

**Doctorado en Ingeniería Telemática:
Universidad de Vigo**

Redes Inalámbricas de Acceso

**Comparativa de IEEE 802.11 e IEEE
802.16: capas física y de enlace**



Junio de 2009

franmlsr@gmail.com Francisco Milagro Lardiés
albertolsa@gmail.com Alberto Los Santos Aransay

Tabla de Contenidos

1. Introducción	3
2. Introducción a las tecnologías IEEE 802.11 y 802.16	4
2.1 IEEE 802.11 (WLAN).....	4
2.2 IEEE 802.16 (WiMAX).....	10
3. Comparativa de las tecnologías.....	14
3.1. Ancho de banda	15
3.2. Sensibilidad frente a interferencias.....	17
3.3. Competencia por el canal	21
3.4. Calidad de servicio (QoS)	24
4. Evolución futura de las tecnologías.....	29
5. Conclusión	32
Referencias.....	33

Índice de figuras

Figura 1: Comparación de las tecnologías inalámbricas actuales.....	3
Figura 2: Capas del modelo OSI definidas por el estándar IEEE 802.11	4
Figura 3: Inter Frame Spacing	6
Figura 4: Problema con nodos ocultos.....	7
Figura 5: Mecanismo RTS/CTS.....	7
Figura 6: Mecanismo PCF	8
Figura 7: Capas del modelo OSI definidas por el estándar IEEE 802.16.....	10
Figura 8: Estructura OFDMA en WiMAX, las subportadoras del mismo color representan un subcanal	11
Figura 9: Escenario de comunicación con multi-camino [13]	17
Figura 10: Canales de comunicación en WiFi	18
Figura 11: Bandas de frecuencia	19
Figura 12: Mecanismo de calidad de servicio de 802.11 EDCF basado en colas ..	24
Figura 13: Mecanismo de calidad de servicio UGS [19]	26
Figura 14: Mecanismo de calidad de servicio rtPS	26
Figura 15: Mecanismo de calidad de servicio nrtPS	27
Figura 16: Mecanismo de calidad de servicio BE	27
Figura 17: Arquitectura CVIS	30
Figura 18: Escenario WiFi y WiMAX [23]	32

Índice de tablas

Tabla 1: Extensiones de la familia 802.11	9
Tabla 2: Distintas extensiones del estándar 802.16	12
Tabla 3: Comparación Wimax y WiFi.....	14
Tabla 4: Interfaz radio WiFi.....	15
Tabla 5: Características radio de los estándares 802.16.....	16

1. Introducción

Las tecnologías de comunicaciones evolucionan día a día vertiginosamente, principalmente debido a las crecientes necesidades demandadas por parte de los usuarios y servicios. Así, nuevos estándares surgen y otros son mejorados, para cubrir nuevos escenarios: comunicaciones en movimiento, mayores distancias, mayores tasas de transferencia, etc.

A priori, dentro del espectro de tecnologías actuales, Bluetooth y WiFi están diseñadas para soportar redes personales y locales, mientras que las tecnologías celulares junto con WiMAX pretenden cubrir áreas metropolitanas de mayor extensión. La competencia entre los distintos fabricantes de equipos y proveedores de servicios hace que se ideen nuevas soluciones para cubrir los requisitos antes citados y lograr mayor cuota mercado.

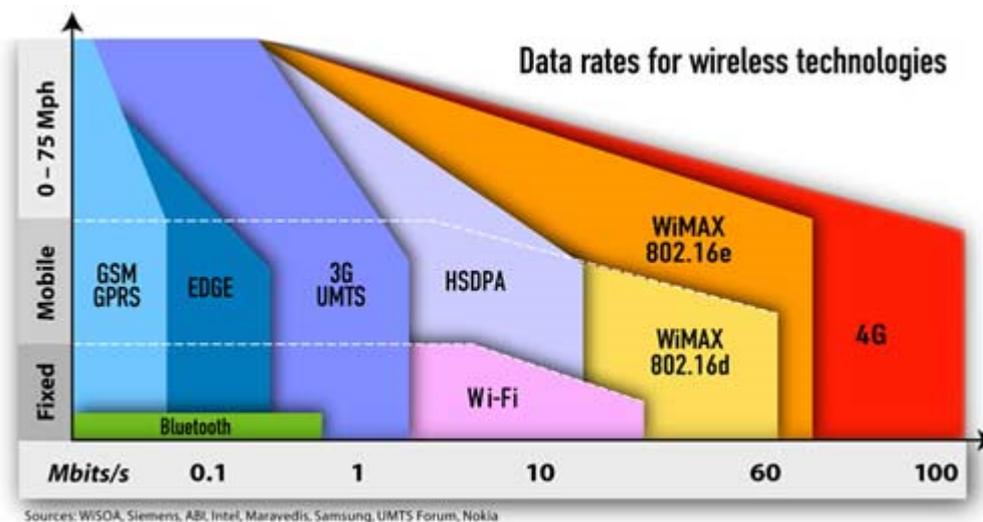


Figura 1: Comparación de las tecnologías inalámbricas actuales

En el presente documento trataremos la comparativa de las capas más bajas de los estándares IEEE 802.11 (WiFi) e IEEE 802.16 (WiMAX). Aunque parecen estar orientados a cubrir distintos escenarios, veremos cómo tienen muchas características en común, y cómo sus evoluciones tienen las mismas tendencias.

Después de esta introducción, se encuentra una descripción de ambas tecnologías, tratando sus principales características y sub-estándares. En el capítulo 3, se detalla la comparativa de las mismas, disponiendo de cuatro secciones, para tratar el ancho de banda, sensibilidad frente a interferencias, competencia por el canal y calidad de servicio respectivamente en cada una. En el capítulo 4, se ofrece la evolución de ambas tecnologías, y además la visión de la futura 4G y las redes todo IP, indicando las ideas que fundamentan la homogeneización de tecnologías y búsqueda de la conectividad global. Por último, en el capítulo 5 se presenta la conclusión.

2. Introducción a las tecnologías IEEE 802.11 y 802.16

2.1 IEEE 802.11 (WLAN)

También conocida como WLAN (*Wireless Area Network*) [1], este estándar nació en 1997 con el objetivo de proporcionar acceso inalámbrico a la redes de área local (LAN). Al igual que el resto de los estándares IEEE 802, el estándar se centra en los dos niveles inferiores del modelo OSI: capa física y capa de enlace de datos, como muestra la Figura 2.

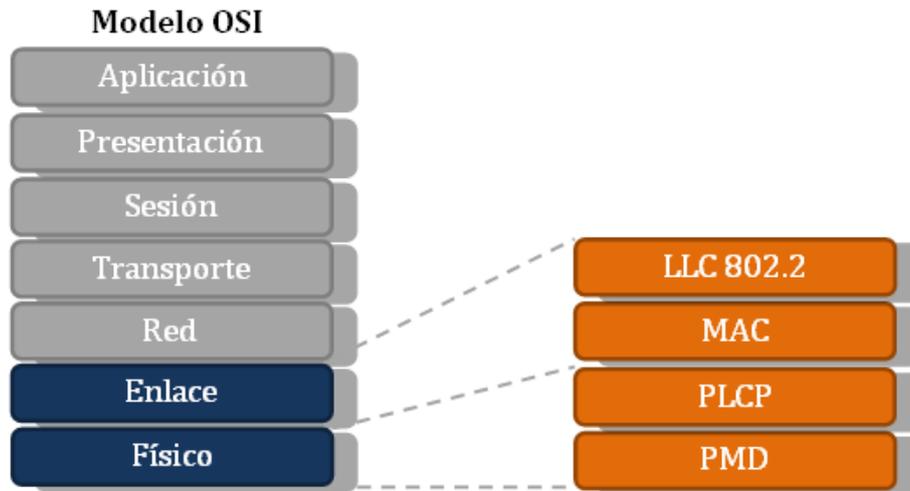


Figura 2: Capas del modelo OSI definidas por el estándar IEEE 802.11

En 802.11, la capa física se divide en dos subcapas: PMD y PLCP. La subcapa PMD (*Physical Medium Dependant*) se ocupa de la modulación y de la aplicación de técnicas de espectro ensanchado de la señal. De las técnicas de espectro ensanchado disponibles se eligió la secuencia directa (DSSS, *Direct Sequence Spread Spectrum*) en lugar de saltos de frecuencia (FHSS, *Frequency Hopping Spread Spectrum*) ya que esta última no cumplía las regulaciones impuestas por la comisión federal de comunicaciones FCC (*Federal Communications Comision*). La subcapa PLCP (*Physical Layer Convergent Procedure*) se encarga de acondicionar las tramas que provienen de la capa MAC para su envío a través del medio radio, añadiéndoles un preámbulo y una cabecera.

El primer estándar de esta familia fue IEEE 802.11 *legacy*, donde se especificaban dos velocidades de transmisión teóricas de 1 y 2 Mbit/s empleando como medio físico la transmisión de señales infrarrojas. En esta primera versión se especificó también el protocolo CSMA/CA (*Carrier Sense, Multiple Access, Collision Avoidance*), que especificaba el control de acceso al medio mediante la detección de portadoras para evitar colisiones. Esta versión del estándar no se llegó a implementar, ya que poco después aparecieron dos nuevas versiones: 802.11a y 802.11b.

En 802.11a se propuso emplear la banda de 5 GHz empleando 52 subportadoras con una modulación OFDM (*Orthogonal Frequency Division Modulation*) obteniéndose velocidades de hasta 54 Mbit/s (alrededor de 24 Mbit/s netos).

Por el contrario, en 802.11b [3] se propuso el empleo de la banda libre de 2.4 GHz con modulaciones DPSK (*Differential Phase Shift Keying*) y BPSK (*Binary Phase Shift Keying*) para las tasas de transmisión más bajas (1 y 2 Mbit/s) y QPSK (*Quadrature Phase Shift Keying*) combinada con la técnica de codificación CCK (*Complementary Code Keying*) para tasas de transmisión más elevadas (5.5 y 11 Mbit/s).

Ambas versiones del estándar emplean CSMA/CA para el control de acceso al medio. Aunque 802.11a operara en la banda de 5GHz, reduciendo la interferencia causada por otras tecnologías que trabajan en la banda de los 2.4GHz, como es el caso de Bluetooth, una frecuencia portadora tan elevada también produce desventajas. Limita su funcionamiento a situaciones en las que existe línea de visión (situaciones LOS, *Line Of Sight*), lo que reduce la distancia de comunicación, siendo ésta mucho menor que la conseguida con 802.11b

La siguiente revisión del estándar que introdujo modificaciones en la capa física fue 802.11g [4], que extendió 802.11a para operar en la banda de los 2.4 GHz. Al igual que ésta, emplea OFDM como técnica de modulación y alcanza tasas de transmisión de 54 Mbit/s, obteniendo un *throughput* neto de 24 Mbit/s. Además, permite interoperar con dispositivos equipados con 802.11b.

