

Capítulo 2

WiMAX

2. WiMAX

El continuo e imparable progreso tecnológico, así como una sociedad cada vez más móvil y dependiente de las nuevas tecnologías, son algunos de los motivos que están induciendo profundos cambios en los actuales sistemas inalámbricos y que, al mismo tiempo, provocarán la adopción de nuevos estándares. Entre las nuevas tecnologías inalámbricas de inminente entrada en escena, WiMAX se perfila como un significativo avance tecnológico que revolucionará por completo el actual estatus de los enlaces inalámbricos.

Pese a su innegable funcionalidad y productividad, las redes Wi-Fi han estado, hasta la fecha, relegadas a entornos de escasos metros cuadrados, un panorama que promete cambiar radicalmente con la inminente aparición de la tecnología WiMAX, capaz de ofrecer conexiones de banda ancha alcanzando distancias de hasta 70 kilómetros, obviamente en las condiciones más favorables, y que supone la rampa de lanzamiento ideal para otras tecnologías en plena expansión como la telefonía sobre Internet (VoIP).

Apenas han transcurrido pocos años desde que se hiciera pública su aprobación por parte del consorcio IEEE del estándar 802.16, también conocido como WiMAX, y ya comienza a convertirse en una realidad palpable. La intervención de empresas como Intel, que lo incluirá en próximas revisiones de su popular plataforma Centrino, Motorola y Nokia, entre otras muchas, augura un excelente futuro para una tecnología que complementará y dará nuevos bríos al popular estándar Wi-Fi y sus sucesores.

2.1. Breve reseña histórica

WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access) es el nombre comercial de un grupo de tecnologías inalámbricas que emergieron de la familia de estándares WirelessMAN. En concreto, en el año 2001 se creó el Foro WiMAX para promover el estándar y para ayudar a asegurar la compatibilidad y la interoperabilidad a través de múltiples fabricantes, algo parecido a lo que la Alianza Wi-Fi hace por la familia de estándares IEEE 802.11x y se han convertido en una faceta clave del proceso de los estándares IEEE. Si bien el término WiMAX sólo tiene algunos años, el estándar 802.16 ha existido desde fines de la década de 1990, primero con la adopción del estándar 802.16 (10-66GHz) en abril de 2002 y luego con el 802.16a (2-11GHz) en enero de 2003. A pesar del establecimiento del estándar 802.16a, nunca terminó de despegar en el mercado, aunque vale la pena mencionar que durante ese período toda la industria de telecomunicaciones estuvo luchando.

Así, y en principio, este estándar 802.16 se enfocaba específicamente en el uso eficiente del ancho de banda, en la región comprendida entre los 10GHz y los 66 GHz y definía una capa de control de acceso al medio capaz de soportar múltiples especificaciones de capas físicas, desarrolladas para el uso de esta banda de frecuencia. Poco después, ni siquiera había transcurrido un año, se llevó a cabo la primera revisión del estándar con el objeto de incorporar una rama adicional, denominada 802.16a, con la que cubrir el rango de frecuencias de los 2GHz a los 11GHz y contempla la utilización de dos técnicas de modulación, OFDM y OFDMA. Del mismo modo, en los años sucesivos también se han ido introduciendo sucesivas y significativas mejoras. Resumiendo, la última versión del estándar IEEE 802.16, la 802.16-2004 (conocida previamente como Revisión D, o 802.16d), fue ratificada en julio de 2004 e incluye la versiones anteriores (802.16-2001, 802.16b/c de 2002, y 802.16a en 2003) y cubre tanto enlaces mediante línea de visión directa (LOS, Line of Sight) como aquellos sin línea de visión directa (NLOS, Non Line of Sight) en el rango de frecuencias 2–66GHz. Como es costumbre en los estándares IEEE, sólo se regulan las especificaciones de las capas PHY (Physical) y MAC (Media Access Control). Los cambios introducidos en la norma 802.16-2004 estuvieron dirigidos al desarrollo de aplicaciones de interoperabilidad en el rango de frecuencias de 2-11GHz.

Así las cosas, los actuales sistemas WiMAX se basan principalmente en dos especificaciones, el estándar 802.16-2004 de IEEE y la norma HiperMAN de ETSI (European Telecommunications Standards Institute). Dos enfoques similares en lo que se ha dado en llamar tecnología BWA (Broadband Wireless Access o Acceso Inalámbrico de Banda Ancha). La diferenciación de ambas es tremendamente importante por una razón. La primera está orientada a comunicaciones en las que las estaciones emisora y receptora tienen una línea de visión directa, algo similar a lo que ocurre con las emisiones infrarrojas de los mandos a distancia. En la segunda, las bandas de frecuencia utilizadas permiten mantener la comunicación sin que ambos extremos estén directamente enfrentados, e incluso puede haber todo tipo de obstáculos que no impiden la transmisión de datos, como ocurre con las redes Wi-Fi actuales o con la tecnología Bluetooth.

Aunque con la publicación oficial del estándar 802.16-2004 se asentaron las bases para el despliegue inicial de la nueva tecnología de acceso de banda ancha inalámbrica, las expectativas finales de WiMAX van más allá de ser un sistema de tipo ADSL inalámbrico para entornos urbanos y rurales. Realmente los promotores de este proyecto persiguen la ambiciosa meta de que WiMAX sea la tecnología inalámbrica que unifique el mundo de la telefonía móvil y las redes de datos. Con este objetivo, en diciembre 2002, fue creado el Grupo de Trabajo IEEE

802.16e para mejorar y optimizar el soporte para la combinación de las capacidades de comunicación tanto fijas como móviles en frecuencias por debajo de los 6GHz. Cumpliendo el calendario previsto, el pasado 7 de diciembre de 2005 se realizó la ratificación oficial del nuevo estándar WiMAX Móvil (802.16e). La nueva versión del estándar introduce el soporte de la tecnología SOFDMA (una variación de la técnica de modulación OFDMA) el cual permite un número variables de ondas portadoras, que se añade a los modos OFDM y OFDMA ya existentes. Además, IEEE 802.16e ofrece un soporte mejorado de las tecnologías MIMO (Multiple Input Multiple Output) y AAS (Adaptive Antenna Systems). También, incluye mejoras para la optimización del consumo de energía para los dispositivos móviles y con ello disminuir con ello el tamaño del módem CPE (Customer Premise Equipment), así como extensas características de de seguridad.

Por último, también existen los grupos de trabajo de IEEE 802.16f e IEEE 802.16g que se encargan de las interfaces de administración de la operación fija y móvil.

2.2. Pronósticos

Desde la perspectiva más optimista, las notables prestaciones y cualidades de esta innovadora tecnología de comunicación inalámbrica, así como la consolidación y certificación real de los primeros productos WiMAX, permiten pronosticar una implantación masiva a corto plazo. Consecuentemente, las consultoras más entusiastas predicen ambiciosas cotas de negocio en el pujante y floreciente mercado de las comunicaciones inalámbricas. No obstante, y pese a que una de las cualidades de WiMAX son sus bajos costes de infraestructura, razón que justifica que esté especialmente indicado para llevar la banda ancha a las zonas rurales y a países subdesarrollados, han de realizarse todavía las arduas labores de las instalación de las estaciones base, concesión y asignación de licencias para el uso de determinadas banda del espectro electromagnético, así como el desarrollo y distribución de los respectivos productos. En pocas palabras, se necesita algo más tiempo y, sobre todo, mucho dinero en inversiones. Pese a ello, hay un nutrido grupo de empresas encuadradas en el WiMAX Fórum (www.wimaxforum.org), decididas a sacar el proyecto adelante.

En cualquier caso, la competencia no se va a dejar avasallar fácilmente. De un lado, la telefonía UMTS de tercera generación ya está desplegada y en funcionamiento, siendo la alternativa natural en aquellas áreas y espacios donde no exista cobertura ADSL (Cable Ethernet) o Wi-Fi, aunque su nivel de cobertura real deja bastante que desear, al menos en lo que a nuestro país concierne. Pese a todo, para tratar de contrarrestar el avance WiMAX los

promotores y operadores de telefonía móvil 3G ya tienen lista una mejora de la actual tecnología W-CDMA, denominada HSDPA o 3.5G, que puede trabajar con las radio bases actuales y que supuestamente tiene picos de transmisión de hasta 10Mbps. Un halagüeño futuro que estará supeditado a las tarifas que las operadoras quieran implantar para el uso y disfrute de los nuevos servicios.

Aunque muchos prevén una dura pugna entre WiMAX y HSDPA, ambas tecnologías son complementarias, pese a ofrecer servicios y prestaciones similares. Mientras WiMAX tiene una orientación más específica a la transmisión de datos y cercana a las aplicaciones las informáticas convencionales, las tecnologías móviles de nueva generación seguirán apostando preferentemente por las comunicaciones de voz, aunque debidamente acompañadas con servicios de datos. Por ejemplo, la versión móvil de WiMAX servirá a los operadores para crear redes que cubran a una ciudad y que serán utilizadas por los usuarios para acceder a Internet desde una cafetería, en casa o en sus oficinas, sin que necesariamente tengan que estar en movimiento. Mientras que los sistemas provistos de la tecnología HSDPA, podrían ser utilizadas por aquellos que quieren, por ejemplo, descarga su correo mientras viajan en un automóvil o en tren.

Así las cosas, hay quien ya augura una pacífica convergencia entre ambos contendientes tecnológicos, de tal forma que los móviles incorporen tanto UMTS (o HSDPA) como WiMAX. En este contexto, entraría en escena la tecnología UMA (Unlicensed Mobile Access) que propone precisamente los mecanismos necesarios que harían posible el uso de servicios de mensajería de datos y de voz a través de redes inalámbricas no licenciadas para el uso como sistemas de telefonía móvil. No obstante, y según vayan haciendo su aparición las primeras soluciones y dispositivos WiMAX, seremos objeto de agresivas estrategias comerciales por parte de las operadoras de telefonía móvil con la clara intención de impedir el despliegue WiMAX.

La gran ventaja de la tecnología WiMAX, en su versión 802.16-2004, es que puede permitir la aparición de nuevos proveedores en el mercado, ajenos a los operadores tradicionales o a las compañías ya instaladas y con redes. La segunda ventaja es que esta tecnología permitirá novedosos y más económicos servicios para los usuarios, siempre y cuando la competencia y el desarrollo se lleven a cabo de forma natural y sin condicionantes de ningún tipo. De esta forma, WiMAX podrá competir en igualdad de condiciones e incluso superando a sistemas como DSL, cable módem y, por qué no, UMTS.

Por último, hay que tener también presente que el hecho de que una determinada tecnología consiga un rotundo éxito depende, en multitud de ocasiones y en un gran porcentaje,

más del acertado oportunismo comercial que de cuestiones puramente técnicas. Véase, por ejemplo, el caso de la VoIP, que ha ganado una tremenda popularidad entre los usuarios domésticos con la aparición de Skype pese a que existía desde 1996. Esto mismo podría ocurrir a las tecnologías inalámbricas, que existen desde hace tiempo y que podrían empezar a tener éxito con la aparición del WiMAX y, sobre todo, si el hardware y las tarifas de conexión presentan precios reducidos. Aunque mucho me temo, a pesar de las esperanzadoras perspectivas que promulga WiMAX, que los habitantes de las zonas rurales seguirán, en su gran mayoría y durante algún tiempo más, al margen de la conectividad de banda ancha. Hoy por hoy, donde no llega el ADSL tampoco suele existir cobertura 3G. No obstante, hasta ahora la Administración, en muchas partes del mundo, pero en especial en España, se ha lanzado de lleno a crear o a alentar la creación de redes Wi-Fi para dar cobertura de Internet a pueblos y centros que no la tenían, con WiMAX esos proyectos pueden verse reforzados.

2.3. Estándares WiMAX

Las tecnologías inalámbricas como hemos visto han experimentado en los últimos años una gran evolución: desde Wi-Fi que es el presente de las comunicaciones de área local inalámbricas hasta WiMAX que es un nuevo estándar que define una Red Metropolitana de Banda Ancha Inalámbrica y que va a permitir la conexión inalámbrica entre distintas ubicaciones sin visibilidad directa; presentándose así como una alternativa a las conexiones cableadas tradicionales de banda ancha como xDSL o el cable así como a las conexiones móviles como es 3G.

