FFT de 256 puntos, utilizando 200 portadoras. La separación entre las portadoras depende de la anchura de banda del canal.
  - Anchura de banda de 1,75; 3,5; 7 y 14 MHz (otras posibilidades, desde un mínimo de 1,25 MHz). Modulación de las portadoras desde BPSK hasta 64-QAM.
  - Codificación de canal robusta, con combinación de código bloque y convolucional o bien, opcionalmente, turbocódigos.
  - Adaptación a las condiciones del canal de propagación. Modulación y codificación adaptativas.
  - Soporte a técnicas avanzadas de antenas y de codificación espacio-temporal.



## CAPA FÍSICA OFDM EN 802.16 (2)

- En Europa se plantean dos aplicaciones principales:
  - Uso de la banda de 3,5 GHz, típicamente con canalización de 3,5 MHz y duplex por división de frecuencia (FDD). Se trata de una banda con licencia, en que los adjudicatarios disponen normalmente de dos subbandas (por ejemplo, A y A' en la figura).
  - Uso de la banda de 5 GHz, sin licencia, con canalización de 10 ó 20 MHz y duplex por división en el tiempo (TDD). Las condiciones de uso se han detallado anteriormente para el sistema Wi-Fi, en particular la nota UN-128 del CNAF.
- En el primer caso pueden utilizarse potencias más altas, obteniendo coberturas más amplias, pero la velocidad binaria se limita al orden de 13 Mbit/s por canal. En el segundo la potencia máxima está limitada a 1 W. Puede llegarse a 75 Mbit/s en un canal de 20 MHz.



## CAPA FÍSICA WIMAX: PARAMETROS

### Parámetros primarios

- BW: Anchura de banda del canal
- $N_{used}$ : Número de subportadoras utilizadas
- N: Factor de muestreo
- G: Relación tiempo guarda/tiempo útil

Valores del parámetro G

$$G = 1/2^m \quad m = \{2, 3, 4, 5\}$$

Valores del factor de muestreo

n	Anchura banda de canal BW, múltiplo de
8/7	1,75 MHz
86/75	1,5 MHz
144/125	1,25 MHz
316/275	2,75 MHz
57/50	2,0 MHz
8/7	Otros valores



### Parámetros derivados

- $N_{FFT}$ : Número de puntos de la FFT y subportadoras.
- Potencia de 2 inmediatamente superior a  $N_{used}$ .

- F : Frecuencia de muestro

$$F_s = \text{Floor}\left(\frac{n \cdot BW}{8000}\right) \cdot 8000 \quad (\text{KHz})$$

- $\Delta f$  : Separación entre subportadoras

$$\Delta f = F_s / N_{FFT}$$



- $T_b$ : Periodo útil de símbolo

$$T_b = 1 / \Delta f$$

- $T_g$ : Periodo de guarda

$$T_g = G \cdot T_b$$

- $T_s$ : Periodo de símbolo

$$T_s = T_b + T_g$$

- $T_{sam}$ : Periodo de muestreo

$$T_{sam} = T_b / N_{FFT}$$



### Modulación y Codificación

Modulación	Bloque Sin Codificar (Bytes)	Código RS	Código Conv	Bloque Codificado (Bytes)	OCR
BPSK	12	(12,12,0)	1/2	24	1/2
QPSK	24	(32, 24, 4)	2/3	48	1/2
	36	(40, 36, 2)	5/6	48	3/4
16QAM	48	(64, 48, 8)	2/3	96	1/2
	72	(80, 72, 4)	5/6	96	3/4
64QAM	96	(108,96,6)	3/4	144	2/3
	108	(120, 108,6)	5/6	144	3/4