Por último, la revisión 802.11n [5] saldrá a la luz en pocos meses, aunque en el mercado ya se pueden encontrar diversos equipos basados en ella. Esta revisión se basa en sus predecesoras (sobre todo 802.11g) combinando el empleo de técnicas MIMO (*Multiple Input – Multiple Output*) para el empleo de varias antenas con la técnica llamada *Channel Bonding* (también conocida como 40 MHz) para permitir el empleo de dos canales de comunicación separados para la transmisión de datos. Además, se propone añadir la agregación de tramas en la capa MAC para reducir el *overhead* introducido por las cabeceras de la capa física. De esta forma se consigue incrementar la velocidad (600 Mbit/s teóricos, que se traducen en unos 110 Mbit/s para conexiones TCP) de transmisión sin incrementar mucho los costes de producción. Así mismo, esta revisión mantiene compatibilidad hacia atrás con sus predecesoras.

La capa de enlace se divide en dos subcapas, una de control de acceso al medio (MAC) y una de control del enlace lógico (LLC) que es común para todos los estándares 802.X.

La capa MAC define tres modos de acceso:

- DCF CSMA/CA (*Distributed Coordination Function CSMA/CA*): Es un protocolo de acceso múltiple basado en CSMA/CA (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*). Se basa en los mismos principios que IEEE 802.3 CSMA/CD pero adaptados al medio radio. Intenta resolver problemas como la movilidad de las estaciones, la variación de la calidad del enlace radio y la aparición de terminales ocultos.

Para el control de acceso al medio, emplea un mecanismo basado en prioridades llamado IFS (*Inter Frame Spacing*). Consiste en una serie de

pausas en las que las estaciones no envían y sólo escuchan el medio. Después de que termine una transmisión, una estación puede acceder al medio tras esperar un periodo de tiempo que depende del tipo de trama esperando a ser enviado, como muestra la Figura 3.

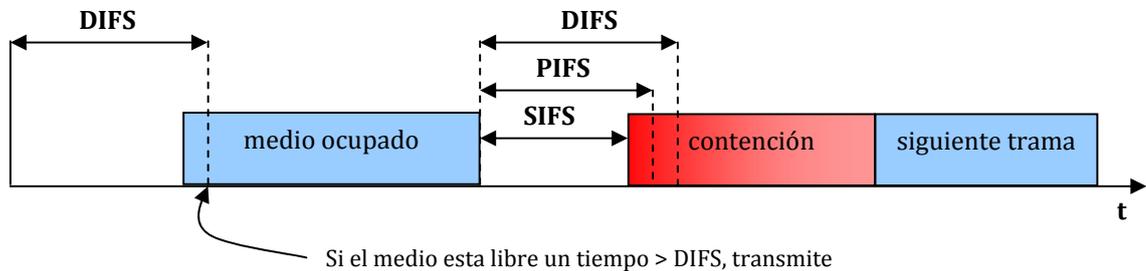


Figura 3: Inter Frame Spacing

Existen cuatro tipos distintos de tiempo de espera, con cuatro niveles de prioridad.

- SIFS (*Short IFS*): Máxima prioridad reservado para ACKs, CTS.
- PIFS (*PCF IFS*): Prioridad media, reservado para servicios que emplean el modo consulta de PCF.
- DIFS (*Distributed Coordination Function IFS*): Prioridad baja, para servicios de datos asíncronos.
- EIFS (*Extended IFS*): IFS de duración larga, empleada cuando una estación no ha sido capaz de entender el campo de duración de la trama. Esto evita que la estación no detecte la siguiente trama.

CSMA/CA no garantiza que se eviten todas las colisiones, pero reduce el tiempo durante el cual pueden ocurrir las colisiones. En el momento en que el canal ha estado libre un tiempo igual a DIFS, puede iniciarse la transmisión de la información. En este momento se inicia un periodo de contención, de duración aleatoria. Si al finalizar el periodo de espera el medio sigue libre, la estación comienza a transmitir.

Además, introduce el concepto del vector NAV (*Network Allocation Vector*). Se emplea para reservar el medio por un periodo de tiempo determinado. La mayor parte de las tramas poseen un campo reservado para NAV. Las estaciones que esperan a transmitir consultan el campo NAV hasta que posee un valor igual a cero, entonces se considera que el medio está libre.

Debido al tiempo de propagación de un paquete, existe la posibilidad de que dos estaciones comiencen a transmitir a la vez. Si se producen colisiones durante el periodo de contención, las estaciones emplean un mecanismo de "backoff". Las estaciones que han colisionado seleccionan un nuevo valor de "backoff", que incrementa el tamaño de la ventana de contención. Este valor crece en función del número de retransmisiones

hasta alcanzar un valor máximo. Además, si no se recibe el reconocimiento a una trama, también se aumenta la ventana de contención.

- DCF con RTS/CTS: Es una extensión de CSMA/CA, empleada para resolver el problema de los terminales ocultos. Este problema está representado en la Figura 4.

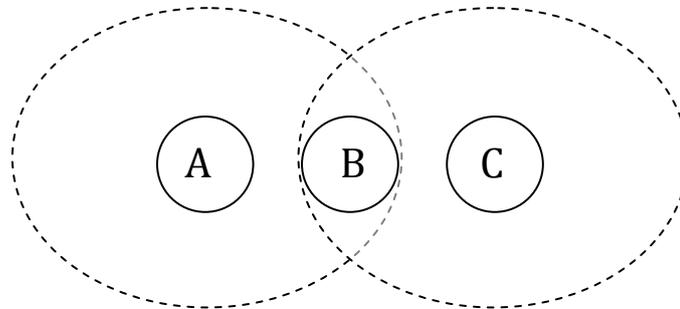


Figura 4: Problema con nodos ocultos

En este caso, A no es capaz de detectar los paquetes que C transmite, ya que se encuentra fuera de su rango. Esto puede originar colisión de paquetes en B, ya que ni A ni C son capaces de detectar su presencia.

Para evitar este tipo de problemas, existe un mecanismo denominado RTS/CTS (*Request to Send- Clear to Send*). Con él, cuando una estación necesita transmitir, envía primero un paquete de reserva RTS. Cuando el medio se encuentra libre, el punto de acceso responde a este paquete con un CTS que indica que la estación puede transmitir. Es un proceso costoso en términos de ancho de banda y sólo se emplea en redes muy densas con paquetes muy largos, en los que el coste de reenviar un paquete es muy elevado. La Figura 5 muestra un ejemplo de funcionamiento de este mecanismo.

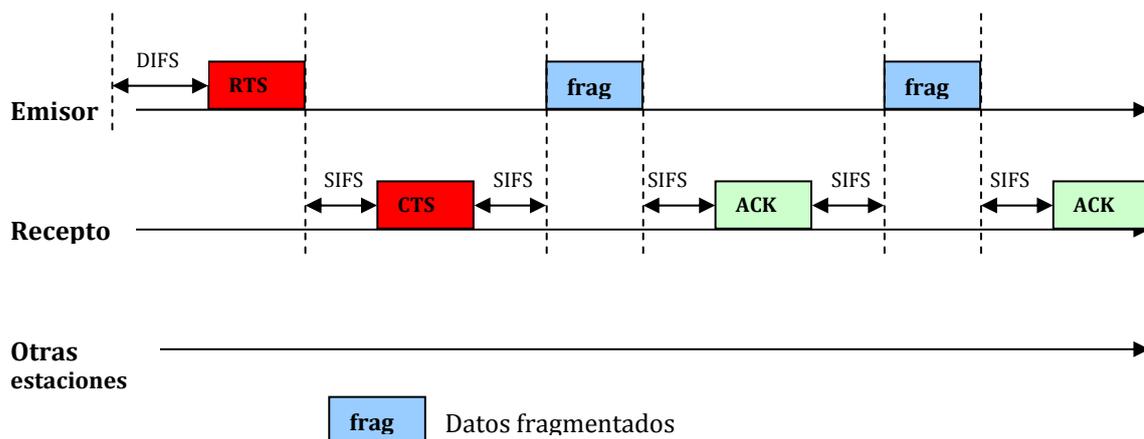


Figura 5: Mecanismo RTS/CTS

- PCF (*Point Coordination Function*): Protocolo de acceso para redes 802.11 operando en modo infraestructura. Permite garantizar la provisión de servicios sin contención, mediante un control de acceso centralizado, en el que se definen dos periodos, uno libre de contenciones (CFP) y uno sujeto a

contención (CP) que se alternan con el tiempo.

El punto de acceso (que es el punto de coordinación, PC) reúne a todos los nodos y les va dando acceso según una lista. Para ello, el coordinador, durante el periodo CFP posee una prioridad mayor (PIFS) sobre las estaciones. Un periodo CFP y CP forman una supertrama. Una supertrama siempre comienza con una trama de *beacon* que se emplea para el mantenimiento de los relojes locales en las estaciones y contiene parámetros propios del protocolo. En el período CFP, el esquema de DCF es empleado para el control de acceso al medio.

Este mecanismo de transmisión basado en PCF se muestra en la Figura 6.

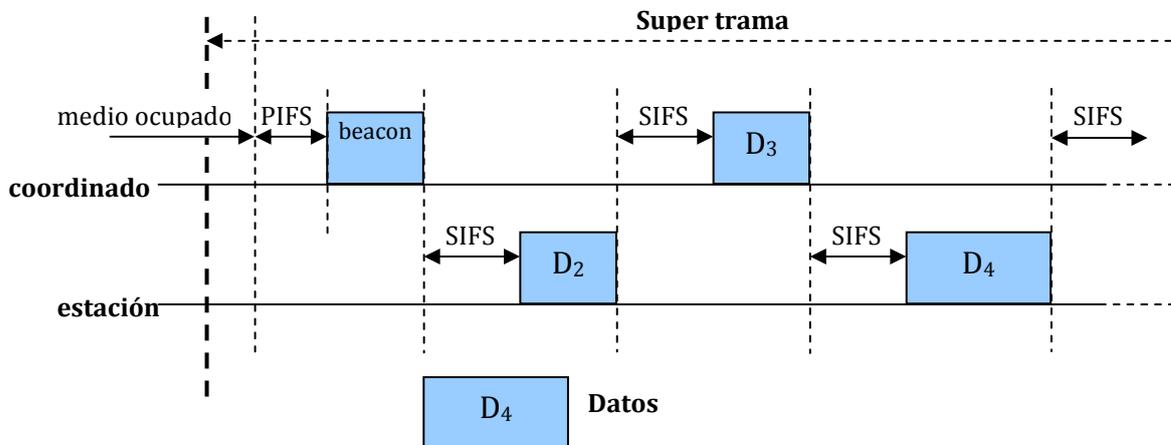


Figura 6: Mecanismo PCF

En la Tabla 1 se muestran todas las extensiones de 802.11 hasta la fecha (algunas en desarrollo, señaladas con *).

Estándar	Descripción	Estándar	Descripción
802.11a	5GHz OFDM PHY	802.11j	Extensión a la banda japonesa de 5GHz
802.11b	2.4GHz CCK PHY	802.11k	Medida de los recursos radio
802.11c	802.11 Bridging	802.11m	Mantenimiento
802.11d	Roaming internacional	802.11n	Capa física de elevado throughput (*)
802.11e	Mejoras de QoS	802.11p	WAVE. Entornos automóbiles(*)
802.11f	Protocolo Inter AP	802.11r	Fast Roaming(*)
802.11g	2.4GHz OFDM PHY	802.11s	Mesh Networking(*)
802.11h	Extensiones de regulación a 5GHz	802.11u	Convergencia con redes externas(*)
802.11i	Mejoras en la seguridad	802.11v	Wireless Network Management(*)

Tabla 1: Extensiones de la familia 802.11

2.2 IEEE 802.16 (WiMAX)

WiMAX es el acrónimo de *Worldwide Interoperability for Microwave Access*, una marca de referencia para los productos que han pasado los tests de interoperabilidad del estándar IEEE 802.16 [6]. Este estándar, que nació en 2001, define una tecnología de comunicaciones inalámbricas para reemplazar los bucles de abonado cableados por redes inalámbricas de área metropolitana, prometiendo grandes anchos de banda en transmisiones a larga distancia. El estándar, al igual que 802.11, define la capa física y la capa de control de acceso al medio (ver Figura 7).