WiMAX es una tecnología basada en estándares que permite al abonado la conectividad de banda ancha inalámbrica en uso fijo, nómada, portátil y móvil sin necesidad de visión directa de la estación base. A pesar de que el proyecto para la creación de este nuevo estándar se lleva gestionando desde julio de 1999 con el Grupo de Trabajo de Acceso Inalámbrico de Banda Ancha IEEE 802.16 o “IEEE 802.16 Working Group on Broadband Access” no fue hasta abril de 2002 que se publicó la primera versión, vamos a ir viendo las diferentes versiones del estándar que se han ido publicando en la tabla 1 y por último en la tabla 2 veremos un resumen de las características de los estándares más relevantes:

	Nombre/Descripción
802.16	WiMAX, rango de frecuencia de 10GHz a 66GHz
802.16a	WiMAX para estaciones de usuarios fijas, frecuencias inferiores a 11GHz
802.16b	Frecuencias exentas de licencia; rango de frecuencia de 5GHz a 6GHz ("Wireless HUMAN"=High Speed Unlicensed MAN)
802.16c	Detalles del sistema para la banda de 10 a 66GHz
802.16d	Estándar
802.16-2004	Reemplaza a los estándares 802.16/.16a/.16d (incluyendo OFDMA)
802.16e	WiMAX para estaciones de usuario en movimiento (velocidad limitada a 120Km/h; tamaño FFT 128,512,1024 y 2048)
802.16f	Gestión MIB (Base de Información de Gestión)
802.16g	Gestión de niveles
802.16-1	Interfaz aérea; rango de frecuencia de 10GHz a 66GHz
802.16.2	Coexistencia de sistemas de acceso inalámbricos de banda ancha. Reemplazado por la 802.16.2-2004
802.16.2-2004	Coexistencia
802.16.2a	Recomendaciones para la coexistencia de los sistemas de acceso fijo inalámbricos de banda ancha.
802.16.3	Interfaz aérea para sistemas de acceso fijo inalámbricos de banda ancha operando por debajo de los 11GHz

Tabla 1. Estándares WiMAX

- Estándar 802.16: Estándar publicado en abril de 2002 que se refería a enlaces fijos de radio con línea de visión directa entre el transmisor y el receptor utilizando frecuencias dentro de la banda de 10 a 66GHz para proporcionar velocidades de transmisión de hasta 134Mbps y sin movilidad.
- Estándar 802.16.a: Estándar que se publicó un año más tarde, en marzo del 2003, y fue entonces cuando WiMAX, como una tecnología de banda ancha inalámbrica, empezó a cobrar relevancia. Esta modificación también estaba pensada para enlaces fijos, pero llegó a realizar modificaciones de control de acceso y de especificaciones de la capa física logrando una distancia de operatividad de 40 a 70 kilómetros y operando en la banda de 2 a 11GHz, parte del cual es de uso común y no requiere licencia para su operación. Es válido para topologías punto a multipunto y, opcionalmente, para redes en malla, y no requiere línea de visión directa y permite transmitir sobre ellas velocidades teóricas de hasta 75Mbps. Emplea las bandas de 3,5GHz y 10,5GHz, válidas internacionalmente, que requieren licencia (2,5-2,7 en Estados Unidos), y las de 2,4GHz y 5,725-5,825GHz que son de uso común y no requieren disponer de licencia alguna.
- Estándar 802.16.b: Este estándar usa las bandas de 5GHz y 6GHz y proporciona QoS (Quality Of Service) por lo que se puede usar para transmitir voz y datos. trabaja en la modificación del nivel MAC y en capas físicas adicionales para bandas de frecuencia exentas de licencia (WirelessHUMAN).
- Estándar 802.16.c: Este estándar se ocupó sobretodo del rango de 10 a 66GHz. Sin embargo, también desarrolla otros aspectos como la evolución del funcionamiento y la prueba y ensayo de los posibles perfiles del sistema. Esto último es un elemento crucial en el juego de herramientas de WiMAX, porque pasa a constituir un gran acuerdo de opciones disponibles con 802.16 en general. La metodología de perfiles del sistema evoluciona para definir qué características podrían ser obligatorias y qué características opcionales. El intento era definir a los fabricantes los elementos obligatorios que se deben considerar para asegurar la interoperabilidad. Los elementos opcionales tales como diversos niveles de los protocolos de la seguridad incorporados permiten que los fabricantes distingan sus productos por precio, funcionalidad y el sector de mercado.

Debe tenerse presente que para este estándar se tiene tres tipos de modulación para la capa PHY: modulación con una sola portadora, modulación con OFDM de 256 portadoras y de 2048 portadoras, pero el elegido es OFDM de 256 portadoras, debido a que en el proceso de cálculo para la sincronización se tiene menor complejidad respecto a la utilización del esquema de 2048 portadoras.

- Estándar 802.16-2004(d): Las principales características de los protocolos para WiMAX fijos, mencionados en los puntos anteriores, se han incorporado en 802.16-2004. Por lo que éste es el reemplazo del estándar IEEE 802.16a. Este estándar final soporta numerosos elementos obligatorios y opcionales. Teóricamente podría transmitir hasta para un rango de datos de 70Mbps en condiciones ideales, aunque el rendimiento real podría ser superior a 40Mbps.
- Estándar 802.16e-2005: Es una ampliación de IEEE 802.16d para ofrecer movilidad y roaming, por tanto también es conocido como WiMAX Móvil. Sirve por tanto para aplicación a conexiones inalámbricas en la banda de 2GHz a 6GHz, que permite transmitir sobre ella a velocidades de hasta 15Mbps. Añade movilidad, prometiendo comunicaciones en vehículos a 120Km/h.
- Por último, el grupo 802.16.2 produce recomendaciones prácticas para la coexistencia de sistemas fijos de acceso inalámbrico de banda ancha. En particular, se están considerando sistemas punto a punto y aspectos relativos a la banda de 2-11GHz.

	802.16	802.16-2004	802.16e-2005
Estado	Completado Diciembre 2001	Completado Junio 2004	Completado Diciembre 2005
Banda de frecuencia	10GHz-66GHz	2GHz-11GHz	2GHz-11GHz fijo 2GHz-6GHz móvil
Aplicaciones	Fijo; LOS	Fijo; NLOS	Fijo y móvil; NLOS
Arquitectura MAC	Punto a punto o malla	Punto a punto o malla	Punto a punto o malla
Esquema de transmisión	Única portadora	Una única portadora; OFDM 256 o 2048	Una única portadora; OFDM 256 o OFDM escalable con 128, 512,1024,2048
Modulación	QPSK,16QAM, 64QAM	QPSK, 16QAM, 64QAM	QPSK, 16QAM, 64QAM
Tasa transmisión bruta	32Mbps-134,4Mbps	1Mbps-75Mbps	1Mbps-75Mbps
Multiplexión	TDM/TDMA	TDM/TDMA/OFDMA	TDM/TDMA/OFDMA
Duplexión	TDD y FDD	TDD y FDD	TDD y FDD
Ancho banda canales	20MHz,25MHz, 28MHz	1.75MHz,3.5MHz,7MHz, 14MHz,1.25MHz, 5MHz, 10MHz,15MHz,8.75MHz	1.75MHz,3.5MHz,7MHz 14MHz,1.25MHz,5MH 10MHz,15MHz, 8.75MHz
Designación de la interfaz aérea	WirelessMAN-SC	WirelessMAN-SCa WirelessMAN-OFDM WirelessMAN-OFDMA WirelessMAN-HUMAN	WirelessMAN-SCa WirelessMAN-OFDM WirelessMAN-OFDMA WirelessMAN-HUMAN
Implementación WiMAX	Ninguna	256-OFDM como WiMAX fijo	OFDMA escalable como WiMAX móvil

Tabla 2. Datos básicos de los estándares de la norma 802.16

2.4. Puntos principales de WiMAX

WiMAX es una solución de banda ancha inalámbrica que ofrece una gran cantidad de características con bastante flexibilidad en términos de opciones de despliegue y de servicios a ofrecer. Algunos de estos puntos principales que son destacables son los que siguen a continuación:

- **Capa física basada en OFDM:** La modulación OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing) presenta muchos beneficios que no presentan otras modulaciones previas a ésta, y permite que las redes inalámbricas transmitan eficientemente en pequeños anchos de banda. Esta modulación se caracteriza por dividir la señal de banda ancha en un número de señales de banda reducida. La modulación OFDM es un caso especial de la modulación multiportadora (MCM), en donde múltiples datos son transmitidos de forma paralela utilizando diferentes subportadoras con banda de frecuencias solapadas ortogonalmente. Una característica de OFDM, es el superar los problemas de propagación que presenta el NLOS. Las señales OFDM tienen la ventaja de ser capaces de operar con retardos de la propagación en los entornos NLOS y de ser un esquema muy robusto frente al multitrayecto, atenuaciones e interferencias. Además de tener la capacidad de poder operar con un retardo de ensanchamiento más grande en el ambiente NLOS. Una ventaja muy importante es que es más sencillo modular señales portadoras individuales OFDM que modular una simple portadora ensanchada.
- **Grandes picos de tasas de datos.:** WiMAX es capaz de soportar elevados picos de tasa de datos. De hecho, las velocidades que puede alcanzar la capa física (PHY) llegan a ser de 74Mbps cuando opera con un espectro de frecuencia de 20MHz de ancho. Comúnmente, cuando se usa un espectro de 10 MHz de ancho con un esquema a razón de tres a uno en el canal de bajada y el de subida respectivamente, las velocidades que se alcanzan son de 25 Mbps para el enlace de bajada y de 6.7Mbps para el enlace de subida. Estas velocidades de pico de datos son alcanzadas cuando se usa una codificación 64QAM con un índice de corrección de error de 5/6. Bajo condiciones buenas para la señal se podrían alcanzar velocidades mayores, así como usando múltiples antenas y multiplexación espacial.

- Escalabilidad en el ancho de banda y la tasa de datos soportada: WiMAX tiene una arquitectura de capa física escalable, lo que permite que la tasa de datos sea escalable con la disponibilidad de ancho de banda en los canales. Esta escalabilidad se soporta en el modo OFDMA, donde el tamaño de la transformada rápida de Fourier (FFT) debe estar basado en el ancho de banda disponible en el canal. Por ejemplo, un sistema WiMAX debería usar una FFT de 128, 512 o 1024 subportadoras según el ancho de banda del canal sea 1,25MHz, 5MHz o 10MHz respectivamente. Esta escalabilidad debe hacerse dinámicamente para soportar el roaming de usuarios a través de las diferentes redes que podrían tener anchos de banda diferentes.
- Modulación y codificación adaptativa (AMC- Adaptive Modulation and Coding): WiMAX soporta un número de esquemas de modulación y de mecanismos de corrección de errores (FEC) y permite que el esquema sea cambiado por usuario y por estructura básica, basada en las condiciones del canal (SNR). AMC es un mecanismo efectivo para maximizar el caudal en un canal variable en el tiempo.
- Retransmisiones en la capa de enlace: Para las conexiones que requieren una alta fiabilidad, WiMAX soporta ARQ (Automatic Retransmission Request) protocolo utilizado para el control de errores en la transmisión de datos, garantizando la integridad de los mismos en la capa de enlace. Este protocolo requiere que los paquetes transmitidos sean asentidos por el receptor mediante un acuse de recibo (ACK); los paquetes que no son asentidos se consideran perdidos y se retransmiten. WiMAX además también soporta hybrid-ARQ, que es una mezcla entre FEC y ARQ.
- Soporta multiplexaciones en tiempo (TDD) y en frecuencia (FDD): En los estándares IEEE 802.16-2004 y IEEE 802.16e-2005 se soporta tanto Time Division Duplex (TDD) como Frequency Division Duplex (FDD), y permite un modo Half Duplex FDD (HD-FDD), lo que permite una implementación de bajo coste del sistema. En la mayoría de las implementaciones se usa TDD debido a sus ventajas:
 - o Flexibilidad al elegir la razón entre las velocidades del enlace de subida y el de bajada.
 - o Habilidad para explotar la reciprocidad del canal.
 - o Habilidad para implementarse en un espectro no pareado.
 - o Diseño del transductor menos complejo.
 - o Todos los perfiles WiMAX están basados en TDD, excepto los dos fijados en 3,5GHz.

- OFDMA (Acceso Múltiple por División de Frecuencia Ortogonal): El estándar del 802.16e (WiMAX móvil) usa OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access), lo cual es similar a OFDM en que divide la señal en múltiples subportadoras. OFDMA, sin embargo, va un paso más allá agrupando subportadoras en subcanales. Una sola estación cliente del suscriptor podría usar todos los subcanales dentro del periodo de la transmisión, o los múltiples clientes podrían transmitir simultáneamente usando cada uno una porción del número total de subcanales.
- Soporta técnicas avanzadas de antenas: WiMAX permite el uso de técnicas basadas en múltiples antenas como beamforming, codificación espacio-tiempo, y multiplexación. Estos esquemas pueden ser usados para mejorar la capacidad total del sistema y su eficiencia espectral mediante el uso de múltiples antenas en el transmisor y/o receptor.
- Soporta calidad de servicio (QoS – Quality Of Service): La capa MAC de WiMAX es orientada a conexión diseñada para admitir una variedad de aplicaciones, incluyendo servicios multimedia y de voz. El sistema soporta tasas de bit constantes y tasas de bit variables, soporta flujos de tráfico en tiempo real así como los que no lo son. WiMAX está diseñado para soportar un gran número de usuarios, con múltiples conexiones por terminal, cada uno con sus propios requisitos de calidad de servicio.
- Seguridad robusta: WiMAX admite una fuerte encriptación usando AES (Advanced Encryption Standard) que es un esquema de cifrado por bloques, y tiene un protocolo robusto de privacidad y de gestión de claves. Además el sistema ofrece una arquitectura muy flexible de autenticación basado en el protocolo EAP (Extensible Authentication Protocol), el cual permite una variedad de credenciales de usuarios, incluyendo esquemas de usuarios/password, certificados digitales y tarjetas inteligentes.
- Soporta movilidad: La variante de WiMAX móvil tiene un mecanismo para soportar traspasos (o handovers) seguros y ahorro de energía para alargar la duración de las baterías de los dispositivos portátiles. También se añaden mejoras en el nivel físico como una estimación más frecuente del canal, subcanalización del enlace de subida, y control de energía.
- Arquitectura basada en IP: El WiMAX Fórum ha definido una arquitectura de red basada en plataformas IP.

2.5. Arquitectura de red

2.5.1. Escenario

El estándar IEEE 802.16e-2005 nos proporciona la interfaz aérea para WiMAX pero no nos define la estructura de la red de un extremo a otro. El grupo de trabajo del foro WiMAX es el responsable de desarrollar los requisitos de la estructura de la red, su arquitectura, y los protocolos para WiMAX, usando el estándar 802.16e-2005 como interfaz aérea.

Este grupo de trabajo ha desarrollado un modelo de referencia de la red para el despliegue de estructuras de red WiMAX y para asegurar la máxima flexibilidad y la interoperabilidad entre varios equipos y operadores de WiMAX. Este modelo de referencia provee una arquitectura unificada de la red para soportar despliegues fijos, nómadas, y móviles y un modelo de servicio basado en IP. En la figura vemos una ilustración de lo que sería una red WiMAX basada en IP.

