

Tecnología WiMAX y WiMAX 2

Héctor del Rey, Rodrigo Iglesias, Nilo Iglesias, Jairo Lozano y Guillermo Vaquero.

Resumen

La tecnología WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access) constituye un modo inalámbrico de transmisión de datos, voz y vídeo. Ha sido desarrollada por IEEE junto a WiMAX Forum, siendo este último encargado de promoverla. El protocolo base es IEEE 802.16, siendo IEEE 802.16-2004 en el acceso fijo y 802.16e en el acceso móvil los más implementados. Los rangos de frecuencia van desde 2.3 GHz hasta 11 GHz. Ofrece una implementación simple, barata, y con grandes ventajas, como gran cobertura geográfica o capacidad para transmitir tanto si se tiene visión directa con el punto de acceso como si no, gracias a la protección que ofrecen las modulaciones usadas. A pesar de sus apreciables ventajas, no está siendo muy aceptada por las grandes compañías, sobre todo en el ámbito móvil, dado que no tiene retrocompatibilidad con las tecnologías ya implementadas, como pueden ser GPRS, HSPA o 3G.

1. Introducción

En el transcurso de los últimos años, la banda ancha inalámbrica se ha considerado un punto importante en la industria de las telecomunicaciones. Tanto la tecnología inalámbrica como los accesos cableados de banda ancha han tenido una gran aceptación, como se puede observar en el incremento de usuarios de Internet. Esto ha dado lugar a la necesidad de explorar nuevas tecnologías que reduzcan costes y puedan hacer frente a las tecnologías actuales.

WiMAX (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*) es un estándar de transmisión inalámbrica de datos que pretende ser el nuevo paso en la evolución, diseñados para ser utilizados en áreas metropolitanas (MAN) con lo que se alcanzan distancias superiores y con un coste significativamente inferior. Las mejoras que introduce esta tecnología son su mayor capacidad y alcance de enlace. Está diseñada como una alternativa para dos grandes aplicaciones, las dos propias de operadores de telecomunicaciones y no de usuarios finales. Por una parte, está destinado a ser la evolución de LMDS y el MMDS para la implementación de radioenlaces punto a punto, y por otra parte, puede utilizarse como competidor o sustituto de la red de acceso fija (DSL y cable) en determinados entornos, especialmente en entornos rurales, donde el despliegue de soluciones de cable es muy costoso y radioenlaces punto-multipunto se presentan como una alternativa flexible y más barata [1].

WiMAX está siendo desarrollado por el grupo **WiMAX Forum** (siendo este el único organismo habilitado para certificar el cumplimiento del estándar y la interoperabilidad entre equipamiento de distintos

fabricantes), cuyo objetivo es promover y acelerar la introducción de la tecnología WiMAX en el mercado, ofreciendo servicios inalámbricos de calidad-precio competitivo [2].

Junto con la tecnología LTE (*Long Term Evolution*), WiMAX es considerado el futuro de las redes de telecomunicaciones, aunque la aceptación de este último en el mercado es más costoso, pues tiene incompatibilidad con los mecanismos de comunicación que hay desplegados en la actualidad, cosa que sí permite LTE.

El objetivo principal de nuestro trabajo va a ser tratar de profundizar el estudio de la tecnología WiMAX.

Durante el transcurso del documento se va a describir la tecnología en su conjunto, la evolución que ha sufrido desde su creación hasta la actualidad, destacando las principales características de esta tecnología.

Posteriormente, detallaremos el funcionamiento, así de la arquitectura que soporta, para continuar con una breve comparativa entre diferentes tecnologías inalámbricas como Wi-Fi y LTE con la de WiMAX. Para terminar, se extraerán unas conclusiones donde destacan las ventajas e inconvenientes de la tecnología desarrollada.

2. Historia y evolución

2.1. Origen y características iniciales

Para trazar los primeros pasos de WiMAX hay que remontarse al año 1998, en el que el IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) forma un grupo de trabajo llamado 802.16 para desarrollar lo que en un principio fue llamado *Wireless Metropolitan Area Network* (WMAN), es decir, una red metropolitana inalámbrica.