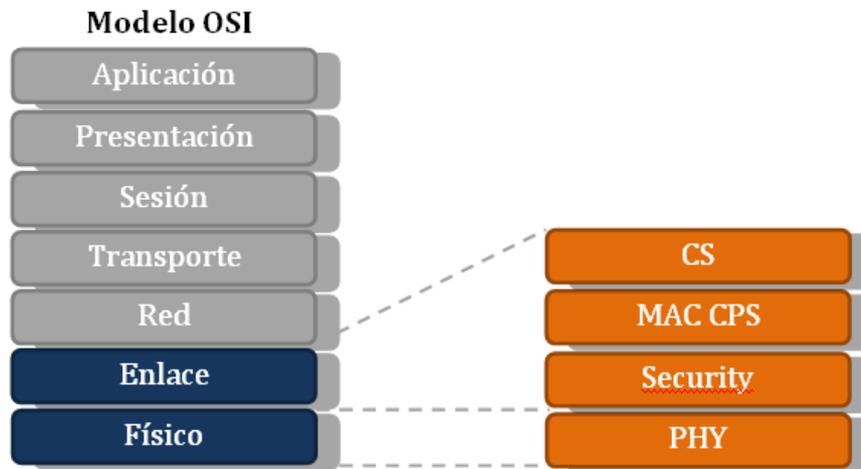


Figura 7: Capas del modelo OSI definidas por el estándar IEEE 802.16

El primer estándar de 802.16 fue aprobado en diciembre de 2001. En él, se definía el estándar para transmisiones punto a multipunto de banda ancha inalámbricos en la banda de 10-66 GHz, permitiendo comunicaciones únicamente en situaciones en las que existía línea de visión (LOS) con anchos de banda teóricos de hasta 120 Mbit/s y rangos de transmisión de hasta 50 Km.

A mediados de 2003, se definió el estándar 802.16a para proporcionar esta tecnología de comunicaciones en frecuencias más bajas, en el rango de 2-11 GHz y sin línea de visión directa (NLOS). Para ello, se seleccionó OFDM como esquema de multiplexado para la modulación de portadora. Uno de los principales problemas del estándar es que recogía un gran número de posibles capas físicas lo que producía grandes problemas de interoperabilidad. Por ello, en 2004 se definió el estándar 802.16d [7].

Uno de los principales problemas de 802.16 era su falta de tolerancia a la movilidad, por lo que en 2005 se estandarizó la versión 802.16e [8] (también conocido como *Mobile WiMAX*) que añadía soporte para la movilidad al estándar.

En 802.16 no existe una única modulación para la señal, sino que se contemplan distintos órdenes de modulación (BPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM) permitiendo adaptar el número de bits por símbolo a enviar regulando el *throughput* y la eficiencia espectral alcanzados según sea necesario. Esto permite que el sistema inalámbrico pueda seleccionar el orden de modulación en función de las condiciones

del canal. Esto se traduce en que, a mayor distancia, menor es el orden de modulación empleado. Además, 802.16 incluye técnicas de control de errores como *Strong Reed Solomon FEC*, codificación convolucional y entrelazado para detectar y corregir errores (sobre todo aquellos causados por errores en ráfagas) además de HARQ (*Hybrid Automatic Repeat Request*) incrementando el *throughput* obtenido. También incorpora algoritmos de control de potencia para regular el nivel de potencia transmitida, antenas de última generación (antenas inteligentes o *smart antennas*) y diversidad de antena (técnicas MIMO).

Como ya hemos visto anteriormente, para la multiplexación de la información se emplea OFDM (al igual que en WiFi), combinando múltiples portadoras moduladas solapadas espectralmente, pero manteniendo las señales moduladas ortogonales, de forma que no se producen interferencias entre ellas. Uno de los beneficios del empleo de OFDM es su buen comportamiento ante los retardos, lo que se traduce en un buen funcionamiento con señales multi-trayecto.

Para el control de acceso al medio, en 802.16 se consideran tres modos de acceso: TDMA con portadora simple, TDMA con OFDM y OFDMA. En los dos primeros, se emplea la división en tiempo para el acceso múltiple al medio. Para ello, la organización del enlace ascendente viene determinada por la estación base, que lo propaga a todos los terminales a través del enlace descendente. Al enlace descendente solo accede la estación base, por lo que no es necesario ningún mecanismo de control de acceso. Además, en la capa de control de acceso al medio se incorporan mecanismos necesarios para el acceso compartido al enlace ascendente, incluyendo mecanismos de resolución de colisiones.

En el estándar se propone otro método de multiplexación llamado OFDMA (*Orthogonal Frequency-Division Multiple Access*), que se trata de una extensión de OFDM. El problema de OFDM es que un único usuario puede transmitir sobre todas las portadoras en cualquier momento por lo que, para soportar múltiples usuarios, es necesario combinar esta técnica con técnicas de acceso múltiple por división en frecuencia o tiempo. Con OFDMA se permite que múltiples usuarios transmitan en diferentes subportadoras por cada símbolo OFDM, como se puede ver en la Figura 8. OFDMA es el único método de acceso al medio para 802.16e.

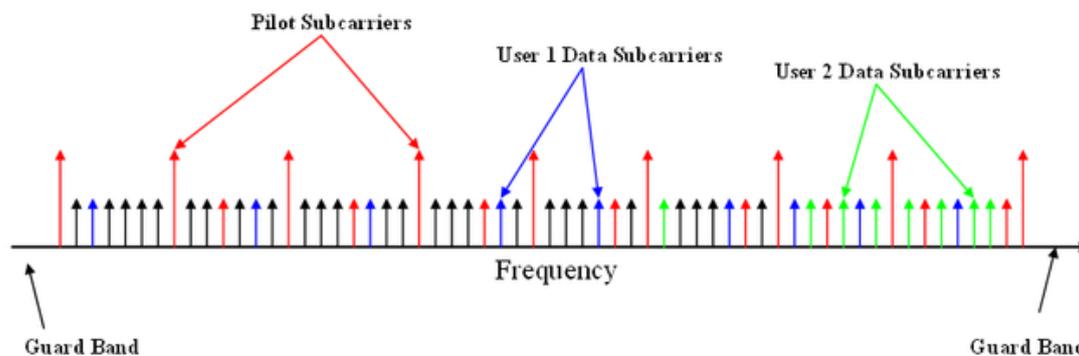


Figura 8: Estructura OFDMA en WiMAX, las subportadoras del mismo color representan un subcanal

En la Tabla 2, se muestran todas las extensiones de 802.16 hasta la fecha.

Estándar	Descripción	Estándar	Descripción
802.16	Banda 10-66 GHz	802.16f	Mesh WiMAX y roaming
802.16a	Inclusión de la banda 2-11 GHz	802.16g	Mobile Management Information Base
802.16b	Extensión QoS	802.16h	Mejora de la coexistencia de operaciones licenciadas
802.16c	Inclusión de los perfiles en banda 10-66 GHz	802.16i	Herramientas de control y administración de la información
802.16d	NLOS y reducción de alternativas en la capa física	802.16j	Acceso basado en Relays
802.16e	WiMAX mobile	802.16k	Bridging

Tabla 2: Distintas extensiones del estándar 802.16

Como hemos visto en la Figura 7 la capa MAC consiste en tres subcapas: la capa de convergencia de servicios (CS, *Service-specific Convergence*), la capa común (MAC CPS, *MAC Common Part Sublayer*) y la capa de seguridad.

La función principal de la capa CS es transformar o mapear los datos de las capas superiores (SDU, *Service Data Units*) en tramas apropiadas para la capa MAC CPS. Esto incluye la clasificación de las distintas tramas con identificadores de flujo de servicio (SFID) e identificadores de conexión (CID).

La capa MAC CPS proporciona la funcionalidad principal para el acceso al sistema, alojamiento de ancho de banda y el establecimiento y mantenimiento de las conexiones. Esta subcapa también se encarga de gestionar la calidad de servicio. La provisión de calidad de servicio es uno de los factores más importantes en la especificación de la capa MAC de WiMAX, ya que ha sido diseñada para soportar transmisiones multimedia con diferentes requisitos de calidad de servicio mediante el empleo de mecanismos de planificación. De esta forma, proporciona la posibilidad de ofrecer nuevos servicios inalámbricos como *streaming* de contenidos multimedia, vigilancia en tiempo real, voz sobre IP y conferencias multimedia.

Por último, la capa de seguridad se encarga de la autenticación, intercambio de claves seguro y encriptado de los datos.

En WiMAX se proporcionan dos modos de funcionamiento: punto a multipunto

(PMP) y multipunto a multipunto (*Mesh*). El modo PMP intenta reemplazar los accesos fijos a la red, en el que se proporciona acceso a la red a múltiples suscriptores a través de un proveedor de servicio centralizado. En este modo, las transmisiones del enlace ascendente desde las estaciones suscriptoras a la estación base tienen lugar en intervalos de tiempo separados (bajo demanda), mientras que en el enlace descendente, la estación base transmite ráfagas de paquetes MAC (PDUs) que son recibidas por todas las estaciones suscriptoras (pero solo procesan aquellas que van destinadas a cada una).

En el modo *Mesh* los nodos se organizan de una forma ad-hoc, por lo que no existen intervalos ascendentes y descendentes. Cada estación es capaz de establecer comunicaciones directas con otras estaciones en la red (no como en el modo PMP donde todas las comunicaciones pasan por la estación base). Además, se definen dos mecanismos de planificación de la transmisión de datos: centralizado y descentralizado. En el centralizado, las estaciones base trabajan como coordinadores y determinan la forma con la que las distintas estaciones base comparten el canal en los diferentes intervalos de tiempo. Por el contrario, en el modo descentralizado, cada nodo compete por el acceso al canal empleando algoritmos pseudo-aleatorios basándose en la información de planificación de sus vecinos a dos saltos. Además, este modo permite dos modos de planificación: coordinada y no-coordinada. La diferencia principal entre los dos es que en la planificación coordinada las tramas de control se planifican asegurando la ausencia de colisiones, mientras que en el no-coordinado, las tramas de control pueden sufrir colisiones.

3. Comparativa de las tecnologías

En este capítulo compararemos las tecnologías antes presentadas, WiFi y WiMAX, centrándonos en sus dos capas inferiores. En la capa física estudiaremos dos características, el ancho de banda y la sensibilidad frente a interferencias, en la capa de enlace revisaremos la competencia por el acceso al medio y la calidad de servicio.

Antes de pasar a cada sección, se presenta una tabla que resume las características básicas de los estándares base de WiMAX y WiFi [10].