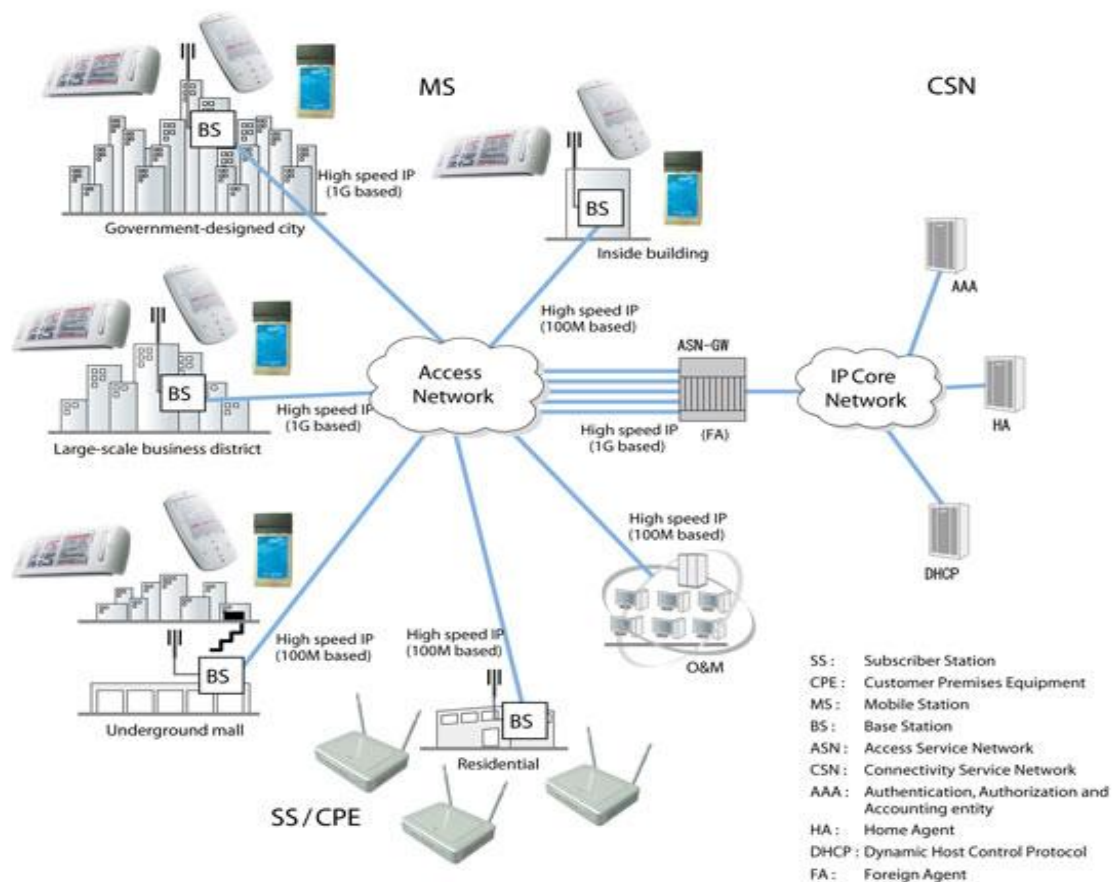


Figura 3. Escenario WiMAX.

2.5.2. Estructura y elementos de red

Un esquema general de la arquitectura WiMAX para ver que encontramos en este tipo de redes es el siguiente:

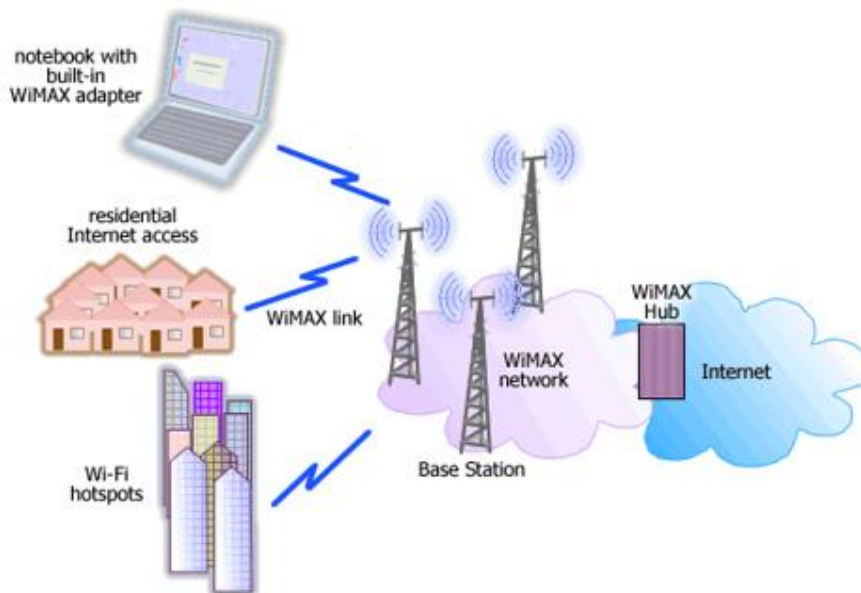


Figura 4. Estructura y elementos de red WiMAX.

El modelo de referencia de una red WiMAX está compuesto principalmente por tres componentes interconectadas mediante interfaces estandarizadas o puntos de referencia del R1 a R5. Los tres componentes son:

- MS: Mobile Station, usado en el extremo de la red del usuario para acceder a la red.
- ASN: Access Service Network, comprende una o más estaciones base y una o más pasarelas ASN para formar la red de acceso radio.
- CSN: Connectivity Service Network, que provee conectividad IP con las funciones IP del núcleo de la red.

La estación móvil (MS) es un equipo móvil genérico provisto de conectividad entre los equipos suscritos y la estación base (BS). El ASN incluye una serie de funcionalidades que proveen conexión de acceso radio a los suscriptores WiMAX. Uno o varios ASN, interconectados mediante el punto de referencia R4, componen una puerta de acceso (NAP). Un NAP (Network Access Providers) provee de infraestructura de acceso radio a uno o varios NSP. El NSP (Network Service Providers) permite la conectividad y servicios WiMAX y están compuestos por los CSN. En el lado de acceso radio, los servicios WiMAX son proporcionados mediante acuerdos con uno o varios NAPs. Mientras que en el lado de aplicación, los servicios WiMAX son

suministrados gracias a los acuerdos con los ASP (Application Service Providers) y/o a través de la conexión directa a Internet.

Se puede observar el modelo de referencia de una red WiMAX más concretamente en las siguientes figuras:

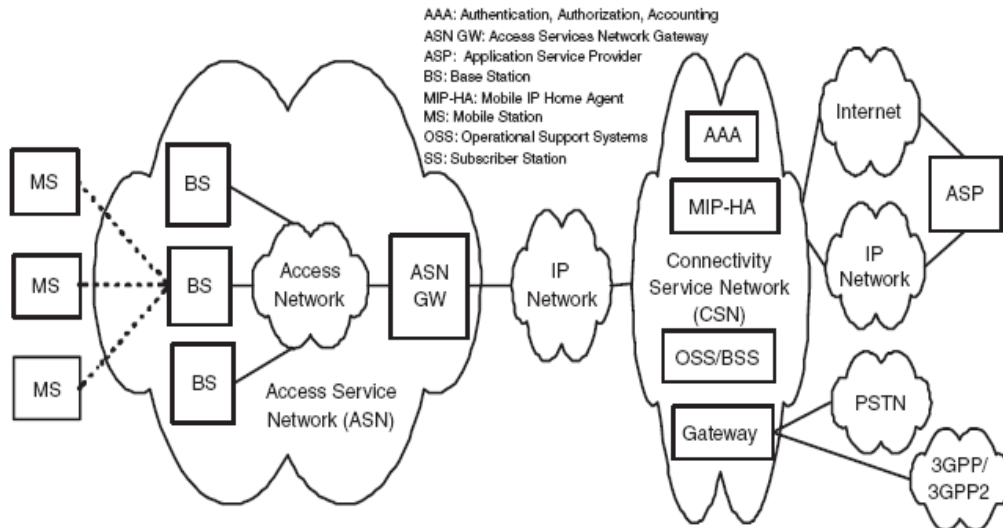


Figura 5. Modelo referencia WiMAX.

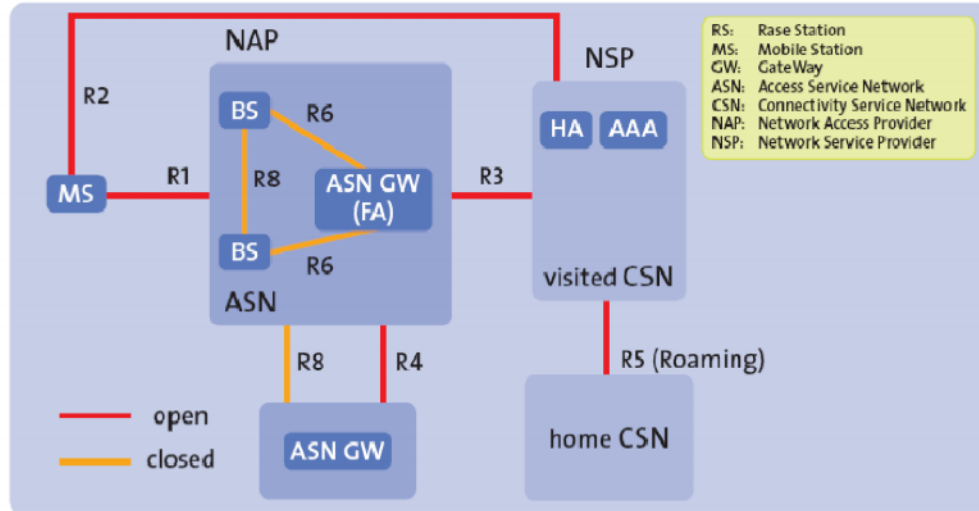


Figura 6. Modelo de referencia detallado WiMAX.

2.5.2.1. ASN

Incluye todo lo necesario para dar soporte radio a WiMAX. El ASN proporciona:

- Conectividad de capa 2 mediante interfaz aire.
- Mecanismos de administración de los recursos radio (RRM).
- Mecanismos de cobro y localización.
- Retransmisión de funciones del CSN de establecimiento de conectividad de capa 3.
- Tunelado de datos y señalización entre ASN y CSN mediante el punto de referencia R3.
- Detección de redes y selección de NAP/NSP.

Un ASN está compuesto por varias estaciones base (BS) conectada a varios ASN-GW. En el interior de un ASN se pueden observar dos puntos de referencia: R6 entre BS y ASN-GW y R8 entre los diferentes BSs.

2.5.2.1.1. BS

Implementa la capa física y MAC tal como se define en el estándar IEEE 802.16. En una red de acceso WiMAX, una BS está definida por un sector y una frecuencia asignada. En el caso de la asignación multifrecuencia de un sector, dicho sector incluye tantas BS como frecuencias asignadas haya. La conectividad a múltiples ASN-GW debe ser requerida en el caso de carga balanceada o propósitos de redundancia.

2.5.2.1.2. ASN-GW

Una pasarela ASN es una entidad lógica que actúa típicamente como un punto de agregación de tráfico de la capa de enlace dentro del ASN e incluye:

- Funciones de control entre entidades pares.
- Encaminamiento plano de portadora o funciones de puente.

Una entrada completamente redundante de la red del servicio del acceso (ASN-GW) conecta las estaciones bajas de WiMAX con la red de la base. Con una capacidad de hasta 256 BS por unidad, el ASN-GW puede manejar las conexiones de más de 288.000 suscriptores, con 8.000 de ellos activos simultáneamente. Las funciones principales del ASN-GW son: gestión y paginación de la localización dentro del ASN, gestión de los recursos de radio, claves de encriptación, funcionalidad de cliente de AAA, establecimiento y gestión de la movilidad con las estaciones base, aplicaciones de QoS, funcionalidad de agente externo para Mobile IP y envío a los CSN seleccionados.

2.5.2.1.3. Perfiles de ASN.

Hay tres opciones de implementación de ASN: A, B y C. Según el perfil, algunas funcionalidades son implementadas por la BS o la ASN-GW o algún otro elemento.

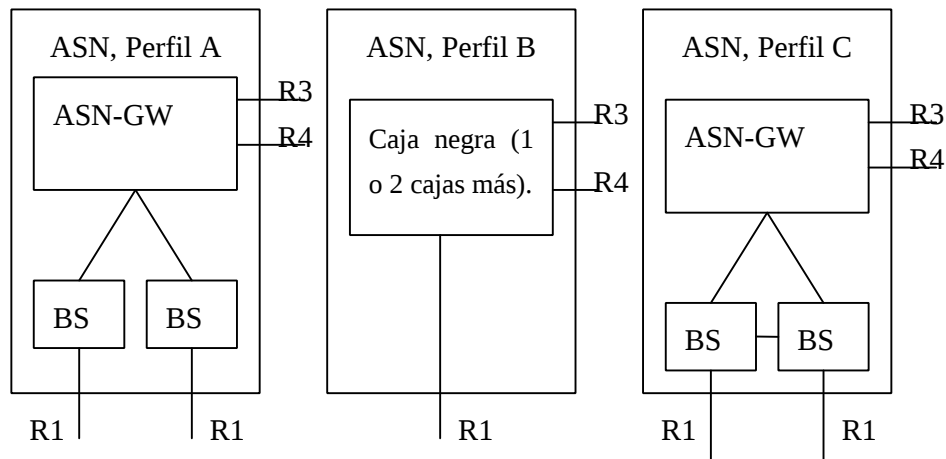


Figura 7. Perfiles ASN.

2.5.2.2. CSN

El CSN consiste en unas funciones y equipos que permiten la conectividad IP a los suscriptores WiMAX. Por ello, el CSN incluye las siguientes funciones:

- Autorización de conexión de usuario en la capa de acceso 3.
- Administración de la QoS.
- Soporte de movilidad basado en Mobile IP.
- Tunelado (basado en protocolos IP) con otros equipos o redes.
- Facturación de los suscriptores WiMAX.
- Servicios WiMAX (acceso a Internet, servicios de localización, conexión de servicios Peer-To-Peer, aprovisionamiento, autorización y/o conexión a gestores de bases de datos o IMS).