Se cumple:  $N_{sub-datos} \cdot \log_2 M = 8 \cdot \text{Bloque-codif.}$

Ejemplo 64QAM :  $192 \cdot 6 = 8 \cdot 144$



## Ejemplo

Para  $BW = 3,5 \text{ MHz}$  ;  $N_{used} = 200$  ;  $n = 8/7$  ;  $G = 1/8$

Se tiene

$$N_{FFT} = 256$$

$$F_s = \text{Floor} \left[ \frac{(8/7) \cdot 3500}{800} \right] \cdot 8000 = 4000 \text{ KHz}$$

$$\Delta f = 4000 / 256 = 15,625 \text{ KHz}$$

$$T_b = 1000 / 15,625 = 64 \mu s$$

$$T_g = 64 / 8 = 8 \mu s$$

$$T_s = 64 + 8 = 72 \mu s$$

$$T_{sam} = 64 / 256 = 0,25 \mu s$$



50



Tasa binaria bruta

Para una modulación MQAM

$$R = \frac{N_{used} \cdot OCR \cdot \log_2 M}{T_s}$$

Ejemplo: Tasa máxima para  $M = 64$  y  $OCR = 3/4$

$$R = \frac{200 \cdot (3/4) \cdot 6}{72} = 12,5 \text{ Mb/s}$$



51



En un enlace, bajo control del planificador (scheduler), pueden utilizarse diferentes tipos de modulación y tasas de código como se ve en la Tabla que sigue

Modulación	Número de niveles, M	Tasa de código, OCR	Porcentaje P
BPSK	2	1/2	P <sub>1</sub>
QPSK	4	1/2	P <sub>2</sub>
	4	3/4	P <sub>3</sub>
16QAM	16	1/2	P <sub>4</sub>
	16	3/4	P <sub>5</sub>
64QAM	64	2/3	P <sub>6</sub>
	64	3/4	P <sub>7</sub>



Tasa binaria máxima

La tasa máxima es

$$R = \frac{N_{used} \cdot \sum OCR_i \cdot P_i \cdot \log_2 M_i}{T_s}$$

Ejemplo:

$$P_1 = 5\%; \quad P_2 = P_3 = 2,5\%; \quad P_4 = P_5 = 5\%; \quad P_6 = P_7 = 40\%$$

$$N_{used} = 192 \quad T_s = 72 \mu s$$

$$R = 9,97 \text{ Mb/s}$$



- Sensibilidad de recepción

La sensibilidad se evalúa así:

$$S = -114 + SNR + 10 \cdot \log \left[ F_s (\text{MHz}) \cdot \frac{N_u}{N_{FFT}} \right] + NF + MI$$

Siendo

SNR (dB): Relación señal/ruido

$F_s$  (MHz): Frecuencia de muestreo

$N_u$  : Número de portadoras útiles

$N_{FFT}$  : Tamaño de la FFT

NF(dB): Factor de ruido del receptor (valor típico 7 dB)

MI (dB): Margen de realización (valor típico 5 dB)



La relación señal/ruido (SNR) depende del tipo de modulación y de la Tasa del código.

Modulación	OCR	SNR (dB)
BPSK	1/2	6,4
QPSK	1/2	9,4
	3/4	11,2
16QAM	1/2	16,4
	3/4	18,2
64QAM	2/3	22,7
	3/4	24,4



## Tipos básicos de servicios WIMAX

- Servicios de Tasa Fija: CBR (Constant Bit Rate)  
Flujos de tráfico de caudal constante y recursos dedicados fijos, que generan un flujo regular de paquetes de tamaño fijo. Requieren estricta latencia.  
Parámetro de QoS:
  - Tasa de tráfico mantenida máxima fija.
- Servicios de Tasa Variable: VBR (Variable Bit Rate)  
Aplicaciones que generan tráfico fluctuante  
Ej: Video comprimido  
Parámetro de QoS:
  - Tasa de tráfico reservada mínima
  - Tasa de tráfico mantenida máxima
- Servicios de Tasa Marginal: BE (Best Effort)  
Utilizan recursos sobrantes. No tienen tasa garantizada. Aplicaciones de navegación web y transferencia de archivos con posibles interrupciones y caudal reducido.