	Wimax (802.11a)	WiFi (802.11b)	WiFi (802.11a/g)
Aplicación principal	Acceso wireless banda ancha	LAN wireless	LAN wireless
Banda de frecuencia	Licenciada/No licenciada 2GHz a 11GHz	2.4 GHz ISM	2.4 GHz ISM (g) 5 GHz U-NII (a)
Ancho de banda del canal	Ajustable 1.25 MHz a 20 MHz	25 MHz	20 MHz
Half/full duplex	Full	Half	Half
Tecnología radio	OFDM (256 canales)	DSSS	OFDM (64 canales)
Eficiencia en el ancho de banda	≤ 5 bps/Hz	≤ 0.44 bps/Hz	≤ 2.7 bps/Hz
Modulación	BPSK, QPSK, 16-, 64-, 254-QAM	QPSK	BPSK, QPSK, 16-, 64-QAM
FEC	Código Reed-Solomon Convolutacional	Ninguno	Código Convolutacional
Encriptación	Obligatorio 3DES Opcional AES	Opcional RC4 (AES en 802.11i)	Opcional RC4 (AES en 802.11i)
Protocolo de acceso	Request/Grant	CSMA/CA	CSMA/CA
- Best effort	Sí	Sí	Sí
- Prioridad de datos	Sí	802.11e WME	802.11e WME
- Retardo	Sí	802.11e WSM	802.11e WSM
Mobilidad	Mobile Wimax (802.11e)	En desarrollo (802.11p)	En desarrollo (802.11p)
Mesh	Sí	Propietario	Propietario

Tabla 3: Comparación Wimax y WiFi

3.1. Ancho de banda

Estudiaremos en esta sección la transmisión de datos que pueden soportar los estándares. Experimentalmente las tasas obtenidas son menores de las planteadas de forma teórica, primero por la inclusión de cabeceras de los protocolos, que disminuyen la efectividad de la transferencia de información; después debido a la calidad del enlace, ya que la atenuación de la señal debido a la distancia entre nodos, interferencias, obstáculos, movimiento relativo, produce retransmisiones, etc. que en definitiva hace disminuir la transferencia efectiva de información; por último, los propios dispositivos tienen mecanismos de adaptación de *bit rate*, disminuyendo la velocidad de envío cuando la calidad del enlace disminuye.

En el capítulo de introducción de las tecnologías, revisamos las tasas de transmisión de los distintos sub-estándares. 802.11 *legacy*, tenía como tasas máximas teóricas 1 y 2 Mbit/s, en 802.11a la tasa era de 54 Mbit/s, después 802.11b disponía de una tasa máxima de 11 Mbit/s y por último 802.11g, ofrece un límite de 54 Mbit/s, aunque el *throughput* neto es de 24 Mbit/s.

Standard	Ancho de Banda máximo	Canales provistos	Banda de frecuencia	Técnica radio
802.11	2 Mbit/s	3	2.4 GHz	FHSS o DSSS
802.11b	11 Mbit/s	3	2.4 GHz	DSSS
802.11a	54 Mbit/s	12	5 GHz	OFDM
802.11g	54 Mbit/s	3	2.4 GHz	OFDM

Tabla 4: Interfaz radio WiFi

A su vez, WiMAX en sus orígenes, prometía un ancho de banda teórico de hasta 120 Mbit/s, aunque de forma efectiva se logran aproximadamente 70 Mbit/s con un ancho de 20 MHz en condiciones óptimas.

Si bien la tasa de transmisión es importante, veremos en el siguiente capítulo que existen nuevos estándares en desarrollo que prometen tasas de hasta 600 Mbit/s para WiFi (802.11n, sobre el cual ya existen varios productos que cumplen un primer borrador del estándar N con un máximo de 300 Mbit/s, 80-100 estables) y hasta 100 Mbit/s para aplicaciones en movimiento y 1 Gbit/s para fijas en WiMAX mediante 802.16m, existen otras características a tener en cuenta como son el alcance de la comunicación y la eficiencia espectral.

El alcance de la comunicación WiFi está alrededor de los 30m – 100m, con equipos estándar en situaciones de visión directa sin obstáculos, mientras que WiMAX puede alcanzar transmisiones de hasta 50 kilómetros. Este alcance es debido a las bandas frecuenciales licenciadas usadas y a la potencia del transmisor, y por supuesto es afectado por el terreno, clima, edificios, etc. WiFi puede lograr también alcanzar largas distancias tanto en aplicaciones estáticas [11] como dinámicas (más de 5

Mbit/s a más de 3 Km. de distancia [12]), pero siempre en condiciones experimentales, ya que sería necesario radiar a mayor potencia de lo regulado y en ciertos casos usar antenas muy directivas.

En la siguiente tabla se presenta un resumen de las características de los estándares 802.16.

	802.16	802.16a	802.16e
Espectro	10 – 66 GHz	2 – 11 GHz	< 6GHz
Configuración	Line of Sight	Non- Line of Sight	Non- Line of Sight
Bit Rate	32-134 Mbit/s (28 MHz)	≤ 70 o 100 Mbit/s (20 MHz)	≤ 70 o 100 Mbit/s (20 MHz)
Movilidad	Fija	Fija	≤ 120 Km/h
Ancho de canal	20, 25, 28 MHz	Seleccionable 1.25 a 20 MHz	1.25 a 5 MHz
Radio del enlace	1.5 a 5 Km	5 Km a 50km	1.5 a 5 Km

Tabla 5: Características radio de los estándares 802.16

En comparación al 802.16e, el futuro 802.11p está siendo definido para ofrecer tasas de 54 Mbit/s, con un alcance de 400 metros y una velocidad máxima de 160 Km/h. Como se puede deducir y se hará notar en las conclusiones, los estándares parecen no estar orientados a cubrir las mismas aplicaciones.

Sobre las características expuestas en este apartado, hay que destacar que el estándar WiMAX supera ampliamente a WiFi en situaciones en las que no hay visibilidad directa y aparecen obstáculos entre los nodos, puesto que como ya se ha indicado, WiMAX toma ventaja de las posibles reflexiones para mejorar la comunicación en determinadas ocasiones, mientras que WiFi sufre grandes degradaciones de la señal en estos escenarios.

Por último, citar que WiMAX dispone de una gran eficiencia espectral, llegando a conseguir 5 bps/Hz, el doble que 802.11a (de 0.24 a 2.7 bps/Hz) y mucho mayor que 802.11b (de 0.04 a 0.44 bps/Hz), gracias a la combinación de esquemas de modulación y codificación, y en parte debido al uso de antenas inteligentes, propias de las redes celulares de 3G, como veremos en la siguiente sección. Esto permite incrementar la tasa de transmisión, sin aumentar el coste, o manteniendo la misma velocidad de transmisión, gestionar un mayor número de usuarios.

3.2. Sensibilidad frente a interferencias

Las interferencias causan la degradación de la comunicación, incrementando el nivel de ruido y por tanto disminuyendo el nivel SNR (señal a ruido). Estas interferencias pueden venir dadas por distintas fuentes:

- La propia señal al rebotar en obstáculos puede producir interferencia multi-camino generando en ocasiones desvanecimientos súbitos de la comunicación. El haz rebotado puede sumarse al original en contrafase, dando lugar a una resultante con poco nivel SNR.

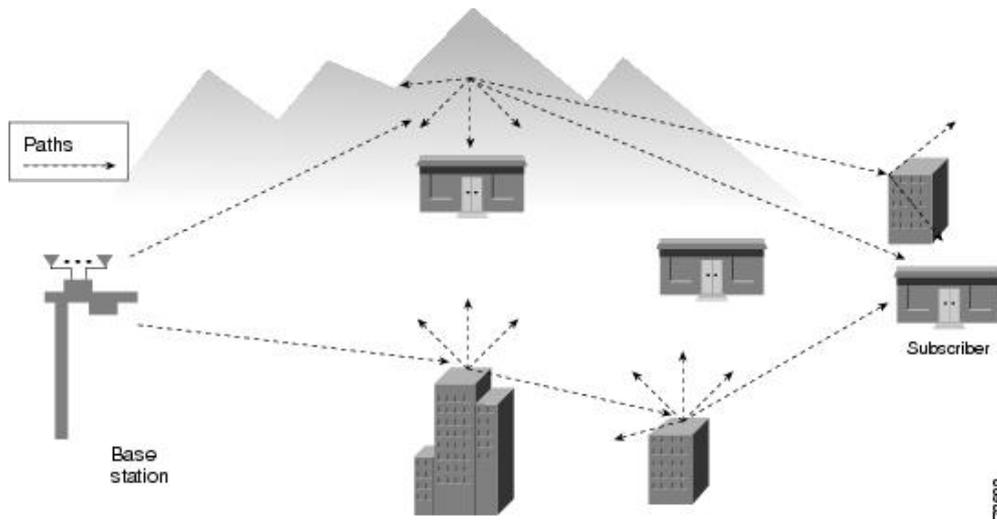


Figura 9: Escenario de comunicación con multi-camino [13]

OFDM [14] es una técnica de multiplexación multiportadora que proviene de la década de 1960, pero que ha resurgido en la actualidad por sus aplicaciones en transmisiones inalámbricas. La base del OFDM reside en la combinación de múltiples portadoras moduladas solapadas espectralmente, pero manteniendo las señales moduladas ortogonales, de manera que no se producen interferencias entre ellas. Además, es posible utilizar diferentes técnicas de modulación entre portadoras, con lo cual se consigue una funcionalidad extra.

En recepción, las portadoras deben ser separadas antes de demodular. En las técnicas de multiplexación tradicionales FDM, se utilizaban filtros paso-banda en cada una de las frecuencias, por lo que además de no solapar las bandas, era obligatoria la reserva de bandas de guarda. Un método de conseguir una mayor eficiencia espectral es solapar las portadoras, mediante el uso de una DFT (*Discrete Fourier Transform*) tanto en modulación como en demodulación, que es en lo que se basa OFDM. Para ello se hacen coincidir los lóbulos espectrales principales con los nulos del resto de portadoras, manteniendo la señal ortogonal.

De esta manera es posible incrementar la eficiencia espectral, sin tener interferencia entre los canales. Pese a ello, en

implementaciones reales existe una pequeña interferencia, que provoca que se pierda mínimamente la ortogonalidad como veremos en el siguiente punto.

El estándar 802.11b no se basa en OFDM, por lo que está muy expuesto a desvanecimientos súbitos debido al multicamino. 802.11a y 802.11g sí que se basan en OFDM, pero no son tan robustos frente a este tipo de interferencias como WiMAX, el cuál fue específicamente diseñado para tomar ventaja del multicamino y proveer comunicaciones NLOS (*Non-Line Of Sight*).

- Podemos detectar interferencias en nuestro enlace debido a la saturación de comunicaciones con la misma tecnología en el entorno. Así, como ya se ha explicado, en las distintas tecnologías existen varios canales de transmisión y recepción. Así, dos canales próximos se pueden producir interferencias mutuamente, resultando en la degradación de la señal en ambas comunicaciones.