2.5.2.3. Puntos de referencia

El modelo de referencia de redes WiMAX define varios puntos de referencia entre las distintas entidades que componen la arquitectura de esta red. Esos puntos de referencia logran puntos de interoperabilidad entre equipos de diferentes fabricantes. Hay seis puntos de referencias obligatorios (del R1 al R6) y dos opcionales (R7 y R8).

- R1: Punto de referencia de la interfaz radio entre el MS y el ASN. Incluye todas las características físicas y MAC de los perfiles de WiMAX. Lleva tráfico de usuario y mensajes de control de usuario.
- R2: Es la interfaz lógica entre el MS y el CSN. Contiene los protocolos y otros procedimientos implicados en la autenticación, servicios de autorización y administración de la configuración IP.
- R3: Es la interfaz lógica entre el ASN y el CSN. Transporta mensajes del plano de control e información del plano de datos a través de un tunelado entre el ASN y CSN.
- R4: Punto de referencia que interconecta dos ASNs (ASN perfil B) o dos ASN-GW (ASN perfiles A o C). Transporta mensajes del plano de control y de datos, especialmente durante el traspaso de un usuario WiMAX entre ASNs/ASN-GWs. Presenta interoperabilidad entre ASNs de diferentes fabricantes.
- R5: Punto de referencia que interconecta dos CSNs. Consiste en el juego de métodos del plano de control y de datos para la comunicación entre el CSN del NSP visitante y el NSP.
- R6: Es específico de algunos de los perfiles de ASN. En aquellos en los que el ASN se subdivide en BS y ASN-GW que corresponden con los perfiles A y C. Por tanto, este punto de referencia no es aplicable al perfil B. R6 se encarga de unir el BS y el ASN-GW. Transporta mensajes del plano de control y de datos.
- R7 y R8: R7 es una interfaz lógica opcional entre funciones de decisión y aplicación en el ASN-GW. R8 es una interfaz lógica entre estaciones base y transporta flujo de intercambio del plano de control que sirve para permitir un rápido y eficiente traspaso entre estaciones base.

2.6. Arquitectura de protocolos de WiMAX

Este estándar provee especificaciones de la capa física (Physical layer - PHY) y la capa de control de acceso al medio (Medium Access Control layer - MAC) para redes inalámbricas de banda ancha con topología punto-multipunto y en malla. Estas capas se corresponden con las capas bajas del modelo OSI (Open System Interconnection), la capa física y la capa de enlace respectivamente. Tendrá que soportar una gran variedad de aplicaciones de datos, voz y video con un valor específico en calidad de servicio QoS. MAC deberá estar estructurado para poder soportar diferentes tipos de PHY cada uno hecho para situaciones muy particulares.

La banda entre 2 y 11 GHz tiene un entorno físico, debido a la longitud de onda, en el que no es necesaria la tecnología LOS, o visión directa, en cambio el multitrayecto podría ser significativo. Por lo tanto se incluyen medidas adicionales en PHY para poder trabajar en NLOS, y soportar avanzadas técnicas de la gestión de potencia, mitigación de interferencias y la posibilidad de coexistencia con múltiples antenas.

También se introducen características en MAC, como por ejemplo ARQ para acabar con las pérdidas inherentes dadas por el comportamiento del medio inalámbrico, y para poder soportar tanto topología punto a punto como topología de malla. Como sabemos, dentro de esta banda hay frecuencias que son no licenciadas, y hay que denotar que al ser una banda libre o no licenciada habrá más interferencias ya que al no existir una regulación pues hay más potencia radiada en esta banda por múltiples transmisores. Además PHY y MAC introducen mecanismos para detectar y/o evitar interferencias.

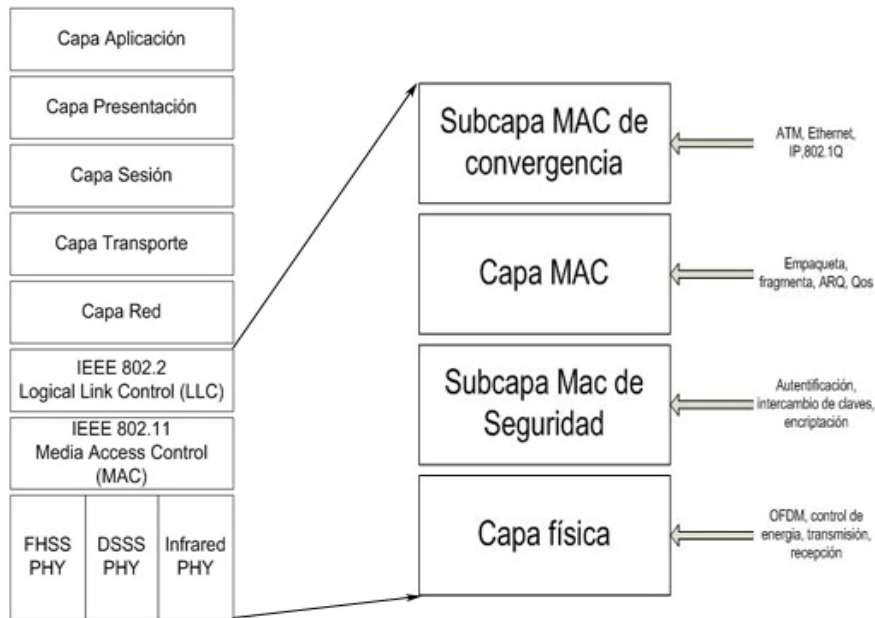


Figura 8. Torre protocolos 802.11 y capa PHY y MAC 802.16

2.7. WiMAX capa PHY

Como el nombre indica, el objetivo de la capa física es el transporte de los datos. Esta capa física llamada PHY está basada en los estándares 802.16-2004 y 802.16e-2005 y para su diseño se basaron mucho en las especificaciones de Wi-Fi, especialmente en la norma del IEEE 802.11a. A pesar de que muchos aspectos de estas dos tecnologías son diferentes, debido a los diferentes propósitos y aplicaciones para las que son diseñadas, algunos de sus pilares básicos son muy similares. Como Wi-Fi, WiMAX está basado en los principios de la multiplexación por división de frecuencias ortogonales (OFDM), la cual es una técnica de modulación/acceso conveniente para condiciones de ausencia de visión directa NLOS con altas tasas de datos. En WiMAX, sin embargo, los parámetros dentro de la capa física son muy diferentes a los de Wi-Fi, ya que ambas tecnologías van a trabajar en entornos muy diferentes.

El estándar IEEE 802.16 es una suite de estándares (IEEE 802.16-2004/IEEE 802.16e-2005) que define cuatro tipos de capas PHY, y cualquiera puede ser usada con la capa de control de acceso al medio (MAC) para desarrollar un sistema inalámbrico de banda ancha. Las capas PHY definidas en la IEEE 802.16 son:

- WirelessMAN SC
- WirelessMAN SCa
- WirelessMAN OFDM,
- WirelessMAN OFDMA

La siguiente figura (figura 9) muestra los diferentes niveles funcionales de la capa PHY de WiMAX. El primer conjunto de niveles está relacionado con los mecanismos de corrección de errores (FEC), e incluye la codificación del canal, adaptación de velocidad (mediante la técnica de puncturing - una técnica que elimina algunos de los bits redundantes o de repetición), interlineado y el mapeado de símbolos. El siguiente bloque de funcionalidades está relacionado con la construcción del símbolo OFDM en el dominio de la frecuencia. Durante esta fase, los datos son mapeados en los subcanales y subportadoras apropiadas. Este bloque también es responsable de todas las codificaciones en espacio/tiempo para transmitir diversidad o MIMO, si es implementada. El último bloque de funciones está relacionado con la conversión del símbolo OFDM del dominio de la frecuencia al dominio del tiempo y eventualmente a una señal analógica que pueda ser transmitida por el aire. A pesar de que la figura sólo muestra los componentes del transmisor, en el receptor existen componentes similares pero están colocados en orden inverso.

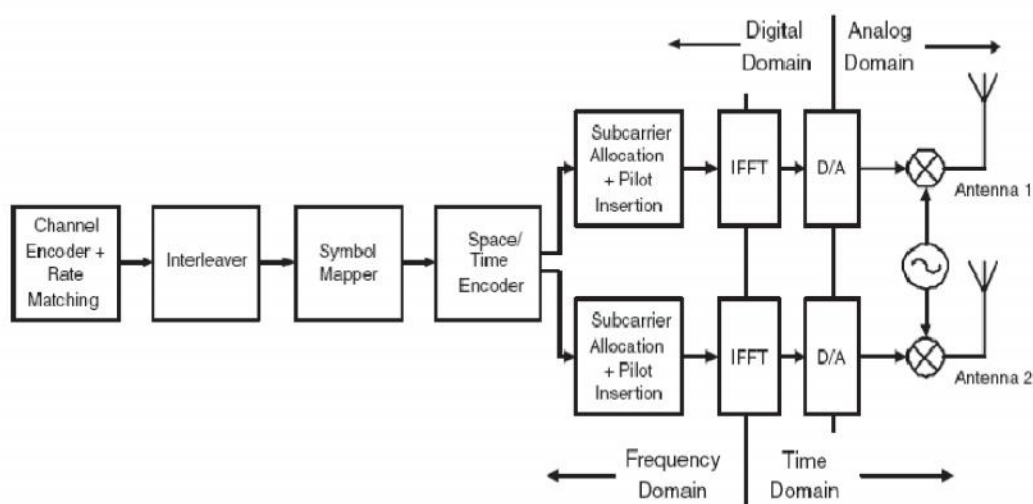


Figura 9. Niveles funcionales capa PHY.

2.7.1. Bases OFDM

OFDM pertenece a una familia de esquemas de transmisión llamada modulación multiportadora, la cual está basada en la idea de dividir un flujo de datos con una alta tasa de bits en varios flujos paralelos con menos tasa de bits y modulando cada uno en portadoras separadas – frecuentemente llamadas subportadoras, o tonos. Los esquemas de modulación multiportadora eliminan o minimizan la interferencia entre símbolos (ISI) haciendo que el tiempo de símbolo sea lo suficientemente grande para que el canal introduzca retardos.

La tecnología por multiplexación por división en frecuencia ortogonal (OFDM), proporciona al operador, en términos de eficiencia, llegar a superar los retos de la propagación en entorno NLOS. La señal OFDM ofrece la ventaja de ser capaz de operar con un retardo de ensanchamiento más grande en el ambiente NLOS.

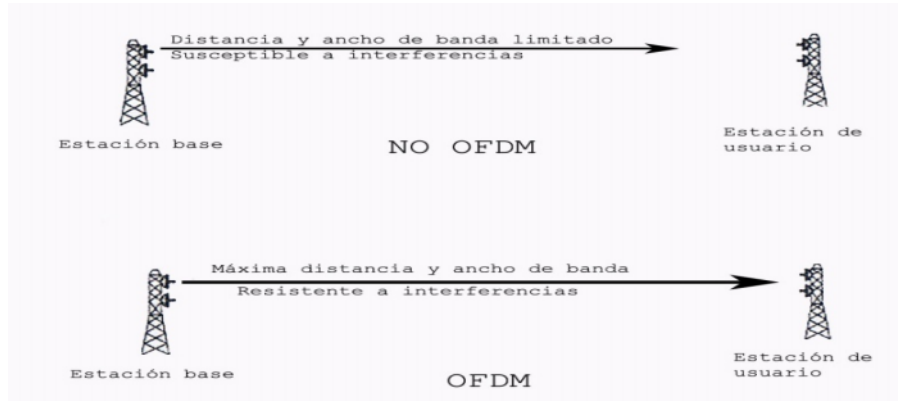


Figura 10. Tecnología OFDM.

Gracias a que la señal OFDM está compuesta por una multitud de portadoras de banda estrecha ortogonales entre sí, la selección del “fading” se localiza en un conjunto de portadoras que son relativamente fáciles de ecualizar. Un ejemplo de esto se muestra a continuación, donde se compara entre la señal OFDM y una simple señal portadora, como la información se manda en paralelo por la OFDM y en serie para la señal simple.

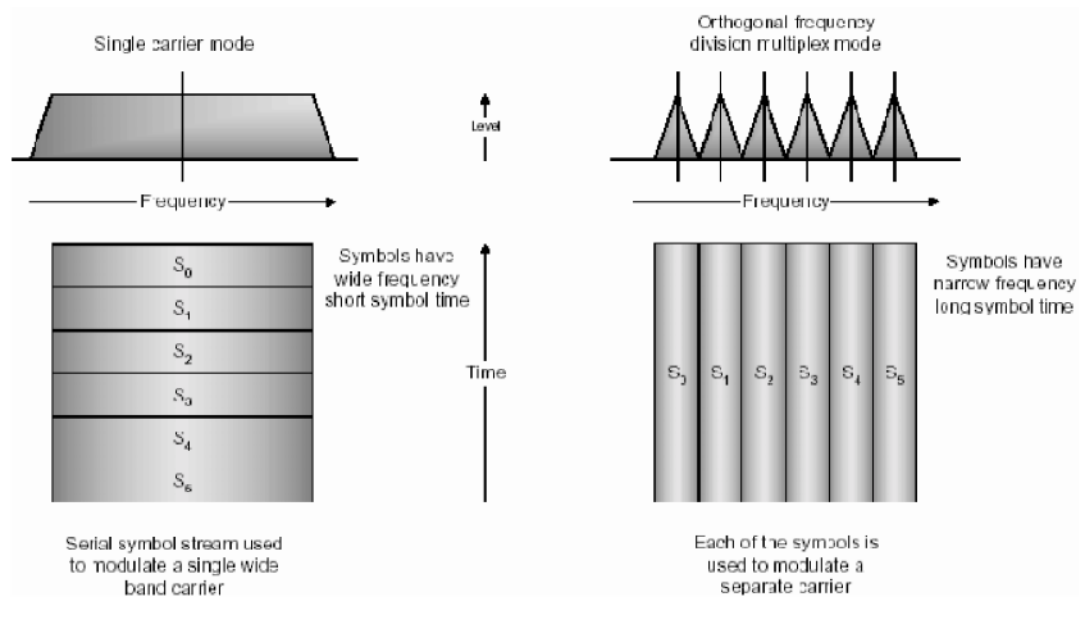


Figura 11. Composición una señal OFDM.