Al igual que en LMDS, estos sistemas fueron inicialmente concebidos para conectarse a un anillo de fibra y extraer un ancho de banda para radiarlo con visión directa (LOS, *Line of Sight*), como los sistemas de primera generación, en una configuración punto-multipunto [3].

Sin embargo, habrá que esperar varios años hasta que se definan las características concretas del estándar.

2.2. El Foro WiMAX

En junio de 2001, anticipándose incluso a la publicación de la primera versión del IEEE 802.16, se constituyó el Foro WiMAX (*WiMAX Forum*), de manera análoga a lo que ocurriera en la tecnología Wi-Fi con la creación de la Wi-Fi Alliance.

Como ya se ha mencionado, el WiMAX Forum es la única organización encargada de certificar la compatibilidad e interoperabilidad entre equipos de acceso inalámbrico basados en el estándar IEEE 802.16. Los productos que pasan las pruebas de conformidad logran la designación "*WiMAX Forum Certified*", y pueden mostrar esta marca en sus productos y material de marketing.

Así pues, en general, se usa la palabra WiMAX como **marca**, es decir, como un nombre comercial o industrial con el que, por extensión, designamos a las normas, productos, sistemas y redes basados en el estándar IEEE 802.16. También es frecuente que algunos vendedores muestren en sus equipos leyendas del tipo "WiMAX-ready" o "WiMAX compatible" [3].

2.3. Evolución del estándar IEEE 802.16

Cuatro años después de la creación del grupo de trabajo, finalmente en abril de 2002 ve la luz la primera versión del estándar IEEE 802.16, cuyas características, como suele ocurrir en estos casos, se han ido corrigiendo y adaptando en sucesivas revisiones. Entre los principales cambios, como veremos a continuación, se encuentran el rango de frecuencias utilizado, el incremento en las velocidades de transmisión y la posibilidad de realizar comunicaciones sin necesidad de que exista una línea directa de visión (NLOS, *Non Line of Sight*).

- **802.16** - Publicado en abril de 2002, es la versión original. Propone la utilización del espectro **licenciado** en el rango de **10 a 66 GHz**, siendo necesaria a esas frecuencias una **línea de visión directa** entre el transmisor y el receptor. Con canales muy anchos (de hasta 28 MHz) y una modulación eficiente, podía ofrecer una velocidad de transmisión teórica de hasta 70 Mbit/s (sin movilidad). Soporta calidad de servicio (QoS) [1].
- **802.16a** - Se publica en 2003, consistiendo en una ampliación del estándar 802.16 hacia bandas de **2 a 11 GHz**, permitiendo así que no sea necesaria la línea de visión directa (NLOS) y mejorando la recepción en el interior de edificios.
- **802.16c** - También publicado en 2003. Ampliación del estándar 802.16 para definir las características y especificaciones en la banda de 10-66 GHz y establecer aquellos elementos que los fabricantes deberán incorporar obligatoriamente para asegurar la interoperabilidad.
- **802.16d** - Aparece en junio de 2004 y también se le denomina **802.16-2004**. Es una mejora del 802.16 y 802.16a para añadir los perfiles aprobados por el WiMAX Forum, y establece las características de lo que se conoce como **WiMAX fijo**. Entre estas características destacan las siguientes [3,4]:
 - Frecuencia portadora < 11 GHz (se consideran las bandas de 2.5 GHz y 3.5 GHz, las cuales

requieren licencia, y 5.8 GHz, que no la requiere).