## Ejemplo de servicios y tráfico

<u>Aplicación</u>	<u>Tipo de servicio</u>	<u>Tasa Kb/s</u>	<u>Peso (%)</u>
Multilayer interactive gaming	VBR	50	25
VoIP-Videoconference	CBR	32	10
Streaming	VBR	64	12,5
Web browsing Instant messaging		Nominal	32,5
Media content downloading		BE	20



Tipos y parámetros de demanda de tráfico

- Reservado
- Compartido

Se cuantifican según el tipo de usuario

- Residencial
- Comercial



- La simultaneidad de acceso de los usuarios, se cuantifica con la “relación de contienda”:

CR (Contention Ratio)

- Valores típicos:
  - Usuario residencial, CR = 30
  - Usuario comercial, CR = 10



Relación de “sobre abono”

OSR (Over suscription ratio)

$$OSR = \frac{\text{Capacidad total}}{\text{Capacidad de referencia}}$$

Valor típico: 60



60



La capacidad de referencia se define para BPSK

$$C_{ref} = \frac{N_{data}}{2T_s}$$

La capacidad total es

$$C_{tot} = N_{users} \cdot (P_{res} \cdot R_{nom-res} + P_{com} \cdot R_{nom-com})$$

$N_{users}$  : Número total de usuarios

$P_{res}$  : Porcentaje usuarios residenciales

$R_{nom-res}$  : Tasa nominal usuarios residenciales

$P_{com}$  : Porcentaje usuarios comerciales

$R_{nom-com}$  : Tasa nominal usuarios comerciales



61



- Tráfico BE

$$R_{BE} = \frac{R_{nom}}{CR}$$

Con los siguientes datos:

$$R_{nom-res} = 1000 \text{ kb/s}$$

$$P_{res} = 58\%$$

$$R_{nom-com} = 512 \text{ kb/s}$$

$$P_{com} = 42\%$$

Se tiene

$$\text{Usuario residencial } R = 512/30 = 17 \text{ kb/s}$$

$$\text{Usuario comercial } R = 1000/10 = 100 \text{ kb/s}$$



62



- Capacidad total para 100 usuarios

$$C_{tot} = 100 \cdot (0,58 \cdot 512 + 0,42 \cdot 1000) = 71.696 \text{ kb/s}$$

$$C_{ref} = \frac{192}{2,72} = 1,33 \text{ Mb/s}$$

$$OSR = \frac{71,696}{1,33} = 53,9$$



63



## Tráfico por sector celular

Método y ejemplo de calculo (tabla pág.. 57)

### 1. Demandas:

$$D_{\text{reservado}} = 0,25 \cdot 50 + 0,10 \cdot 32 + 0,125 \cdot 64$$

$$D_{\text{compartido-R}} = 0,325 \cdot BW_R + 0,20[BW_R - (50 + 32 + 64)]$$

$$D_{\text{compartido-C}} = 0,325 \cdot BW_C + 0,20[BW_C - (50 + 32 + 64)]$$

### 2. Tráfico

$$T_{\text{traf-R}} = N_{\text{usu}} \cdot P_{\text{res}} \cdot [D_{\text{reservado}} + (D_{\text{compartido-R}} / CR_R)]$$

$$T_{\text{traf-C}} = N_{\text{usu}} \cdot P_{\text{com}} \cdot [D_{\text{reservado}} + (D_{\text{compartido-C}} / CR_C)]$$

### 3. Tráfico total

$$Traf = Traf - R + Traf - C$$



## SITUACIÓN ACTUAL DE WiMAX.

- Existen ya en el mercado equipos certificados WiMAX para servicio fijo y equipos que dicen cumplir la especificación WiMAX móvil. Entre ellos están los denominados “WiBro”, desarrollados en Corea con especificaciones muy relacionadas. Las primeras certificaciones de WiMAX móvil se han concedido en 2008.
- WiMAX fijo tiene aplicaciones claras en que presenta una ventaja competitiva sobre otros sistemas.
- La tecnología móvil es compleja, aunque no más que UMTS y sus evoluciones. Se plantea como complemento o competidor de los sistemas móviles celulares.
- Su éxito en el mercado de datos de alta velocidad dependerá de muchos factores, como su incorporación generalizada a equipos informáticos (como Wi-Fi), y la disponibilidad de bandas (con o sin licencia).
- En este sentido, además de las bandas ya mencionadas, se está presionando para utilizar la banda de 2,5-2,6 GHz, actualmente atribuida a otros servicios, así como algunas frecuencias de UHF que queden libres con la transición a la televisión digital. (“dividendo digital”).