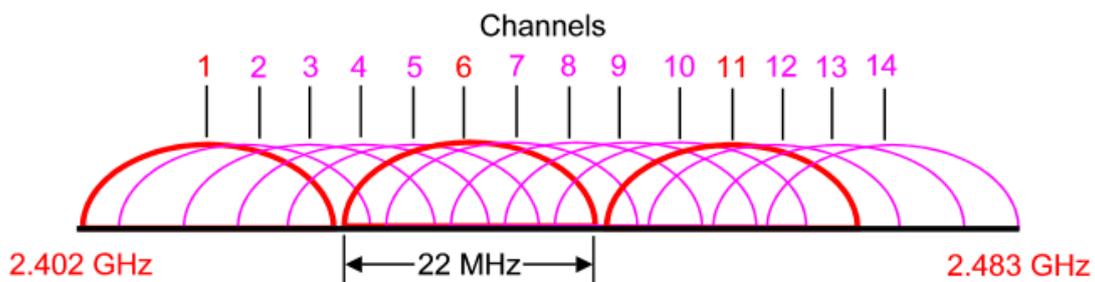


Figura 10: Canales de comunicación en WiFi

El estándar 802.11 divide el espectro en 14 canales que se solapan, a una distancia de 5MHz cada uno de ellos. Esto provoca que cada canal interfiera con los dos adyacentes a cada lado, ya que el ancho de banda es de 22MHz, a partir de donde la señal cae en 30 dB como mínimo. Es por ello que se recomienda optar por los canales 1, 6 u 11, que no presentan especiales solapamientos, produciéndose interferencias mínimas. Usando DSS, este efecto se ha visto disminuido, pero no eliminado.

En cuanto a WiMAX, no hay una banda de frecuencias de trabajo única, dependiendo del país y de los operadores. Las bandas con licencia (2.5 GHz – 3.5 GHz) permiten conseguir una mejor característica NLOS (además de LOS), pero en ocasiones resultan demasiado caras, por lo que los operadores plantean desplegar su servicios sobre bandas de uso libre, reguladas en potencia máxima de emisión, y expuestas a mayores interferencias.

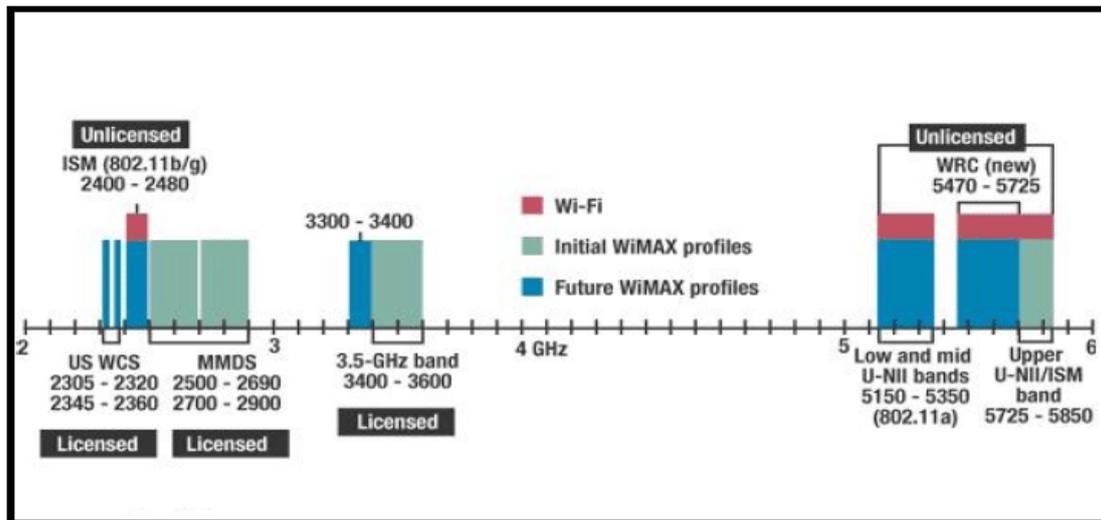


Figura 11: Bandas de frecuencia

El estándar WiMAX tiene a su disposición un mayor número de portadoras para enviar la información (superior a 2048), siendo de nuevo más efectivo ante interferencias, puesto que puede distribuir mejor los distintos canales en el espectro.

- Interferencias entre tecnologías y otras fuentes de microondas. Existen tecnologías que operan en la misma banda de frecuencias, por ejemplo 802.11b y Bluetooth (y Zigbee en ocasiones) en 2.4 GHz, por lo que en caso de encontrarse los dispositivos en el alcance, la comunicación puede también empeorar.

Los estándares 802.11b y 802.11g usan la banda sin licencia de 2.4GHz, sujeta a interferencias de microondas o teléfonos inalámbricos, mientras que el estándar 802.11a cubre la banda de 5GHz, que al ser un rango de frecuencias más alto, está más expuesto a sufrir pérdidas, y traspasa peor obstáculos.

Quizás la mayor ventaja de WiMAX sobre WiFi es que opera en varias bandas de frecuencia bajo licencia, lo que elimina la interferencia y cacofonía propia de las bandas no sujetas a licencia. Un servicio bajo licencia está sujeto a una legislación que permite que los transmisores WiMAX pueden alcanzar una mayor potencia, puedan ser fácilmente expandidos o ampliados, permitiendo una cobertura de más de 1 km, o al menos unas 20 veces más que la alcanzada por una estación base de WiFi. WiMAX permite cubrir toda una ciudad con sólo una docena de estaciones base.

Estas interferencias en las tecnologías radio pueden intentar ser evitadas, o al menos paliadas, por ejemplo con técnicas MIMO (*Multiple Input Multiple Output*) o *smart antennas*. Las *smart antennas* mejoran su rendimiento mediante la combinación de las dimensiones espaciales de la antena con la dimensión temporal. Existen dos tipos básicos que son:

- Antenas de array en fase o multi-haz: Pueden usar un número de haces fijos escogiendo el más adecuado o con un haz enfocado hacia la señal deseada que se mueve con ella.
- Array de antenas adaptativas: Utilizan múltiples elementos de antena que gestionan la interferencia y ruido recogido con el objetivo de maximizar la recepción de la señal. El patrón del haz varía con el entorno del canal.

Los sistemas MIMO son una variedad de sistemas con diversidad, que utilizan múltiples antenas tanto para recibir como para transmitir. Una transmisión de datos a tasa elevada se divide en múltiples tramas más reducidas. Cada una de ellas se modula y transmite a través de una antena diferente en un momento determinado, utilizando la misma frecuencia de canal que el resto de las antenas. Debido a las reflexiones por multitrayecto, en recepción la señal a la salida de cada antena es una combinación lineal de múltiples tramas de datos transmitidas por cada una de las antenas en transmisión.

Como ya se ha citado, el futuro estándar 802.11n incorporará estas técnicas MIMO para incrementar la tasa de transmisión de la tecnología. Por otra parte, WiMAX por defecto se basa en un esquema de diversidad que envía información desde dos antenas transmisoras, con dos transmisiones consecutivas en el tiempo. Es por ello que la técnica recibe el nombre de combinación espacio-tiempo, aunque es más conocida como transmisión *Alamouti* [16].

Así para una subportadora determinada, este esquema de transmisión envía el símbolo X por la antena 1, mientras que el símbolo Y por la antena 2, mientras que en el instante de tiempo siguiente lo hace al revés. De esta manera, el receptor, que puede ser una única antena, puede aplicar diversidad al recibir el mismo símbolo por canales y periodos diferentes. Por eso se habla de una tecnología MISO (varios transmisores un receptor), en contraposición al MIMO.

En el receptor, WiMAX propone el uso de MRC (*Maximal Ratio Combining*). Se trata de una técnica de diversidad combinada, que es óptima, ya que alinea las fases de las portadoras de los receptores y ofrece una mejora proporcional a la amplitud de la señal de las portadoras recibidas. Este método se ha verificado como es óptimo para canales con ruido independiente.

3.3. Competencia por el canal

El control de acceso al medio es el conjunto de mecanismos y protocolos por los que varios nodos se ponen de acuerdo para compartir un medio de transmisión común, o en comunicaciones inalámbricas el rango de frecuencias asignado al sistema. Al disponer de recursos limitados, es necesario compartirlos, de ahí que también se denomine competencia por el canal o multiplexado.

Estos mecanismos recaen en la capa MAC (*Medium Access Control*), que se encuentra inmediatamente encima de la capa física. La capa de acceso, tal como lo sugiere su nombre, determina tanto el modo en que los abonados accederán a la red, como la forma en que los recursos de la red se asignarán a estos.

Algunas de las funciones de la subcapa MAC incluyen:

- Controlar el acceso al medio físico de transmisión por parte de los dispositivos que comparten el mismo canal de comunicación.
- Agregar la dirección MAC del nodo fuente y del nodo destino en cada una de las tramas que se transmiten.
- Al transmitir en origen debe delimitar las tramas agregando bits de bandera (*flags*) para que el receptor pueda reconocer el inicio y fin de cada trama.
- Al recibir en destino debe determinar el inicio y el final de una trama de datos dentro de una cadena de bits recibidos por la capa física.
- Efectuar detección y, si procede, corrección de errores de transmisión.
- Descartar tramas duplicadas o erróneas.

Como ya se ha visto en el capítulo 2, la capa MAC en WiFi define tres modos. El primero, DCF CSMA/CA, protocolo de acceso múltiple basado en CSMA/CA que intenta resolver problemas como la movilidad de las estaciones, la variación de la calidad del enlace radio y la aparición de terminales ocultos usando un mecanismo basado en prioridades llamado IFS. El segundo, DCF con RTS/CTS, el cuál es una extensión de CSMA/CA, empleada para resolver el problema de los terminales ocultos. Por último, PCF, protocolo de acceso para redes 802.11 en modo infraestructura, que permite garantizar la provisión de servicios sin contención, mediante un control de acceso centralizado, en el que se definen dos periodos, uno libre de contenciones (CFP) y uno sujeto a contención (CP) que se alternan con el tiempo.

El diseño de la capa MAC según el IEEE 802.16-2004 y el IEEE 802.16e-2005, incluye tres subcapas [17]:

- Service-Specific Convergence Sublayer (CS): Se encarga de transformar los datos de las redes externas y pasarlos a la MAC CPS convertidos en *service data units* (SDU), que son las unidades de datos que se transfieren entre capas adyacentes. Se encuentra sobre la MAC CPS y utiliza los servicios proveídos por ésta.
- MAC Common Part Sublayer (MAC CPS): Es el *core* de la toda la capa MAC, provee los servicios de acceso al sistema, asignación de ancho de banda, establecimiento y mantenimiento de la conexión. En esta subcapa

se prestan los servicios de planificación que representan los mecanismos de manipulación de datos soportados por el planificador de la MAC para el transporte de datos en una conexión, cada una de las cuales está asociada a un solo servicio de datos el cual a su vez, está asociado a unos parámetros de QoS que son quienes determinan su comportamiento. Existen cuatro tipos de servicios que veremos en la siguiente sección:

- Concesión no Solicitada (UGS).
 - *Polling* en tiempo real (rtPS).
 - *Polling* no en tiempo real (nrtPS).
 - Mejor Esfuerzo (BE).
- Security Sublayer: Presta los servicios de autenticación, intercambio seguro de claves y cifrado. Permite proveer a los usuarios un servicio de banda ancha seguro a través de su conexión fija mediante el cifrado de las conexiones, y al operador protegerse contra las conexiones no autorizadas forzando el cifrado.