- Modulación **OFDM 256**, lo que implica un uso eficiente del canal radio (eficiencia espectral hasta 3.7 (bit/s)/Hertz), **robusto** frente a interferencia multicanal.
 - Canalizaciones de 3.5, 5, 7 y 10 MHz
 - Tasa binaria alrededor de 10 Mbps. Dependiendo del canal, se puede llegar hasta los 70 Mbps.
 - Alcance: 50 km e incluso mayor en *Near-LOS*. Notablemente menor (unos 10 km) en NLOS.
- **802.16e** – Publicado en 2005, por lo que también se le conoce como **802.16-2005** es una evolución que permite la conexión de elementos móviles, tales como ordenadores portátiles o teléfonos. A este estándar también se lo conoce como **WiMAX móvil**, y junto con WiMAX fijo, son los dos modos principales de operación de esta tecnología. Entre sus características destacan [1, 3, 4]:
 - Frecuencia portadora < 6 GHz (principalmente las bandas de 2,3 y 2,5 GHz)
 - Modulación y acceso **OFDMA 2048**
 - Canalizaciones de 5, 8.75 y 10 MHz
 - Proporciona un caudal de datos y alcance menores que en WiMAX fijo, pero **permite el movimiento** del dispositivo a velocidades de hasta 120km/h.

Los estándares 802.16d y 802.16e (WiMAX fijo y móvil) son el punto de apoyo fundamental de esta tecnología, manteniéndose ambos vigentes desde entonces. Las siguientes versiones han ido añadiendo nuevas funcionalidades y detalles de implementación, no siendo de especial relevancia hasta la revisión **802.16m** lanzada en 2011 y más conocida como **WiMAX 2**, de la que se hablará más adelante en otro apartado posterior.

3. Características generales

La tecnología WiMAX proporciona servicios de datos y telefonía a distancias de hasta 50 kilómetros para estaciones fijas y de 10km para estaciones móviles, y velocidades de hasta 70 Mbps, valores teóricos e inalcanzables de manera simultánea.

Arquitectura basada en IP: El foro WiMAX ha definido una arquitectura de referencia de red que está basada en una plataforma todo IP. Los servicios *end-to-end* son entregados sobre una arquitectura IP que cuenta con protocolos basados en IP para el transporte *end-to-end*, QoS, gestión de sesión, seguridad y movilidad. Esto permite declinar costos de procesamiento sobre IP, y facilita la convergencia con otras redes, y explora el desarrollo de aplicaciones que existe para IP [5].

Grandes picos de tasas de datos: Las velocidades que puede alcanzar la capa física llega a ser la máxima alcanzable (de 70Mbps) cuando opera con un espectro de frecuencia de 20MHz de ancho de canal [5].

Escalabilidad en el ancho de banda y soporte de tasa de datos: Los anchos de banda son configurables y no cerrados [5].

Retransmisión en la capa de enlace: Para las conexiones que requieren una alta fiabilidad, WiMAX soporta ARQ, protocolo utilizado para el control de errores en la transmisión de datos, garantizando la integridad de los mismos en la capa de enlace [5].

Multiplexaciones en el tiempo (TDD) y en la frecuencia (FDD): Soporta ambas multiplexaciones, lo que permite una implementación de bajo coste del sistema. En la mayoría de las implementaciones se usa TDD debido a sus ventajas [6].

Calidad de servicio (QoS): 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 tanto constantes como variables, flujos de tráfico en tiempo real, así como los que no lo son. Además, 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 [6].

Modulación y codificación adaptativa (AMC): WiMAX soporta un número de esquemas de modulación y de mecanismos de corrección de errores (FEC), y permite que el esquema sea cambiado por usuarios y por estructura básica, basada en las condiciones del canal (SNR). Este mecanismo bastante efectivo a la hora de maximizar el caudal en un canal variable en el tiempo [5].

Capa física basada en OFDM: La modulación OFDM presenta como principal ventaja una mayor protección frente a interferencias, una mayor cobertura frente a otras modulaciones, y permite que las redes inalámbricas transmitan eficientemente en pequeños anchos de banda. Además, como utiliza la tecnología NLOS, permite que la señal atraviese pequeños obstáculos tales como árboles o pequeños muros [5].

Seguridad robusta: WiMAX admite un fuerte cifrado usando AES, 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, basada en el protocolo EAP, permitiendo una gran variedad de usuarios, certificados digitales y tarjetas inteligentes [6].

Movilidad: WiMAX móvil soporta *handover* con una baja latencia, menor a los 50 ms. Es capaz de proporcionar aplicaciones en tiempo real como VoIP sin degradación del servicio [6].