Por tanto, estamos hablando de que OFDM es una versión espectralmente eficiente de la modulación multiportadora, en la cual todas las subportadoras son ortogonales entre si durante el tiempo de símbolo. Eligiendo la frecuencia de la primera portadora para que tenga un número entero de ciclos dentro del tiempo de símbolo, y fijando el espaciado entre subportadoras (ancho de banda de cada subportadora) para que sea $B_{sc} = B/L$, donde B es el ancho de banda total, y L es el número de subportadoras. Así aseguramos que todos los tonos son ortogonales entre si durante el tiempo de símbolo. Podemos observar que la señal OFDM es equivalente a la transformada inversa discreta de Fourier (IDFT) del bloque de datos de L subportadoras. Esto hace que sea bastante fácil implementar un transmisor OFDM y un receptor en el tiempo discreto usando la transformada inversa rápida de Fourier (IFFT) y la transformada rápida de Fourier (FFT) respectivamente.

El tamaño de la FFT en un diseño OFDM debe ser elegido con cuidado como un compromiso entre la protección ante el multitrayecto, la variación de la frecuencia (Doppler shift) y el diseño del sistema en coste y complejidad. Para un ancho de banda dado, seleccionar un tamaño extenso de la FFT supondrá la reducción del espaciado de las subportadoras así como el incremento del tiempo de símbolo. Esto hace más fácil la protección ante el retardo por multitrayecto, pero sin embargo, tener un espaciado entre subportadoras reducido hace que el sistema sea más vulnerable a interferencias entre portadoras debido al efecto Doppler en las aplicaciones móviles.

Por todas estas razones los recientes estándares internacionales tales como los la IEEE 802.16, ETSI BRAN, han establecido OFDM como la elección tecnológica preferida.

2.7.2. Subcanalización: OFDMA

Se pueden dividir las subportadoras disponibles en varios grupos llamados subcanales. WiMAX fijo basado en una capa física OFDM solamente permite una forma limitada de subcanalización en el enlace ascendente. El estándar define 16 subcanales, donde se pueden asignar 1, 2, 4, 8, o todos los conjuntos a una estación de abonado en el enlace ascendente.

La subcanalización del enlace ascendente en WiMAX fijo permite a las estaciones de abonados transmitir utilizando solamente una fracción del ancho de banda que le asigna la estación base, lo que proporciona mejoras económicas en el enlace que se pueden utilizar para aumentar el rendimiento y/o mejorar la duración de las baterías de las estaciones de abonado. Un factor de subcanalización de 1/16 proporciona una mejora de 12 dB en el enlace.

Sin embargo, la versión móvil de WiMAX, cuya capa física está basada en OFDMA, permite subcanalizar tanto en el enlace ascendente como el enlace descendente, y aquí los subcanales forman la unidad mínima de recursos de frecuencia asignados por la estación base. Por lo tanto, se pueden asignar subcanales diferentes a usuarios diferentes como un mecanismo de acceso múltiple. Este tipo de esquema de multiacceso se llama acceso múltiple por división de frecuencia ortogonal (OFDMA) que da nombre a la capa física WiMAX móvil.

Se pueden constituir subcanales utilizando subportadoras contiguas o subportadoras distribuidas pseudo-aleatoriamente en el espectro de frecuencia.

Los subcanales formados utilizando subportadoras distribuidas proporcionan más diversidad frecuencial, lo cual es especialmente útil para aplicaciones móviles. WiMAX define varios esquemas de subcanalización basados en portadoras distribuidas tanto en el enlace ascendente como en el enlace descendente. Uno de ellos llamado uso parcial de subportadoras (PUSC) es obligatorio para todas las implementaciones móviles de WiMAX. Los perfiles de WiMAX iniciales definen 15 y 17 subcanales para el enlace descendente y el enlace ascendente, respectivamente, para operaciones con el esquema PUSC y 5MHz de ancho de banda. Para operaciones de 10MHz, se definen 30 y 35 canales respectivamente.

El esquema de subcanalización WiMAX basado en subportadoras contiguas se llama banda adaptativa de modulación y codificación (AMC). Aunque se pierde la diversidad frecuencial, la banda AMC permite diseñar el sistema para explotar la diversidad de usuarios, asignando los subcanales a los usuarios basándose en su respuesta frecuencial. La diversidad de multiusuarios puede proporcionar una ganancia significativa en toda la capacidad del sistema, si el sistema procura proporcionar a cada usuario un subcanal que maximice su relación señal a ruido más interferencias (SINR). En general, la subcanalización basada en subportadoras contiguas es más apropiada para aplicación fijas o con poca movilidad.

2.7.3. OFDM: ventajas y desventajas.

OFDM ofrece diferentes ventajas sobre otras soluciones para transmisiones a grandes velocidades, vamos a ver a continuación las más importantes:

- Reducida complejidad computacional: OFDM puede ser implementada fácilmente usando FFT/IFFT, y los requisitos del proceso solo crecen ligeramente más rápido que linealmente con la tasa de datos o el ancho de banda. La complejidad computacional de OFDM se puede calcular como $B \cdot \log(B^2 \cdot T_m)$ $B \cdot \log(B \cdot T_m)$, donde B es en ancho de

banda y T_m es el retraso de propagación. Esta complejidad es mucho más baja que la de un sistema estándar basado en un ecualizador, el cual tiene una complejidad de valor $B^2 \cdot T_m$.

- Degradación aceptable de la calidad de transmisión bajo un retraso excedente: La realización de un sistema de OFDM se degrada aceptablemente a medida que el retraso de propagación excede el valor para el que ha sido diseñado. Se puede utilizar una codificación mayor y un tamaño menor de la constelación para proporcionar tasas alternativas que son de modo significativo más robustas contra el retraso de propagación. De otro modo OFDM está bien adaptado a modulaciones y codificaciones adaptativas, lo que permite al sistema aprovechar al máximo las condiciones del canal. Esto contrasta significativamente con la degradación abrupta que sufren los sistemas monoportadores debido a la propagación de errores cuando el retardo supera el valor para el cual el ecualizador ha sido diseñado.
- Explotación de la diversidad en frecuencia: OFDM facilita la codificación y el interlineado en las subportadoras en el dominio de la frecuencia, lo que puede proporcionar robustez contra ráfagas de errores causados por porciones del espectro transmitido que experimentan intensas atenuaciones. De hecho, WiMAX define permutaciones de subportadoras que permiten al sistema explotar esto.
- Utilización de un esquema de multiacceso: Se puede utilizar OFDM como un esquema de multiacceso donde los diferentes tonos son divididos entre los múltiples usuarios. Este esquema se denomina OFDMA y es utilizado en WiMAX móvil. Este esquema también ofrece la capacidad de proporcionar buenas particularidades en la asignación de canal. En canales relativamente lentos y variables en el tiempo, es posible mejorar de modo significativo la capacidad adaptando la tasa de datos por abonado según la relación señal/ruido de esa subportadora en particular.
- Robusto frente a interferencias de banda estrecha: OFDM es relativamente robusto contra interferencia de banda estrecha, puesto que esta interferencia afecta solamente a una fracción de las subportadoras.
- Adecuado para demodulación coherente: Es relativamente fácil hacer una estimación del canal piloto en sistemas OFDM, lo cual es adecuado para esquemas de demodulación coherentes que son más eficaces en rendimiento.

A pesar de estas ventajas, las técnicas de OFDM también afrontan varios desafíos. Primero está el problema asociado con las señales OFDM que tienen un pico de proporción media elevado que causa no linealidad y distorsión recortada. Esto puede conducir a impulsar ineficiencias que necesitan ser contrarrestadas. Segundo, las señales OFDM son muy susceptibles al ruido de fase y a la dispersión de frecuencia, y el diseño debe atenuar estas imperfecciones. Esto también hace crítico tener sincronización de frecuencia exacta.

2.7.4. Parámetros OFDM en WiMAX

Como hemos comentado anteriormente, las versiones fijas y móviles de WiMAX tienen diferentes implementaciones de OFDM en la capa física PHY. Para WiMAX fijo, basado en la norma IEEE 802.16-2004, se usa una capa física basada en OFDM con una FFT 256 subportadoras de tamaño. Para WiMAX móvil, basado en la norma 802.16-2005, se usa una capa física basada en OFDMA variable. En el caso de WiMAX móvil, el tamaño de la FFT puede variar desde 128 hasta 2048 subportadoras.

La siguiente tabla muestra los parámetros relativos a OFDM para ambas capas físicas, la basada en OFDM y la basada en OFDMA. Los parámetros que se muestran en la tabla están limitados a un conjunto de perfiles que son posibles, pero no constituyen un conjunto exhaustivo de todos los posibles valores.

Parámetro	WiMAX fijo OFDM-PHY	WiMAX móvil OFDMA-PHY			
Tamaño FFT	256	128	512	1024	2058
Número de subportadoras usadas para datos	192	72	360	720	1440
Número de subportadoras piloto	8	12	60	120	240
Número de subportadoras de guarda	56	44	92	184	368
Tiempo de guarda (T_g/T_b)	1/32, 1/16, 1/8, 1/4				
Tasa de sobremuestreo (F_s/BW)	Depende del ancho de banda : 7/6 para 256-OFDM, 8/7 para múltiplos 1.75MHz, y 28/25 para múltiplos de 1.25, 1.5, 2, 2.75 MHz				
Ancho de banda del canal (MHz)	3.5	1.25	5	10	20
Espaciado de frecuencia entre subportadoras (KHz)	15.625	10.94			
Tiempo de símbolo útil (μs)	64	91.4			
Tiempo de guarda suponiendo 12.5% (μs)	8	11.4			
Duración del símbolo OFDM (μs)	72	102.9			
Numero de símbolos OFDM en un trama 5ms	69	48.0			

Tabla 3. Parámetros OFDM.

Capa física WiMAX fijo (OFDM-PHY): Para esta versión el tamaño de la transformada rápida de Fourier (FFT) está fijada en 256 subportadoras, de las cuales 192 son subportadoras para transportar datos, 8 son usadas como subportadoras piloto para propósitos relacionados con la estimación y la sincronización del canal, y el resto son usadas como subportadoras de la banda de guarda. Puesto que el tamaño de la FFT es fijo, el espaciado entre subportadoras varía con el ancho de banda del canal. Cuando se utilizan grandes anchos de banda, el espaciado entre subportadoras aumenta y el tiempo de símbolo disminuye. Que el tiempo de símbolo disminuya significa que será necesario asignar una mayor fracción de tiempo de guarda con el propósito de superar la difusión de retardos. Como muestra la tabla anterior, WiMAX permite una gran cantidad de tiempos de guarda, por eso permite a los diseñadores del sistema realizar intercambios entre la eficiencia espectral y la robustez frente a la difusión de retardo. Para alcanzar la máxima robustez frente a difusión de retardo, se puede usar un 25 por ciento de la banda de guarda.

Capa física WiMAX móvil (OFDMA-PHY): El tamaño de la FFT puede variar entre 128 y 2048 subportadoras. En este caso cuando el ancho de banda aumenta, el tamaño de la FFT también se ve incrementado para que el espaciado entre las subportadoras siempre sea 10,94KHz, esto mantiene la duración del símbolo OFDM fijo y por tanto las capas superiores no se tienen que preocupar de esto. Un diseño escalable también mantiene los costes bajos. El espaciado de 10.94KHz fue elegido como un buen equilibrio para satisfacer el retardo de propagación y el efecto Doppler y así poder operar en entornos fijos y móviles mixtos. Este espaciado entre subportadoras puede soportar un retardo de hasta 20 μ s y una movilidad de hasta 125km por hora cuando opera a 3.5GHz. El espaciado entre subportadoras de 10.94KHz implica que se usen FFT de 128, 512, 1024 y 2048 bits cuando el ancho de banda del canal es 1.25MHz, 5MHz, 10MHz y 20MHz respectivamente. Debería ser anotado, sin embargo, que WiMAX móvil puede incluir otros perfiles de ancho de banda adicionalmente. Por ejemplo, un perfil compatible con WiBro utilizara un canal de 8.75 MHz de ancho de banda y una FFT de 1024 bits. Este perfil requerirá evidentemente un espacio entre subportadoras diferente y por tanto no tendrá las mismas propiedades de escala.

2.7.5. Modulación y codificación soportada en WiMAX

WiMAX soporta una variedad de esquemas de modulación y codificación que permite que el esquema cambie en cada ráfaga básica, dependiendo de las condiciones del canal. La estación base puede medir la calidad del enlace ascendente y descendente de cada usuario, y así asignarle una modulación y una codificación que maximice la tasa de transferencia para la proporción señal/ruido disponible. Por tanto la modulación y codificación adaptativa incrementan significativamente la capacidad de todo el sistema, y permite la compensación en tiempo real entre la tasa de transferencia y la robustez de cada enlace. La siguiente tabla muestra una lista de varios esquemas de modulación y codificación soportados en WiMAX. En el enlace descendente las modulaciones QPSK, 16 QAM y 64 QAM son obligatorios para WiMAX fijo y móvil; mientras que en el enlace ascendente 64 QAM es opcional. La codificación FEC es obligatoria si usamos códigos convolucionales. Un total de 52 combinaciones de esquemas de modulación y codificación están definidas en WiMAX.