Para WiMAX se contemplan tres modos de acceso como se describe en el capítulo 2, TDMA con portadora simple, TDMA con OFDM y OFDMA. El funcionamiento de WiMAX se adapta al escenario, así en topologías Punto-Multipunto (PMP), el *downlink* se controla mediante una estación base (BS) centralizada y una antena sectorizada que es capaz de manejar varias zonas simultáneamente. Dentro de un canal de frecuencia y un sector de antenas dado, sólo existe una BS transmitiendo, de manera que no se tiene que coordinar con las demás BS, excepto en la multiplexación de tiempo. El *downlink* es generalmente de tipo *broadcast* y el *uplink* se maneja bajo demanda dependiendo de la clase de servicio. La capa MAC es orientada a la conexión. Para propósitos de relacionar los servicios a las SS (*Subscriber Stations*) y asociarlos a los diferentes niveles de calidad de servicio (QoS), todas las comunicaciones de datos están en el contexto de una conexión. El flujo de servicio debe ser suministrado en el momento en el que la SS se instala en el sistema y justo después de que se registra; las conexiones se deben asociar a ese flujo de servicio para tener una referencia al hacer las peticiones de ancho de banda. El flujo de servicio define los parámetros de QoS de los *packet data units* (PDU) que se intercambian durante la conexión.

La otra configuración es *Mesh*, en las que la comunicación se puede hacer entre los diferentes nodos y no sólo entre nodo y estación base. Para este tipo de redes, se pueden realizar las operaciones de dos maneras diferentes: distribuida ó centralizada. Para la distribuida, todos los nodos deben coordinar con los demás la manera de transmitir para evitar colisiones con los datos y realizar el control de tráfico, y además deben enviar por difusión (*broadcast*) su respectivo estado (recursos disponibles, peticiones y concesiones) a todos sus vecinos; para la centralizada, los recursos se asignan de una manera más concentrada, ya que la estación base *Mesh*, recopila varias peticiones de un determinado sector y otorga los respectivos recursos para cada enlace, tanto para el *downlink* como para el *uplink*, al mismo tiempo que comunica estas decisiones a las demás estaciones del sector.

Si comparamos las dos tecnologías, vemos la enorme diferencia en la implementación de la capa MAC, lo que se traduce en un rendimiento totalmente diferente [18].

- 802.11 (WiFi) usa una MAC muy similar a la MAC Ethernet. El acceso al medio no está controlado, por lo que se basa en algoritmos de escucha y espera aleatoria. Si una estación quiere transmitir, escucha el canal, y si está libre, transmite, si no, espera un tiempo aleatorio. Estos algoritmos no garantizan la ausencia de colisiones, especialmente dado que no todas las estaciones inalámbricas son capaces de escucharse. El propio concepto de espera aleatoria indica la presencia de instantes de silencio en los que el canal no está siendo empleado. En definitiva, la MAC no es determinista (se basa en algoritmos aleatorios) y no es eficiente. De hecho, la eficiencia MAC del estándar 802.11 llega como mucho al 40%, proporcionando 22 Mbit/s netos de una capa física de 54 Mbit/s. Esa eficiencia además varía, ya que el comportamiento no es determinista. Por eso los fabricantes de equipamiento WiFi nunca indican el *throughput* neto, sino la capacidad a nivel físico. No es posible garantizar el *throughput* neto en una MAC estadística.
- En 802.16 (WiMAX) PMP, el acceso al medio está controlado por la estación base. Ninguna estación suscriptora transmite sin permiso de la estación base. La transmisión se realiza en tramas de longitud constante perfectamente organizadas por la estación base. De este modo se garantiza la ausencia de colisiones y silencios, por lo que se logra la máxima eficiencia MAC con un comportamiento determinista. La eficiencia MAC de WiMAX llega al 92%, proporcionando un *throughput* de casi 35 Mbit/s de una capa física de 37.7 Mbit/s. WiMAX puede garantizar el *throughput* neto, que es un parámetro mucho más interesante a nivel de sistema que la capacidad a nivel físico. Eso sólo se puede lograr gracias al determinismo de la MAC.

3.4. Calidad de servicio (QoS)

Una de las limitaciones del control de acceso al medio en 802.11 es que no incorpora prácticamente ningún mecanismo de calidad de servicio (QoS) para por ejemplo soportar aplicaciones en tiempo real con garantías, como la transmisión de video o voz. DCF solamente soportan servicios *best-effort* sin contemplar la garantía de ancho de banda, *delay* o *jitter* y el *throughput* sufría degradaciones en situaciones de gran carga en la red. PCF si que incorporaba provisión de calidad de servicio, pero resultaba ineficiente. Para ello, se creó en 1999 el grupo de trabajo 802.11e [9] cuyo cometido era incorporar mecanismos para la provisión de calidad de servicio en WLAN. Se definieron dos nuevos modos de acceso a nivel MAC: EDCF (*Enhanced DCF*) y HCF (*Hybrid Coordination Function*).

En EDCF se introducen diferentes categorías de tráfico (TC). Los paquetes se entregan a través de múltiples instancias de *backoff* en una estación, cada una de éstas parametrizada con parámetros específicos dependiendo de la categorías de tráfico. Así mismo, el tamaño mínimo de la ventana de transmisión también se modula con las distintas categorías de tráfico y el tamaño no se incrementa al doble cuando llega una confirmación sino que depende otra vez de la categoría de tráfico para evitar colisiones. Para poder implementar este mecanismo de calidad de servicio, una sola estación puede implementar hasta ocho colas de transmisión que son tratadas como estaciones virtuales que poseen distintos parámetros de calidad de servicio que determinan las prioridades de cada tráfico.

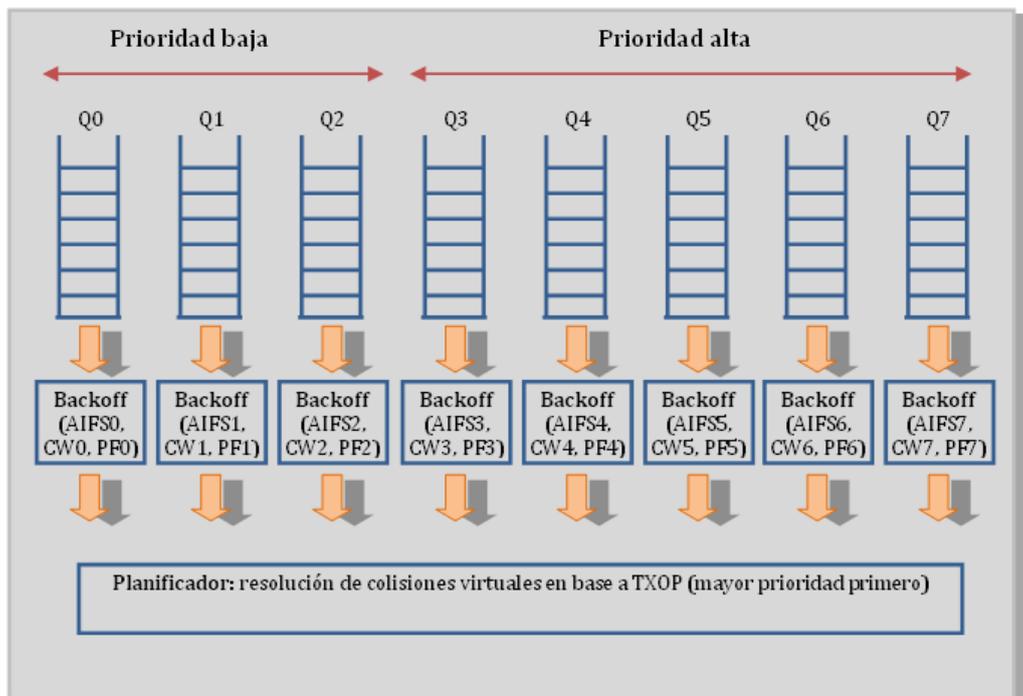


Figura 12: Mecanismo de calidad de servicio de 802.11 EDCF basado en colas

También se define un nuevo intervalo llamado TXOPs (Oportunidad de Transmisión). Se trata de un intervalo de tiempo en el que una estación tiene el derecho de iniciar transmisiones (quedando definido por un tiempo de inicio y una duración máxima).

La forma de obtener estos privilegios es mediante contención en modo DCF (EDCF-TXOP) o bajo demanda en el modo HCF (llamados *polled-TXOP*).

El modo de acceso HCF se etiqueta como Híbrido ya que puede ser empleado tanto en los periodos de contención (CP) como en los periodos libres de contención (CFP). Para ello se define el Coordinador Híbrido (HC) que se encarga de gestionar la provisión de calidad de servicio a las distintas estaciones base. El HC suele estar localizado dentro del punto de acceso, aunque el estándar permite que sea otra estación base la que realiza la coordinación. El HC se encarga de adaptar los parámetros de calidad de servicio, anunciando los cambios a las estaciones mediante las tramas de *beacon*.

Además, en 802.11e se define un control de acceso al medio adicional que permite la resolución rápida de colisiones. Este control de acceso se realiza mediante el HC, que se encarga de preguntar a las estaciones base por la entrega de los paquetes de servicio. Este mecanismo permite que las estaciones base requieran la reserva de Oportunidades de Transmisión enviando las peticiones de reserva sin luchar con tramas del modo EDCF. Para ello, el HC envía unas tramas específicas de control que fuerzan a las estaciones no compatibles con 802.11e a esperar en silencio durante el intervalo que dura la contención. Además, para la resolución rápida de colisiones, el HC manda confirmaciones de recepción mediante otro tipo de tramas de control.

Al contrario que 802.11, 802.16 fue diseñado teniendo en cuenta una amplia variedad de tipos de tráfico para satisfacer las necesidades de las distintas aplicaciones como la Voz IP, la transmisión de audio y video o la navegación por Internet y la transmisión de ficheros.

La característica principal de la calidad de servicio en 802.16 y lo que lo distingue de sus competidores (como 802.11 o 3G) es la asociación de cada paquete con un flujo de servicio (por lo que se dice que es orientado a conexión a nivel MAC). A cada conexión se le asigna un identificador de conexión (CID) y un identificador de flujo de servicio (SFID) que tiene asociada una clase de servicio determinada. Un flujo de servicio se define como un flujo unidireccional de tramas MAC con una conexión asociada con parámetros de calidad de servicio específicos como latencia, *jitter* y *throughput*. Estos parámetros se emplean en la capa MAC para la planificación y la transmisión de las tramas.

Existen tres tipos básicos de flujos de servicio: flujos aprovisionados, flujos admitidos y flujos activos. Un flujo de servicio suministrado se define en el sistema con un SFID pero puede ser que no tenga ninguna presencia de tráfico porque se encuentra esperando a ser activado para ser empleado. Un flujo admitido se encuentra en proceso de activación, en el que la estación base comprueba que dispone de recursos suficientes para proporcionar el servicio con los parámetros de calidad de servicio solicitados. Si dispone de recursos suficientes, el flujo se marca como activo, aunque los recursos asignados pueden ser empleados por otros flujos.

Otro mecanismo de calidad de servicio en WiMAX son los servicios de concesión de ancho de banda, que definen la asignación de un ancho de banda en función de los

parámetros de calidad de servicio asociados con una conexión. Para la concesión de anchos de banda correcta, se definen cuatro tipos de servicio

- UGS (*Unsolicited Grant Service*): Diseñado para soportar tráfico en tiempo real con tasas constantes, como puede ser el tráfico originado por aplicaciones de VoIP (Voz IP). Se proporcionan oportunidades de transmisión de tamaño fijo en intervalos regulares de tiempo sin la necesidad de realizar peticiones o sondeos.