	Enlace descendente	Enlace ascendente
Modulación	BPSK, QPSK, 16 QAM, 64 QAM; y BPSK opcional para OFDMA-PHY	BPSK, QPSK, 16 QAM, 64 QAM opcional
Codificación	Obligatorio: códigos convolucionales de tasa 1/2, 2/3, 3/4, 5/6.	Obligatorio: códigos convolucionales de tasa 1/2, 2/3, 3/4, 5/6
	Opcional: turbo códigos convolucionales de tasa 1/2, 2/3, 3/4, 5/6; códigos de repetición de tasa 1/2, 1/3, 1/6. LDPC, códigos RS para OFDM-PHY	Opcional: turbo códigos convolucionales de tasa 1/2, 2/3, 3/4, 5/6; códigos de repetición de tasa 1/2, 1/3. LDPC.

Tabla 4. Modulaciones y codificaciones soportadas en WiMAX.

2.7.6. Capas PHY

WiMAX tiene cinco variantes, estas se diferencian en su PHY. Estas variantes las podemos dividir en dos grupos dependiendo si usa una única portadora (SC – Single Carrier) o usa OFDM. También están divididas según la frecuencia que cubren, que puede ser de 2 a 11 GHz o de 10 a 66 GHz. Ahora vamos a ver un resumen de cada una de las variantes así como una tabla que nos presenta una visión general de estas.

Designación	Función	LOS/NLOS	Frecuencia	Duplexión alternativa
WirelessMAN-SC	Punto a punto	LOS	10-66GHz	TDD,FDD
WirelessMAN-SCa	Punto a punto	NLOS	2-11GHz	TDD, FDD
WirelessMAN-OFDM	Punto a multipunto	NLOS	2-11GHz	TDD,FDD
WirelessMAN-OFDMA	Punto a multipunto	NLOS	2-11GHz	TDD, FDD
Wireless HUMAN	Punto a multipunto	NLOS	2-11 GHz	TDD

Tabla 5. Variantes capa PHY.

- WirelessMAN-OFDM: Está basada en la modulación OFDM para ambientes NLOS y en bandas de frecuencia por debajo de los 11GHz. Su orientación es principalmente los accesos fijos como residencias y empresas. Los símbolos OFDM están conformados por cierto número de subportadoras, el cual depende de la FFT que se aplique y en este caso se usa OFDM con 256 subportadoras. El acceso se realiza mediante TDMA (Time Division Multiple Access) y es obligatorio para bandas exentas de licencia. La capa física OFDM admite subcanalización en el enlace de subida, hasta 16 subcanales. También soporta técnicas TDD y FDD, la primera es una técnica en la cual el sistema recibe y transmite dentro del mismo canal de frecuencia, asignando una porción de tiempo para transmitir y otra para recibir, mientras que la segunda es una técnica que requiere dos frecuencias separadas de 50 a 100MHz dentro de la banda de funcionamiento para transmitir y recibir. También soporta múltiples modulaciones incluyendo BPSK, QPSK, 16-QAM y 64-QAM. Finalmente el enlace descendente admite diversidad en transmisión usando STC (Space Time Coding) y ASS con SDMA (Spatial Division Multiple Access); técnicas que vamos a ver a continuación:
 - o STC es un método empleado para mejorar la fiabilidad de los datos en la transmisión inalámbrica usando múltiples antenas. STC se basa en el envío de múltiples y redundantes copias de los flujos de datos al receptor esperando que

al menos uno de ellos llegue con seguridad.

- o AAS es una técnica donde se usan un conjunto de antenas en las estaciones bases para incrementar la ganancia hacia las estaciones de usuarios mientras se anulan las interferencias desde y hacia otras estaciones de usuarios y de las fuentes de interferencias. Esta técnica es usada para permitir que varias estaciones de usuarios separadas espacialmente puedan transmitir y recibir en el mismo subcanal a la vez, a esto lo llamamos SDMA. La estación base puede dirigir la señal deseada a las diferentes estaciones de usuarios y puede distinguirlos aunque estén operando en el mismo subcanal.

- WirelessMAN-OFDMA: Esta especificación está diseñada para enlaces NLOS en bandas de frecuencia por debajo de los 11GHz, con canales para bandas licenciadas de ancho igual al ancho de banda asignado por el ente regulador al operador dividido entre alguna potencia de dos sin ser menor a 1MHz y utilizando modulaciones QPSK, 16-QAM ó 64-QAM.

Esta variante usa OFDMA con 2048 subportadoras. En este sistema se consigue el acceso múltiple mediante el direccionamiento de un conjunto de las múltiples portadoras hacia un receptor individual. Debido a las necesidades de la propagación se admite el uso de AAS. WirelessMAN-OFDMA está basado en la modulación OFDM, soporta operaciones TDD y FDD, y los mismos niveles de modulación que OFDM, pero en este caso permite subcanalización en ambos enlaces, el ascendente y el descendente, además de soportar cinco esquemas diferentes de subcanalización. Por último, también soporta STC y ASS con SDMA así como MIMO. MIMO engloba un conjunto de técnicas para utilizar múltiples antenas en la estación base y en la estación de usuario para conseguir aumentar la capacidad y alcance del canal.

- WirelessHUMAN: Diseñada para canales de frecuencia de 10MHz y 20MHz, espaciados 5MHz entre sí, en la banda de frecuencia de 5GHz a 6GHz (EEUU y Europa). Es una variante similar a las mencionadas anteriormente que usa TDD y está basada en esquemas OFDM y centrado en dispositivos de la UNII (Unlicensed National Information Infrastructure) y otras bandas sin licencia.
- WirelessMAN-SC: Está diseñada para bandas de frecuencia entre 10GHz y 66GHz con multiplexación tipo TDD o FDD, en canales de frecuencia que pueden estar entre 20MHz y 28MHz, y los anchos de banda para la transmisión están entre 32Mbps y 134.4Mbps; estos valores varían dependiendo de la técnica de modulación utilizada, la cual puede ser QPSK, 16-QAM ó 64-QAM. En esta arquitectura punto a punto, la estación base

transmite una señal multiplexada por división en el tiempo (TDM), con time-slots en serie para cada estación de usuario. Utiliza para el diseño de las ráfagas de datos tanto TDD, en el cual el enlace ascendente y el descendente comparten canal pero no transmiten simultáneamente, como FDD, en el que los enlaces pueden operar simultáneamente pero en diferentes canales.

- **WirelessMAN- SCA Single Carrier Acces:** Está basada en una tecnología de una sola portadora, para aplicaciones NLOS en las bandas de frecuencia por debajo de los 11GHz. Para las bandas que requieren licencia, el ancho de banda del canal debe ser igual al ancho de banda asignado por el ente regulador dividido entre una potencia de dos sin llegar a ser menor a 1.25MHz. Debe soportar bien sea TDD o FDD para el uso del espectro y las modulaciones que implementa son: BPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM y 256-QAM.

2.8. Capa MAC (Medium Access Control)

La principal tarea de la capa MAC de WiMAX es la de proporcionar una interfaz entre la capa de transporte y la capa física. La capa MAC toma los paquetes de la capa inmediatamente superior, estos paquetes se llaman MAC Service Data Units (MSDUs), y los organiza dentro de los paquetes denominados MAC Protocol Data Units (MPDUs) para transmitirlos por el aire. Para la recepción la capa MAC hace lo mismo pero en orden inverso.

Esta es la otra capa característica del protocolo IEEE 802.16, fue diseñado para accesos a las aplicaciones PMP (Punto a MultiPunto) de banda ancha de muy alta tasa de datos y con una variedad de requisitos de calidad de servicios (QoS), por lo que está orientado a conexión. Permite que el mismo terminal sea compartido por múltiples usuarios. Lo que hace flexible a este sistema es que maneja algoritmos que permiten que cientos de usuarios finales puedan tener distintos requisitos de ancho de banda y de retardo.

Esta capa también se encarga de manejar la necesidad de tener una tasa de bits alta, tanto para el enlace ascendente (hacia la BS) como para el enlace descendente (desde la BS). El sistema ha sido diseñado para incluir multiplexación por división del tiempo de voz y datos, protocolo de Internet (IP), y voz sobre IP (VoIP).

El protocolo IEEE 802.16, debe soportar los variados requisitos de conectividad, como el modo de transferencia asíncrono (ATM) y protocolos basados en paquetes.

La capa MAC que es la encargada de coordinar el acceso al medio está compuesta de 3 subcapas:

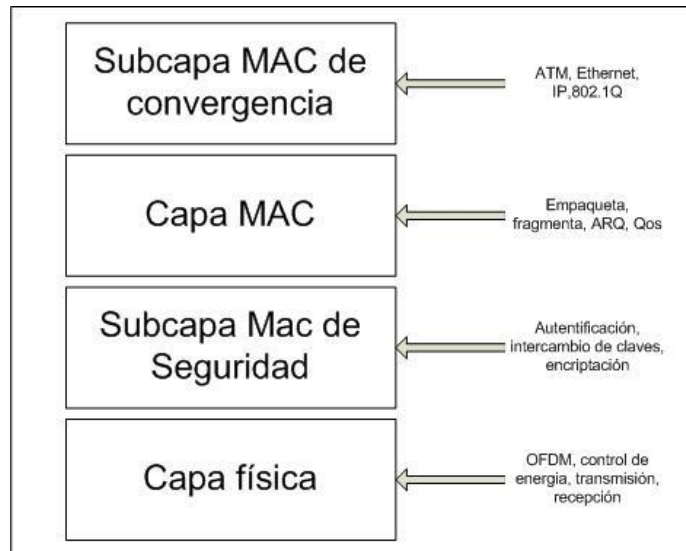


Figura 12. Subcapas de la capa MAC.

- Subcapa MAC de convergencia (CS): es la encargada de adaptar las unidades de datos de protocolos de alto nivel al formato MAC SDU y viceversa. Es decir se encarga de transformar los datos de las redes externas y pasarlos a la subcapa MAC común convertidos en unidades de datos del servicio o SDU (Service Data Units), que son las unidades de datos que se transfieren entre capas adyacentes. Se encuentra sobre la subcapa MAC común y utiliza los servicios proveídos por ésta. También se encarga de clasificar las SDUs de la MAC entrantes a las conexiones a las que pertenecen.
- Subcapa MAC común (MAC CPS): Es el núcleo de la toda la capa MAC, provee los servicios de acceso al sistema, asignación de ancho de banda, establecimiento y mantenimiento de la conexión y se establecen las unidades de datos de protocolo o PDU (Protocol Data Units). También se encarga de hacer el intercambio de la unidad de servicios de datos de la capa MAC (SDU) con la capa de convergencia. Esta subcapa se encuentra fuertemente ligada con la capa de seguridad.

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:

- o Concesión no Solicitada (UGS)
 - o Polling en tiempo real (rtPS)
 - o Polling no en tiempo real (nrtPS)
 - o Mejor Esfuerzo (BE)
- Subcapa MAC de seguridad: 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. La subcapa de seguridad es la encargada de la autenticación, establecimiento de claves y encriptación. Es en ella donde se realiza el intercambio de los PDUs de la MAC con la capa física.

2.8.1. Topologías

Una red que utiliza un medio compartido debe proveer un mecanismo eficiente de compartición. Las topologías PMP (Punto-Multipunto) y Mesh (Malla) de las redes inalámbricas son ejemplos de medios inalámbricos compartidos. Aquí el medio es el aire a través del cual se propagan las ondas de radio.

2.8.1.1. Topología Punto-Multipunto

El enlace descendente, de la estación base al usuario, opera como punto a multipunto. El estándar IEEE 802.16 tiene una estación base central con una antena sectorizada capaz de manejar múltiples sectores independientes simultáneamente.

Dentro de un canal de frecuencia dado y un sector de antena, todas las estaciones reciben la misma transmisión o parte de ella. La estación base es el único transmisor funcionando en esta dirección en el enlace descendente, de manera que transmite sin necesidad de coordinar con otras estaciones, excepto en la duplexión por división de tiempo que puede dividir en períodos de transmisión del enlace ascendente y del descendente. El enlace descendente es generalmente de difusión.

Las estaciones de abonado comparten bajo demanda el enlace ascendente hacia la estación base. Dependiendo de la clase de servicio utilizada, la estación de abonado puede transmitir con total libertad, o bien necesita un permiso que deberá solicitarlo a la estación base.

Dentro de cada sector, los usuarios adhieren un protocolo de transmisión que controla los mecanismos de contienda entre usuarios y que permiten que el servicio se adapte a los

requisitos de ancho de banda y retardo de cada aplicación. Esto se implementa usando anchos de bandas no solicitados, por sondeo, y por mecanismos de contienda en cinco mecanismos diferentes en el enlace ascendente. Estos mecanismos son definidos en los protocolos para permitir a los proveedores optimizar el rendimiento del sistema usando diferentes combinaciones de técnicas de asignación de ancho de banda mientras se mantienen de forma coherente los criterios de interoperabilidad. Por ejemplo, los mecanismos de contienda son usados para evitar los largos periodos de inactividad a los que se sometería el sistema si se usa una técnica de sondeo a cada estación.

El uso de sondeo simplifica la operación de acceso y garantiza que la aplicación reciba un determinado servicio con unas determinadas características si así se requiere. En general, las aplicaciones basadas solo en datos son tolerantes al retardo, pero las aplicaciones de tiempo real como vídeo y voz requieren servicios sobre una base más uniforme y a veces una conmutación estrictamente controlada.

La capa MAC es orientada a conexión. Para las propuestas de mapeo de los servicios en la estación de usuario y la asociación de éstos a los diferentes niveles de QoS, todas las comunicaciones de datos están también en el contexto de la conexión. Los flujos de servicio pueden ser suministrados cuando una estación de usuario se instala en el sistema. Rápidamente después del registro de la estación de usuario, las conexiones están asociadas con este flujo de servicio (una conexión por flujo de servicio) que nos dan una referencia con la que pedir ancho de banda. Adicionalmente, nuevas conexiones pueden ser establecidas cuando un servicio de cliente necesite cambios. Una conexión definirá tanto el mapeo que se produce entre pares de procesos iguales como en los flujos de servicio, y éste último como ya se dijo anteriormente definirá los parámetros de calidad de servicio requerida.