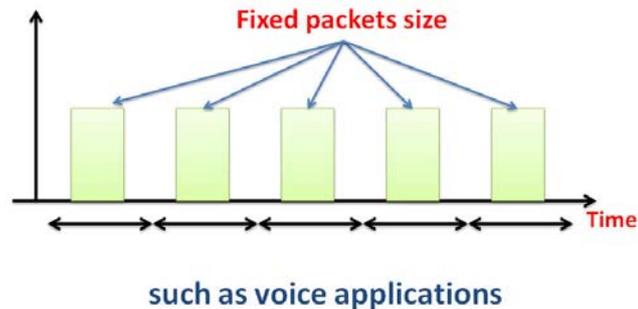


Figura 13: Mecanismo de calidad de servicio UGS [19]

- rtPS (*Real-Time Polling Service*): Diseñado para soportar tráfico de tasa de bit variable (VBR) como la transmisión de video MPEG. En este servicio las estaciones base ofrecen a los suscriptores oportunidades de petición periódicas para indicar el ancho de banda requerido.

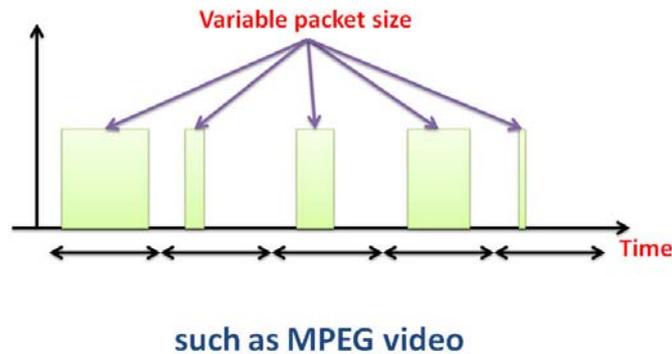


Figura 14: Mecanismo de calidad de servicio rtPS

- nrtPS (*Non-Real-Time Polling Service*): Diseñado para tráfico de datos tolerante al retardo y con un mínimo de tasa de datos, como la transmisión de ficheros FTP. Este tipo de servicio permite a las estaciones suscriptoras emplear peticiones de contención y de oportunidad para la reserva de ancho de banda incluso en entornos de red muy congestionados.

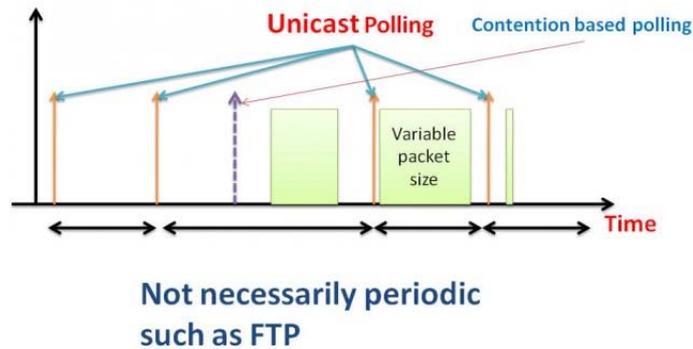


Figura 15: Mecanismo de calidad de servicio nrtPS

- BE (*Best Effort*): No especifica requisitos relacionados con el servicio. Es muy similar a nrtPS, ya que proporciona la posibilidad de realizar peticiones de contención y de oportunidad, pero no proporciona la posibilidad de reservar ancho de banda o la realización de sondeos periódicos.

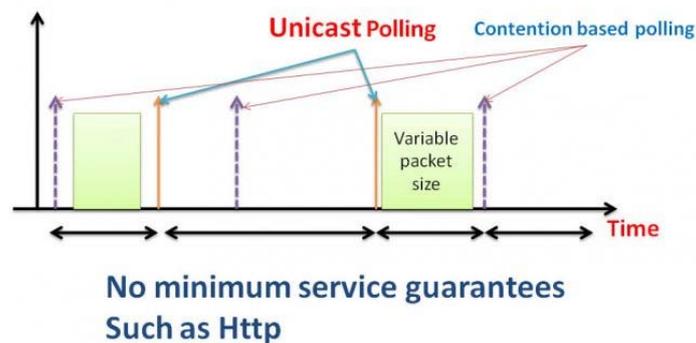


Figura 16: Mecanismo de calidad de servicio BE

Además en la extensión 802.16e [8] se añadió un nuevo tipo de servicio:

- ErtPS (*Extended rtPS*): Este tipo de servicio proporciona un algoritmo de planificación que se basa en la eficiencia tanto de UGS como de rtPS. De forma similar a UGS, este tipo de servicio ofrece concesiones unidireccionales no solicitadas. Sin embargo, el tamaño del ancho de banda asignado es dinámico (en contraposición a UGS que es de tamaño fijo). El propósito de este tipo de servicio es soportar flujos de servicios en tiempo real que generan paquetes de datos de tamaño variable de forma periódica. Un ejemplo de aplicación que puede emplear este tipo de servicio es la transmisión de voz con cancelación de eco.

Así mismo, el estándar proporciona la activación de flujos de servicio de forma dinámica mediante funciones de señalización de la calidad de servicio requerida por cada aplicación.

Una de las desventajas de 802.11 frente a 802.16 en términos de calidad de servicio

es que se trata de un protocolo no orientado a conexión (mientras que 802.16 es orientado a conexión) y el control de acceso al medio está basado en la contención (lucha por el canal), ya que la calidad de servicio se proporciona a través de distintos valores de tiempo de *Backoff* en función de los parámetros de QoS seleccionados, lo que implica que las confirmaciones de recepción y las expiraciones de tiempo pueden causar retardos si se producen errores. Otro de los problemas es que en 802.11 el tamaño del canal es fijo, mientras que en 802.16 puede ser modificado.

Los distintos tipos de servicio predefinidos en 802.16 ofrecen una mayor abstracción para la provisión de calidad de servicio a las capas superiores. En 802.11, no existen estas categorías de tráfico, y las capas superiores deben escoger los parámetros que conformarán el tiempo de *Backoff* (AIFS, CW, PF), por lo que se pierde esta categorización de distintos tipos de tráfico. Además, no se marcan los distintos flujos por lo que el punto de acceso carece de la información de la calidad de servicio seleccionada para los distintos flujos transmitidos.

4. Evolución futura de las tecnologías

Las telecomunicaciones están continuamente en evolución, intentando mejorar sus capacidades para soportar servicios más avanzados, con mayores requisitos en cuanto a ancho de banda, disponibilidad, etc. En la revisión de las tecnologías ya hemos visto cómo se han ido proponiendo y desarrollando nuevos sub-estándares que mejoren el *throughput* (802.11n, 802.16n, 802.16m), la movilidad, (802.11p, 802.16e), calidad de servicio (802.11e, 802.16b), etc.

De los citados existen varios que aún no están aprobados:

- 802.11n: Como se ha comentado previamente, es una propuesta de mejora del estándar 802.11-2007, para incrementar el ancho de banda, con un máximo de 600 Mbit/s a nivel físico. Se espera que esté aprobado en noviembre de 2009.
- 802.16m: Pretende ofrecer un ratio de datos de 100 Mbit/s para aplicaciones en movimiento, y 1 Gbit/s para aplicaciones fijas, cobertura celular, macro y micro célula, sin restricciones en el ancho de banda RF (se espera un uso de 20 MHz o superior). El plan de trabajo pretende completar el estándar en diciembre de 2009, siendo aprobado en marzo de 2010.
- 802.11p: También llamado WAVE (*Wireless Access in Vehicular Environments*), por ahora es un *draft* que define mejoras sobre 802.11 para soportar aplicaciones en el entorno ITS (*Intelligent Transport Systems*). Esto incluye el intercambio de información entre vehículos a altas velocidades y entre vehículos e infraestructura en la banda ITS de 5.9 GHz [20].

Aún cuando la tecnología WiFi puede considerarse madura tanto en su desarrollo como implantación, y WiMAX a su vez está llegando a un punto de madurez, sólo falta de despliegue por parte de los operadores y aceptación por parte de los usuarios, los grupos de estandarización y desarrollo siguen pensando en evolucionar las tecnologías. Así, en el caso de WiMAX, existen sub-estándares en desarrollo, por ejemplo 802.16h (pretende mejorar la coexistencia para operación sin licencia) y 802.16i (que definirá la base de la información de gestión móvil).

Vemos que el futuro inmediato de ambas tecnologías está orientado a disponer de mayores tasas de transmisión en situaciones estáticas y no estáticas, además de mejorar o solventar debilidades encontradas, intentando así poder desarrollar nuevas aplicaciones en entornos de la vida cotidiana y tendiendo hacia soluciones "todo IP" en las que todo es multimedia, multiacceso y ubicuo, empleando la red óptima en cada momento, concepto que ha venido a denominarse "*Always Best Connected*" o ABC.

Esta ubicuidad, homogeneización de tecnologías diferentes, integración de estándares, se hace palpable en el proyecto CVIS (*Cooperative Vehicle Infrastructure System*) [21], desarrollado por la Unión Europea con el objetivo de implementar un sistema "inteligente", que permita la comunicación entre los vehículos y las infraestructuras viales, con el que se pretende mejorar el flujo del tráfico rodado, la seguridad y el impacto ambiental, sobretodo centrándose en el nivel de confort de

los conductores, por ejemplo, optimizando el flujo de tráfico de la red vial (reduciendo atascos). Para lograr la interoperabilidad entre las diferentes marcas de coches y entre los vehículos y los diferentes tipos de sistemas de balizas se está desarrollando un terminal basado en ISO CALM (*Communication Air interface, Long and Medium range*), un conjunto estandarizado de protocolos comunicaciones a alta velocidad ITS (Sistemas Inteligentes de Transportes), que se podrá utilizar en los vehículos o como parte de las infraestructuras de carretera.