El concepto de flujo de servicio en una conexión es la operación fundamental para el protocolo MAC. El flujo de servicio provee un mecanismo para la gestión de QoS del enlace ascendente y del descendente, integrante en el proceso de asignación de ancho de banda. Una vez establecidas las conexiones, se requiere un mantenimiento que variará dependiendo del tipo de servicio necesitado. Finalmente, la conexión finalizara tanto por la estación base como por el usuario, y suele ocurrir si cambian las condiciones del contrato con el cliente.

2.8.1.2. Topología Mesh (Malla)

La diferencia principal entre este tipo de redes y las de punto a multipunto es debida al tratamiento de las comunicaciones: en las redes punto a multipunto son comunicaciones jerárquicas en las que sólo hay relación de la estación base con el usuario, en cambio en las redes tipo malla puede haber comunicación directa entre dos usuarios o dos estaciones base. Dependiente del algoritmo usado en la transmisión, puede darse una comunicación paritaria o jerárquica basada en el superior (en este caso la estación base). Además podrían darse los dos casos a la vez.

Dentro de una red Mesh, un sistema que tiene conexión directa con las redes externas de comunicación de datos se les denomina estación base Mesh. El resto de sistemas de la red de tipo malla son denominados estaciones de usuario Mesh, aunque en general todos los sistemas son llamados con el nombre genérico del nodo. Por tanto, dentro de este contexto, el enlace ascendente será entre la estación de usuario Mesh y la estación base Mesh, y el enlace descendente será al contrario.

Los otros tres términos importantes en la topología malla son neighbour o vecino, neighbourhood o vecindario, y extended neighbourhood o vecindario extendido. Si tenemos dos nodos vecinos entre ellos, se considera como un salto desde el punto de vista externo. Los vecinos de cada nodo forman una vecindad o neighbourhood. Una vecindad extendida o extended neighbourhood contiene además todos los vecinos a esa vecindad.

En un sistema de topología malla, no sólo la estación base Mesh puede transmitir sin tener que coordinarse con los otros nodos. Usando una configuración distribuida, todos los nodos, incluidas las estaciones base Mesh, deberán coordinar sus transmisiones a sus vecindades adyacentes y deberán difundir todas sus características (recursos disponibles, pedidos y concedidos) a todos sus vecinos. Opcionalmente, la conmutación puede ser establecida por peticiones y concesiones descoordinadas de forma directa entre dos nodos. Los nodos deberán asegurarse que el resultado de las transmisiones no causa colisiones con el tráfico de control y de datos programados por otro nodo de alguna vecindad externa.

Usando una configuración centralizada, los recursos son garantizados de una manera más centralizada, lo que implicaría más rapidez, pero quizás menos seguridad en el hecho de que si cae quien tiene los datos pues nos fallaría todo el sistema. La estación base Mesh deberá reunir los recursos solicitados a todas las estaciones de usuario Mesh dentro de un cierto rango de saltos. Esto deberá determinar la cantidad de recursos concedidos por cada enlace, tanto para el ascendente como el descendente, y comunicar dichas concesiones a todas las

estaciones de usuario Mesh que se encuentran en nuestro rango de saltos. Estos mensajes de concesiones no contienen la configuración actual, pero cada nodo deberá procesarlo para usar el algoritmo predeterminado con los datos recibidos. La QoS es suministrada sobre los enlaces mediante mensajes y cada mensaje tiene parámetros del servicio en su cabecera. La clasificación del tráfico y regulación del flujo es llevada a cabo por los protocolos de las capas superiores en los nodos en los que ingresan. Así cada uno de los parámetros del servicio deberá ser enviado junto con los otros, uniéndolos además con el mensaje, y enviando dicho mensaje por el SAP (Service Access Point o Punto de Acceso al Servicio) de la capa MAC a las capas superiores.

Los sistemas Mesh usan normalmente antenas omnidireccionales, pero pueden trabajar con antenas sectoriales. En el filo del área de cobertura de esta red, dónde sólo se necesita una conexión con un punto, pueden usarse antenas altamente direccionales.

2.8.2. Mecanismos de Acceso al Canal

En WiMAX, la capa MAC en la estación base es completamente responsable de asignar un ancho de banda a todos los usuarios tanto en el enlace ascendente como en el enlace descendente. La única vez en que la estación móvil tiene algún control sobre la asignación de ancho de banda es cuando tiene sesiones o conexiones múltiples con la estación base. En ese caso, la estación base asigna un ancho de banda a la estación móvil en conjunto, y depende de ésta última el repartirlo entre las conexiones múltiples que tiene. La estación base hace toda la demás planificación en el enlace ascendente y el descendente. Para el enlace descendente, la estación base puede asignar un ancho de banda a cada estación móvil, basado en las necesidades del tráfico entrante, sin implicar a la estación móvil. Sin embargo, para el enlace ascendente las asignaciones deben estar basadas en peticiones de la estación móvil.

El estándar WiMAX contiene varios mecanismos por los que una estación móvil puede solicitar y obtener ancho de banda en el enlace ascendente. Según los parámetros de QoS y tráfico particulares asociados con un servicio, la estación móvil puede utilizar uno o más de estos mecanismos. La estación base asigna recursos dedicados o compartidos periódicamente a cada estación móvil, que puede utilizar para solicitar un ancho de banda. A este proceso se le llama polling o sondeo. Se puede hacer sondeo tanto individualmente (unicast) como en grupos (multicast). Se hace sondeo multicast cuando hay ancho de banda insuficiente para sondear a cada estación móvil individualmente. Cuando se haga sondeo multicast, la ranura asignada para hacer peticiones de ancho de banda es una ranura compartida, la cual cada estación móvil

sondeada intenta usar. Por ello WiMAX define un acceso por contienda y un mecanismo de resolución para cuando más de una estación móvil intente utilizar la ranura compartida. Si ya tiene una asignación para el tráfico a enviar, la estación móvil no se sondea. En su lugar se permite que solicite más ancho de banda mediante tres métodos: el primero es transmitiendo una petición de ancho de banda autónoma MPDU, el segundo método es enviando una petición de ancho de banda por el canal de extensión, o por último mediante la utilización de forma fraudulenta de un ancho de banda solicitado en paquetes MAC genéricos.

2.8.3. Calidad de Servicio - QoS

Una de las partes fundamentales en el diseño de la capa MAC es la QoS. Algunas de las ideas para el diseño de las técnicas de QoS en WiMAX se sacan del estándar del cable módem DOCSIS, consiguiendo un fuerte control de la QoS utilizando una arquitectura MAC orientada a conexión en la que la estación base controla todas las conexiones del enlace descendente y el ascendente. Antes de que ocurra cualquier transmisión de datos, la estación base y la estación móvil establecen un enlace lógico unidireccional entre las dos capas MAC llamado conexión.

Cada conexión se identifica mediante un identificador de conexión (CID), que sirve como una dirección temporal para transmisiones de datos sobre el enlace particular. Además de conexiones para transmisión de datos de usuario, la capa MAC de WiMAX define tres conexiones administrativas: las conexiones básicas, las primarias y las secundarias. WiMAX también define un concepto de flujo de servicio que es un flujo unidireccional de paquetes con un conjunto particular de parámetros de QoS e identificado por un identificador de flujo de servicio (SFID.) Los parámetros de QoS podrían incluir prioridad de tráfico, tasa máxima de tráfico sostenido, tasa máxima de ráfaga, tasa mínima tolerable, tipo de planificación, tipo de ARQ, retraso máximo, jitter tolerable, tamaño y tipo de unidad de datos, mecanismo a usar para la petición de ancho de banda, reglas para la formación de PDU, etc. El flujo de servicio debe ser provisionado por un sistema de administración de red o creado dinámicamente a través de mecanismos de señalización definidos en el estándar. La estación base es responsable de distribuir el SFID y mapearlo a un único CID. Los flujos de servicio pueden ser mapeados también a puntos de código de DiffServ o etiquetas de flujo de MPLS (Multiprotocol Label Switching) para permitir QoS extremo a extremo basado en IP. Para soportar una amplia variedad de aplicaciones, WiMAX define cinco servicios:

- Servicio garantizado no solicitado o UGS (Unsolicited Grant Service): Es un servicio diseñado para soportar un tamaño fijo de paquetes a una tasa constante de

datos, está orientado a servicios con requisitos estrictos de temporización como son la voz sobre IP (VoIP) sin supresión de silencios y la emulación de T1/E1. Los parámetros de flujo de servicio obligatorios que se definen en este servicio son la tasa máxima de tráfico sostenible, la máxima latencia permitida, el jitter tolerado y la política de petición/transmisión. Aquí la estación base programa periódicamente regiones de transmisión de manera regular, de manera anticipada y del tamaño negociado con anterioridad, durante el establecimiento de la conexión, sin que haya una petición explícita de parte del usuario con requisitos estrictos de temporización.

- Servicio de consulta en tiempo real o RtPS (Real-time Polling Service): Este servicio está orientado al tráfico en tiempo real con tasa de transmisión variable, como el vídeo MPEG. Los parámetros de flujo de servicio obligatorios que se definen en este servicio son la tasa mínima de tráfico reservada, la máxima tasa de tráfico sostenible, la máxima latencia permitida y la política de petición/transmisión. A las estaciones con tráfico RtPS se les asigna periódicamente una oportunidad de transmisión para solicitar ancho de banda de manera periódica con el fin de satisfacer sus requisitos en tiempo real.
- Servicio de consulta diferido o NRtPS (Non-Real-time Polling Service): Servicio diseñado para soportar flujos de datos tolerantes a retardos y de tamaño variable pero con un ancho de banda mínimo requerido, tal como FTP. Los parámetros obligatorios de flujo de servicio que se definen en este servicio son la tasa mínima de tráfico reservada, la tasa máxima de tráfico sostenible, la prioridad de tráfico y la política de petición/transmisión.
- Servicio de Mejor esfuerzo o BE (Best Effort service): En este servicio no se garantiza un nivel mínimo de servicio, ni retardo, ni caudal. Es decir este servicio está diseñado para aplicaciones sin requisitos mínimos de ancho de banda. Los parámetros obligatorios de flujo de servicio definidos en este servicio son la tasa máxima de tráfico sostenible, la prioridad de tráfico y la política de petición/transmisión.
- Servicio extendido en tiempo real y tasa variable o ERT VR (Extended Real-Time Variable Rate Service): Se diseña este servicio para aplicaciones como VoIP con supresión de silencio, es decir con detección de actividad ya que tienen tasas de datos variables pero necesitan una tasa de datos y un retraso garantizado. Este servicio solamente está definido en el estándar IEEE 802.16e- 2005 y no en el IEEE 802.16-2004. Los parámetros obligatorios son la tasa mínima reservada, la máxima latencia soportada, el jitter tolerable, la prioridad de tráfico y la máxima tasa de datos sostenible.

Nombre flujo de Servicio	Parámetros QoS definidos	Aplicaciones de ejemplo
UGS - Unsolicited Grant Services	Máxima tasa sostenible Máxima latencia tolerada Tolerancia jitter	Voz sobre IP (VoIP) sin supresión de silencios
RtPS - real-time Polling service	Mínima tasa reservada Máxima tasa sostenible Máxima latencia tolerada Prioridad de tráfico	Flujos de audio y video
NRtPS - Non-real-time Polling service	Mínima tasa reservada Máxima tasa sostenible Prioridad de tráfico	Protocolo de transferencia de ficheros (FTP)
BE - Best-effort service	Máxima tasa sostenible Prioridad de tráfico	Navegación web, transferencia de datos
ERT VR – Extended real-time Variable Rate service	Mínima tasa reservada Máxima tasa sostenible Máxima latencia tolerada Tolerancia jitter Prioridad de tráfico	VoIP con supresión de silencios

Tabla 6. Servicios QoS.

Aunque no se defina el planificador, WiMAX define varios parámetros y características que facilitan la implementación de un planificador efectivo:

- Soporte para una definición paramétrica detallada de requisitos de QoS y una variedad de mecanismos para señalar eficazmente el tráfico y los requisitos de QoS detallados en el enlace de subida.
- Soporte para asignación de recurso dinámica tridimensional en la capa de MAC. Los recursos pueden ser asignados en tiempo (time slots), en frecuencia (subportadoras) y en espacio (antenas múltiples).
- Soporte de información de reacción rápida sobre la calidad del canal para permitir que el planificador seleccione la codificación y modulación apropiadas para cada asignación.
- Soporte permutaciones entre subportadoras contiguas, tal como AMC, que permiten el planificador explotar la diversidad de multiusuario asignando correspondientemente a cada abonado su subcanal más fuerte.

2.8.4. Características de ahorro de energía

La versión móvil de WiMAX tiene características de ahorro de energía que permiten a las estaciones portables que funcionan por batería operar durante más tiempo sin necesidad de recargarlos. Se consigue un ahorro de energía mediante el apagado de forma controlada de partes de la estación móvil cuando no está transmitiendo ni recibiendo datos. En el estándar 802.16e-2005 se definen métodos que permiten a la estación móvil retirarse en modo sleep o modo idle cuando está inactivo. A continuación vamos a ver una descripción de ambos modos:

- **Modo sleep:** Es un estado en el que la estación móvil se apaga a sí misma, estando no disponible ciertos periodos de tiempo. Los períodos de ausencia se negocian con la estación base a servir. WiMAX define tres clases de ahorro de energía basadas en el modo sleep que realiza. En la clase 1 de ahorro de energía, se aumenta la ventana sleep exponencialmente de un valor mínimo a un valor máximo. Esto se hace típicamente cuando la estación móvil esté en modo BE o NRtPS. En la Clase 2 de ahorro de energía la ventana sleep tiene una longitud fija y se utiliza para servicios UGS. Por último en la Clase 3 de ahorro de energía se tiene una ventana sleep de una vez y se utiliza para tráfico de difusión selectiva o tráfico de administración cuando la estación móvil sepa cuándo se espera el siguiente flujo de tráfico. Además de minimizar el consumo de energía de la estación móvil, el modo sleep conserva recursos de radio de la estación base. Para facilitar el traspaso, o handoff, mientras este en modo sleep, se permite que la estación móvil escanee otras estaciones base para reunir información relacionada al handoff.
- **Modo idle:** Este modo incluso permite mayores ahorros y es opcional en WiMAX. El modo idle proporciona un mecanismo para que la estación móvil esté disponible periódicamente para recibir información por el canal de difusión sin encontrarse registrada a ninguna estación base en concreto. Cuando se usa una estación en modo idle no tiene que estar ejecutando handovers y demás mecanismos de mantenimiento de la interfaz radio de ahí que este modo ahorre más energía que el modo sleep. Por último este modo se complementa con un mecanismo de búsqueda (paging) para alertar al usuario acerca del tráfico pendiente en el enlace descendente.

2.8.5. Movilidad y formas de acceso.

Existen cinco formas de acceso, una relacionada con el acceso fijo y cuatro relacionadas con movilidad:

- **Acceso fijo:** Se supone que el usuario es fijo, se encuentra situado en una única posición geográfica durante toda la conexión a la red. El usuario puede conectarse y desconectarse de la red y puede elegir la mejor estación base en el momento en el que entra en la red. Normalmente este usuario será asociado con el mismo sector o celda de la estación base, y la red controlará cualquier reasociación con otro sector o celda que se produzca.
- **Acceso nómada:** Se supone que el usuario es fijo en una posición geográfica cuando se conecta a la red, pero puede moverse a una posición diferente en la misma red inalámbrica (cambio de celda o sector por ejemplo), se reconoce la suscripción del dispositivo en estas y se establece una nueva sesión de datos. El dispositivo podrá elegir la "mejor" estación base en el momento de entrada a la red. Durante una sesión de datos, se asociará típicamente el dispositivo con el mismo sector de estación base o celda, y la red controlará cualquier reasociación con otro sector o celda que se produzca.
- **Acceso portátil:** El dispositivo de usuario podrá mantener una sesión de datos operativa cuando se desplace a velocidades pedestres en un área limitada de la red. Tendrá capacidades limitadas de handover (best effort) mientras el usuario se desplaza de una celda a otra o de un sector a otro diferente en la misma celda con la conexión a la red activa.
- **Acceso de Movilidad sencillo:** El usuario mantendrá una sesión de datos de red operativa para aplicaciones que no requieren servicios en tiempo real mientras se desplaza a velocidades de hasta 60Km/h dentro del área de alcance de la red. El handover entre sectores y estaciones bases con breves interrupciones de menos de 1 segundo hacen posible el uso de aplicaciones que no requieren tiempo real.
- **Acceso de Movilidad completa:** El dispositivo de usuario mantendrá una sesión de servicio de datos de red operativa como se desplaza a velocidades de hasta 120Km/h en el área de alcance de red. El handover entre sectores y estaciones bases es fluido con breves interrupciones de menos de 50 milisegundos lo que proporciona continuidad para todas las aplicaciones.

Definición	Localización/ Movilidad	Handoffs	802.16-2004	802.16e
Acceso Fijo	Simple/ Estacionario	No	Sí	Sí
Acceso Nómada	Múltiple/ Estacionario	No	Sí	Sí
Acceso Portátil	Múltiple/ Velocidades pedestres	Handoffs fuertes	No	Sí
Acceso de movilidad sencillo	Múltiple/ Velocidades hasta 60Km/h	Handoffs fuertes	No	Sí
Acceso de movilidad completa	Múltiple/ Velocidades hasta 120Km/h	Handoffs suaves	No	Sí

Tabla 7. Tipos de acceso a redes WiMAX.

En un principio es probable que las redes WiMAX se desplieguen para aplicaciones fijas y nómadas, y luego evolucionen para poder soportar movilidad. El estándar IEEE 802.16e-2005 define una estructura para soportar movilidad. En particular el estándar define mecanismos de señalización para rastrear estaciones de abonados mientras ellos se van moviendo del área de cobertura de una estación base a otra cuando están activos o cuando se mueven de un grupo de paging a otro en modo idle. El estándar también tiene protocolos para habilitar un handover fluido de conexiones en curso de una estación base a otra. El Foro de WiMAX ha utilizado la estructura definida en el estándar IEEE 802.16e-2005 para avanzar en el desarrollo de la administración de la movilidad dentro de una arquitectura de red punto a punto. La arquitectura también soporta movilidad en la capa de IP utilizando IP Móvil.

Los métodos de handoff aceptados en IEEE 802.16e-2005 son tres; uno es obligatorio y otros dos son opcionales. El método de handoff obligatorio se llama la hard handover (HHO) y en WiMAX móvil es el único exigido en un principio. HHO implica una transferencia repentina de las conexiones de una estación base a otra. La estación base, la estación móvil u otra entidad hacen las decisiones de handoff basándose en resultados de medición suministrados por la estación móvil, esta hace una exploración de frecuencia de radio (RF) y mide periódicamente la

calidad de la señal de las estaciones base vecinas. El escaneo de estas señales se efectúa durante los intervalos de escaneo o scanning intervals; intervalos durante los cuales la estación móvil puede realizar opcionalmente una medición inicial y asociarse con una o más estaciones base vecinas. Una vez que se haga una decisión de handover, la estación móvil empieza la sincronización con la transmisión de enlace descendente con destino la estación base, realiza una medición si no lo hizo mientras el intervalo de escaneo, y entonces termina con la conexión con la estación base anterior. Retienen cualquier MPDUs no enviada a la estación base hasta que termine un temporizador.

Los dos métodos de handoff opcionales soportados en IEEE 802.16e-2005 son Fast Base Station Switching (FBSS) y Macro Diversity HandOver (MDHO). En estos dos métodos, la estación móvil mantiene una conexión válida simultáneamente con más de una estación base. En el caso de FBSS, la estación móvil conserva una lista de las estaciones bases implicadas, llamada active set o conjunto activo. La estación móvil supervisa continuamente la lista, hace mediciones y mantiene un identificador de conexión válido con cada uno de ellos. La estación móvil, sin embargo, se comunica con una estación base únicamente, llamada anchor. Cuando se requiere un cambio de esta estación base anchor, se pasa la conexión de una estación base a otra sin tener que realizar explícitamente la señalización del handoff. La estación móvil informa simplemente a la estación base anchor elegida en el CQICH (channel-quality indicator channel), una subtrama del enlace ascendente.

El método MDHO es parecido al FBSS, excepto en que la estación móvil se comunica simultáneamente con todas las estaciones bases del conjunto activo, llamado en este caso diversity set, mediante el enlace descendente y el ascendente. En el enlace descendente las múltiples copias recibidas en la estación móvil son combinadas utilizando alguna de las técnicas de diversidad. En el enlace ascendente donde la estación móvil envía datos a las múltiples estaciones base, la diversidad se usa para elegir el mejor enlace ascendente. Tanto FBSS como MDHO ofrecen unas mayores prestaciones que HHO, pero necesitan las estaciones base en las respectivas listas se sincronicen, utilicen la misma frecuencia de portadora y compartan información de la red. El desarrollo de los métodos FBSS y MDHO en redes WiMAX no se ha completado aún.

2.8.6. Subcapa de Seguridad

2.8.6.1. Introducción

Esta capa dota a los abonados de privacidad a través de la red inalámbrica de banda ancha. Esto ocurre mediante el encriptado de las conexiones entre la estación de usuario y la estación base.

Además, esta capa provee a las operadoras de una fuente de protección ante ataques no permitidos en el servicio. La estación base protege contra accesos no autorizados a estos servicios de transporte de datos mediante la encriptación forzada de los servicios asociados que fluyen a través de la red. La privacidad emplea un protocolo de autenticación cliente/servidor en el cual la estación base, el servidor, controla la distribución de material en clave al cliente, la estación de usuario. Adicionalmente, los mecanismos de privacidad básica son reforzados con la autenticación de las estaciones de usuarios basada en certificados digitales.

Si durante la negociación de capacidades, la estación de usuario especifica que no soporta seguridad 802.16, los pasos de autorización e intercambio de claves deben ser saltados. La estación base, si está provisto, debe considerar la estación de usuario autenticada, de otra manera dicho abonado no debe ser servido.

2.8.6.2. Arquitectura

Esta capa se compone de dos protocolos, que son los siguientes:

- Un protocolo de encapsulación para encriptar de paquetes de dato a través de la red. Este protocolo define un conjunto de suites criptográficas, por ejemplo parejas de valores de encriptación de datos con sus respectivos algoritmos de autenticación, y las reglas para aplicar estos algoritmos a la carga MPDU.
- Un protocolo de gestión de clave (PKM o Privacy Key Management) que realiza la distribución segura de la clave de datos desde la estación base hasta la estación de usuario. A través de este protocolo de gestión de claves, ambas estaciones sincronizan la protección de los datos.

2.8.6.3. Encriptado de Paquetes de Datos

Los servicios de encriptación están definidos como un conjunto de capacidades dentro de la subcapa de seguridad MAC. La información específica de encriptado del encabezado MAC está localizada en el formato genérico del encabezado de la capa MAC.

La encriptación también se aplica a la carga MPDU; así como el encabezado MAC genérico no está encriptado. Todos los mensajes de administración de la capa deben ser enviados sin encriptar para facilitar la registración, mediciones y las operaciones normales de la capa MAC.

El formato de las MPDUs que transportan cargas con paquetes de datos encriptados están especificados en la sección 6.3.3.6 de la norma IEEE 802.16, WiMAX.

2.8.6.4. Protocolo de administración de claves (PKM)

Una estación de usuario usa el protocolo PKM para obtener autorización y tráfico de material codificado de la estación base, y para soportar reautorizaciones periódicas y actualizaciones de claves. El protocolo de administración de claves usa certificados digitales X.509 (IETF RFC 3280), el algoritmo de encriptado RSA de clave pública, y un algoritmo robusto de encriptación para realizar intercambio de claves entre la estación de usuario y la estación base.

El protocolo PKM sigue un modelo cliente/servidor, donde la estación de usuario (el cliente PKM) realiza la petición de la clave, y la estación base (el servidor PKM) responde a estas peticiones asegurando que un cliente individual recibe solamente las claves del material para el cual está autorizado. El protocolo PKM usa una administración de mensajes MAC: PKM-REQ (petición) y PKM-RSP (respuesta).

El protocolo PKM usa criptografía de clave pública para establecer una clave de autorización secreta y compartida entre la estación base y la estación de usuario. Esta clave es luego utilizada para asegurar intercambios posteriores PKM de claves de encriptación de tráfico (TEK o Traffic Encryption Key). Estos dos mecanismos escalonados para la distribución de claves permiten la actualización de TEKs sin recurrir a operaciones computacionales intensivas de las claves públicas.

Una estación base autentifica a un cliente durante el intercambio inicial de autorización. Cada cliente lleva un certificado digital único X.509 emitido por el fabricante de la estación de usuario. El certificado digital contiene la llave pública de la estación de usuario y la dirección

MAC de la misma. Cuando se requiere una clave de autorización o AK (Authorization Key), la estación de usuario presenta su certificado digital a la estación base, esta verifica el certificado y luego usa la clave pública verificada para encriptar la clave de autorización AK, para enviarla a la estación de usuario que la pidió.

Todas las estaciones bases deben tener instalado de fábrica un par de claves RSA privadas/públicas o proveer un algoritmo interno para generar dicho par de claves dinámicamente. Si una estación de usuario confía en un algoritmo interno para generar su par de claves RSA, esta estación debe generar el par de claves antes de su primer intercambio de la clave de autorización AK. Todas las estaciones base con pares de claves RSA instaladas de fábrica también deben tener instalados de fábrica los certificados X.509. Así mismo todas las que confían en un algoritmo interno para generar el par de claves RSA deben soportar un mecanismo para la instalación de certificados X.509 emitidos por fabricantes.

El protocolo PKM es definido en detalle en la sección 7.2 de la norma IEEE 802.16 WiMAX.

2.8.6.5. Asociaciones de Seguridad

Una asociación de seguridad (SA) es un conjunto de información de seguridad que una estación base y uno o más de sus clientes (SSs) comparten de manera que pueden tener comunicaciones seguras a través de la red WiMAX. Están definidos tres tipos de asociaciones de seguridad o SAs: Primario, Estático y Dinámico. Cada estación de usuario manejable establece una asociación primaria de seguridad durante el proceso de inicialización. Las asociaciones estáticas son suministradas dentro de la estación base, mientras que las dinámicas son establecidas y eliminadas improvisadamente en respuesta a la iniciación y terminación de servicios específicos. Ambas SAs, estáticas y dinámicas, pueden ser compartidas por múltiples estaciones de usuarios.

2.9. Conclusiones

Como hemos visto WiMAX está basado en una interfaz aérea muy flexible y robusta definida por el grupo IEEE 802.16. La capa PHY está basada en OFDM, que es una técnica elegante y efectiva para evitar la distorsión debida a la diversidad de caminos, y soporta técnicas para incrementar la confiabilidad del enlace.

Para mejorar la capacidad total del sistema WiMAX admite técnicas avanzadas de procesamiento de señales. Entre estas técnicas está la modulación y codificación adaptativa, multiplexación espacial, y diversidad multiusuario.

WiMAX tiene una capa MAC muy flexible que soporta distintos tipos de tráfico de datos incluyendo voz, vídeo y multimedia, y provee una fuerte calidad de servicio. También en esta capa se construyen funciones de seguridad bastante robustas como una fuerte encriptación y una autenticación mutua.

WiMAX tiene varias características para conseguir funciones relacionadas con movilidad y con el consumo bajo de los periféricos portátiles.

Por último WiMAX define una red flexible basada en IP que permite la explotación de todos los beneficios de IP. En el siguiente capítulo vamos a ver esta característica de WiMAX.