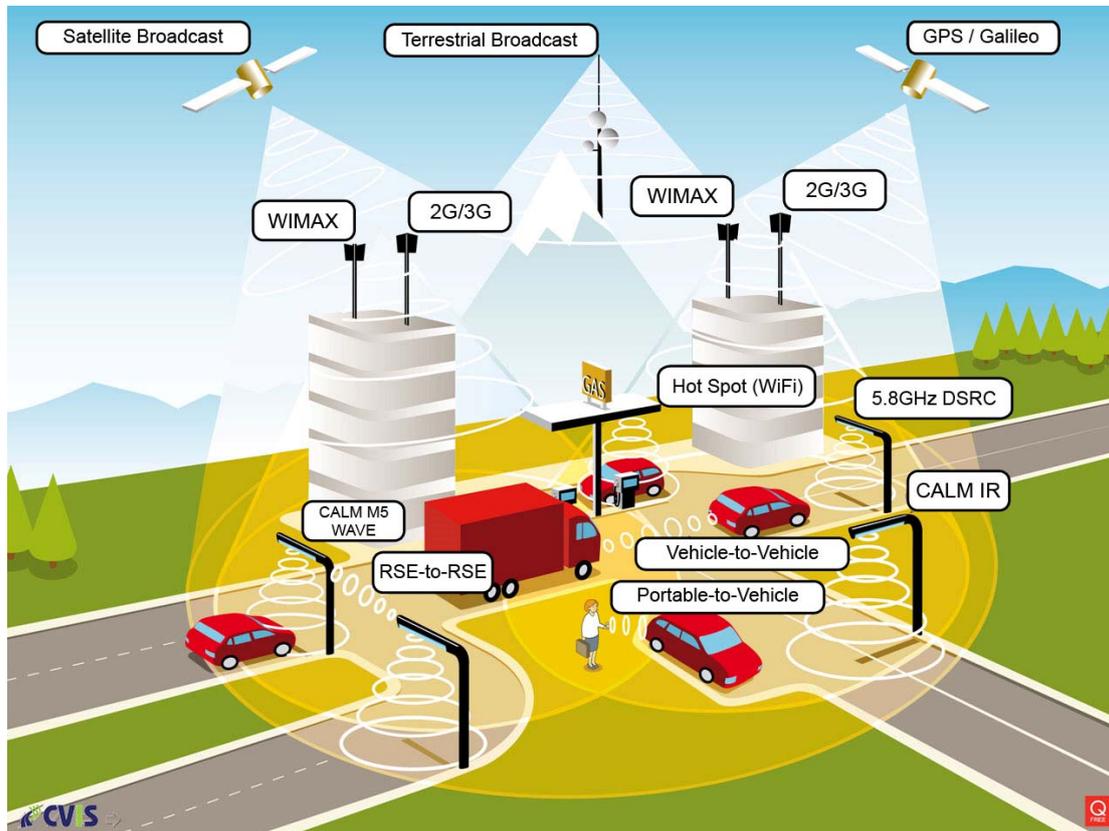


Figura 17: Arquitectura CVIS

CALM [22] es una arquitectura marco de ISO para dar soporte de comunicaciones en entornos móviles, más específicamente, en todos aquellos relacionados con tecnologías de los sistemas inteligentes de transporte. CALM está compuesto por una serie de estándares internacionales en este ámbito, y soporta comunicaciones continuas a través de distintos interfaces y medios físicos como los IEEE 802.11, 802.11p, 802.15, 802.16e, 802.20, telefonía móvil 2G/3G/4G, o los sistemas propietarios de los programas ITS nacionales.

Vemos que una de las tendencias es el intento de acceso común a redes heterogéneas, trabajando en sistemas de handover verticales y transparentes al usuario, para lograr una red global en base a distintos estándares. En este sentido y al mismo tiempo, se está produciendo una pugna entre WiMAX y las iniciativas de LTE por convertirse en el nuevo estándar para la denominada cuarta generación de telefonía o 4G. Por 4G se entiende la tecnología de nueva generación que sea capaz de evolucionar las características de 3G, en cuanto a cobertura global, movilidad y capacidad de transferencia de datos, y que logre la “conectividad móvil ubicua”.

El concepto de 4G englobado dentro de “*Beyond 3-G*” incluye técnicas de avanzado rendimiento radio como MIMO y OFDM. Otras características que se pueden citar son:

- Abandono de acceso radio CDMA, característico de UMTS.
- Uso de SDR (*Software Defined Radios*) para optimizar el acceso radio.
- Red todo IP.
- Las tasas de pico máximas previstas son de 100 Mbit/s en enlace descendente y 50 Mit/ps en enlace ascendente (con un ancho de banda en ambos sentidos de 20Mhz).

Así 4G será un sistema de sistemas, siendo la convergencia de redes cableadas e inalámbricas, manteniendo una calidad de servicio (QoS) de punta a punta (*end-to-end*) de alta seguridad para permitir ofrecer servicios de cualquier clase en cualquier momento, en cualquier lugar, con el mínimo coste posible.

5. Conclusión

A lo largo del documento hemos revisado las tecnologías WiFi y WiMAX, los diferentes estándares que se han ido desarrollando y proponiendo, que han permitido evolucionar sus características cubriendo las crecientes necesidades de los nuevos servicios.

Además, se ha profundizado en el estudio de las capas inferiores de ambas tecnologías, adentrándonos en los protocolos relativos a la capa física y de enlace en el modelo OSI. En particular, se ha realizado una comparativa de cuatro propiedades: ancho de banda, acceso al medio, calidad de servicio y sensibilidad frente a interferencias. Aunque a priori lo expuesto pueda hacer ver que WiMAX es superior en todas las facetas a WiFi (gran ancho de banda a largas distancias, mejor eficiencia espectral, protocolos más avanzados para evitar interferencias y aprovechar reflexiones para proveer acceso en situaciones NLOS, etc.), no está cubriendo las expectativas que se habían depositado en esta tecnología, y aunque existen casos de éxito [24] y compañías que ofertan conectividad sobre WiMAX [25], sigue siendo aún muy superada por WiFi en cuanto a usuarios y ventas de equipos.

Quizás, una razón del no éxito de WiMAX sea su coste de despliegue, puesto que el operar en bandas licenciadas tiene un precio. Aunque en nuestra opinión WiMAX y WiFi no compiten por el mismo mercado, consideramos que WiFi seguirá dando conectividad local en el futuro, en zonas acotadas como el hogar y las oficinas, mientras que WiMAX tiene un enfoque más extenso, actuando como enlace entre un edificio y la central, u ofertando acceso a los servicios en áreas particulares (valles cerrados, comunidades alejadas sin infraestructura de telefonía fija, etc.) Por tanto, con las futuras evoluciones, vemos que ambas tecnologías son complementarias, y mediante su combinación podrán cubrir un mayor rango de servicios.

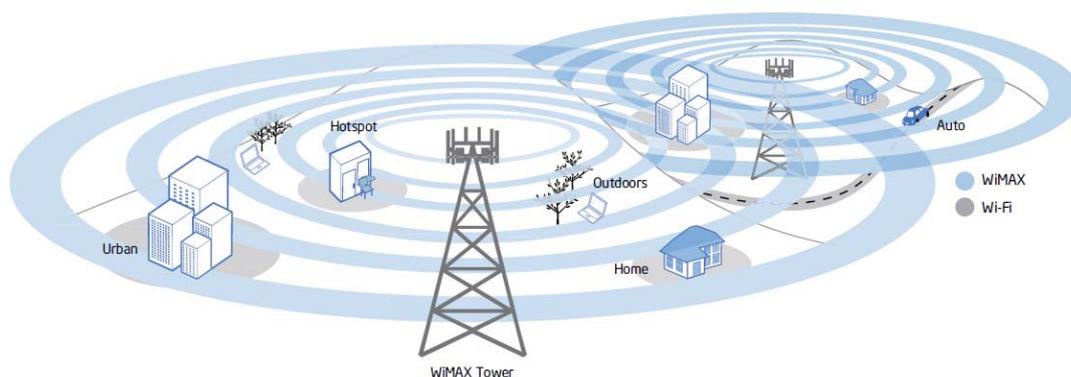


Figura 18: Escenario WiFi y WiMAX [23]

Por último, volver a nombrar que la futura 4G no es una tecnología o estándar definido, sino una colección de tecnologías sobre las cuales el IEEE aún no se ha pronunciado, de ahí que los distintos fabricantes y operadoras, estén luchando por llevar el futuro estándar hacia su terreno. Aquí es donde WiMAX tendrá mucho que decir, luchando contra las tecnologías celulares (GPRS/UMTS), para interconectar nodos con ancho de banda, calidad, alcance y movilidad suficientes.

Referencias

- [1] IEEE Std. 802.11. "Information Technologu – Telecommunications and information exchange between Systems – Local and metropolitan area Networks – Specific Requirements – Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications". 1997.
- [2] Estándar 802.11a: "802.11a-1999 High-speed Physical Layer in the 5 GHz band". [online]
<http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.11a-1999.pdf>
- [3] Estándar 802.11b: "802.11b-1999 Higher Speed Physical Layer Extension in the 2.4 GHz band". [online]
<http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.11b-1999.pdf>
- [4] Estándar 802.11g: "IEEE 802.11g-2003: Further Higher Data Rate Extension in the 2.4 GHz Band" [online]
<http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.11g-2003.pdf>
- [5] Página web del grupo de trabajo 802.11n:
http://grouper.ieee.org/groups/802/11/Reports/tgn_update.htm
- [6] Página web del grupo de trabajo IEEE 802.16 WG:
<http://www.ieee802.org/16/>
- [7] IEEE 802.16 WG. "IEEE 802.16-2004 (802.16d) Specification, Standard for Local and Metropolitan Area Networks, Part 16, Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access". June 2004. [online]
<http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.16-2004.pdf>
- [8] Estándar 802.16e [online]:
<http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.16e-2005.pdf>
- [9] IEEE 802.11 WG. "Draft Supplement to STANDARD FOR Telecommunications and Information Exchange Between Systms – LAN/MAN Specific Requirements – Part 11: Wireless Medium Access Control (MAC) and physical layer (PHY) specifications: Medium Access Control (MAC) Enhancements for Quality of Service (QoS)". IEEE 802.11e/D2.0. Nov. 2001.
- [10] M. Finneran, "Wimax versus Wi-Fi". Junio de 2004.
- [11] E. Pietrosemoli "Long Distance WiFi Trial". International Summit for Community Wireless Networks. Columbia, Mayo de 2007.
- [12] A. Los Santos, F. Milagro, V. González, G. Martín "Sistema de comunicaciones V2V basado en IEEE 802.11b". Telecom I+D, Octubre 2007.

- [13] Extraída de: <http://www.cisco.com/en/US/i/000001-100000/75001-80000/78001-79000/78692.jpg>
- [14] Quobis Networks, "WIMAX: la revolución inalámbrica. Estado del arte de la tecnología". Agosto de 2006.
- [15] Quobis Networks, "WIMAX: la revolución inalámbrica... ¡y móvil!". Mayo de 2009.
- [16] S. Atapattu y N. Rajatheva, "Analysis of Alamouti Code Transmission over TDMA-Based Cooperative Protocol". Vehicular Technology Conference, 2008. VTC Spring 2008.
- [17] M. P. Ángel y J. E. Sierra, "Estudio del estándar IEEE 802.16-2004".
- [18] Albentia Systems, blog: "La MAC WiMAX: Eficiente, determinista y entramada". [online] <http://albentia.wordpress.com/2008/11/13/la-mac-wimax-eficiente-determinista-y-entramada/>
- [19] Imágenes extraídas de: <http://140.138.150.21/blog/weblogs/ublog/index.php?blogId=58>
- [20] Grupo de trabajo 802.11p: http://grouper.ieee.org/groups/802/11/Reports/tgp_update.htm
- [21] Web oficial del proyecto CVIS: <http://www.cvisproject.org/>
- [22] Web oficial CALM: <http://www.calm.hu/>
- [23] Imagen extraída de: <http://64.202.120.86/upload/image/articles/2009/the-future-of-wimax/wimax-wifi-area.jpg>
- [24] M. Wu, "A COMPARISON OF WI-FI AND WIMAX WITH CASE STUDIES". Final Thesis. 2007.
- [25] Web de Euskaltel, compañía que oferta soluciones WIMAX: http://www.euskaltel.com/CanalOnline/homes/home_empresas_mediana_empresa_internet.jsp?idproducto=2008111217520346