4. Arquitectura y topología

4.1. Elementos

En un modelo de comunicación mediante tecnología WiMAX, toman parte diferentes elementos mostrados en la Figura 1, dando lugar a tres partes fundamentales:

- **Estación Móvil (MS):** Se trata del dispositivo electrónico final utilizado por el usuario para acceder a la red, permitiendo conectividad con la estación base. Puede conectarse a una o varias estaciones base a través de un equipo local de cliente (CPE), compuesto de una antena y una tarjeta de red (Antena exterior y módem interior). El CPE transmite la información desde el cliente a la estación base.
- **Servicio de Acceso a la red (ASN):** Es el encargado de proporcionar cobertura a las estaciones móviles de los usuarios. Está formado por una o varias estaciones base, las cuales a su vez están conectadas por los **Gateway ASN**. Estos *Gateways* gestionan la ubicación entre varios ASN, claves de cifrado, control de admisión, QoS (*Quality of Service*) y enrutamiento.
- **Red de Servicio de Conectividad (CSN):** Es propiedad del ISP y tiene las siguientes funciones: conectar a Internet a las ASP, servicios de autenticación de usuarios, equipos, autorización y contabilidad (AAA), “*roaming*” entre NSP y ASNs, administración de direcciones IP y administración de QoS basado en el contrato de nivel de servicio que se tenga con el usuario. Además, proporciona un túnel con otras redes y equipos, como la **PSTN** (*Public Switched Telephone Network*).

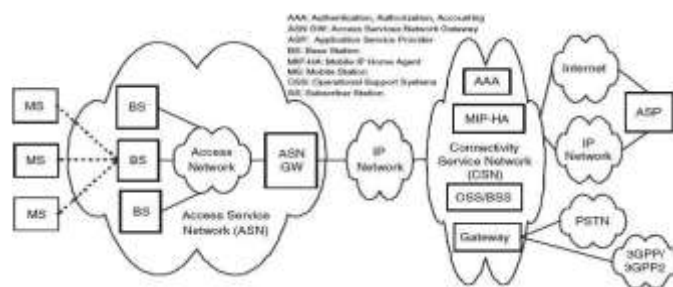


Figura 1. Elementos de la arquitectura WiMAX

Otros elementos importantes de la red son:

- **Estación Base (BS):** Infraestructura donde se instalan las antenas (Transmisores y receptores) que interactúan directamente proporcionando la interfaz de radio con los MS. Además, gestiona la movilidad, los *handoff*, políticas de QoS, *proxies*, claves, sesiones y protocolos DHCP. Las antenas son instaladas en torres o edificios altos para aprovechar su altura. Las BS pueden conectarse directamente al ISP con un enlace por cable o inalámbrico.
- **Proveedor de Servicios de Red (NSP):** Es una entidad comercial que ofrece conectividad IP y servicios WiMAX a los usuarios conforme con el contrato de nivel de servicio acordado. Para proveer estos servicios, un NSP establece acuerdos con una o más NPAs. Un NSP también puede establecer acuerdos de *roaming* con otros NSP.

- **Proveedor de red de acceso (NAP):** Entidad comercial que ofrece la infraestructura de acceso de radio, a uno o más NSP. Un NAP implementa esta infraestructura utilizando una o más ASN.
- **Proveedor de servicios de aplicaciones (ASP):** Se encarga de proporcionar servicios de valor agregado, superiores a capa 3 como acceso corporativo y aplicaciones IP.

4.2. Modelo de referencia

El objetivo del modelo de referencia es permitir tener múltiples opciones de implementación para una entidad funcional dada y así conseguir interoperabilidad entre las distintas operaciones que realiza cada entidad.

La interoperabilidad está basada en la definición de los protocolos de comunicación y el tratamiento de los datos entre los entes funcionales para lograr un conjunto de funciones punto a punto, por ejemplo el manejo de la seguridad y movilidad.

En la Figura 2 se ilustra el modelo de referencia, con las siguientes entidades lógicas MS, ASN y CSN, y se identifican los puntos de referencia R1 - R6, siendo estos los que conectan las entidades antes mencionadas [8]:

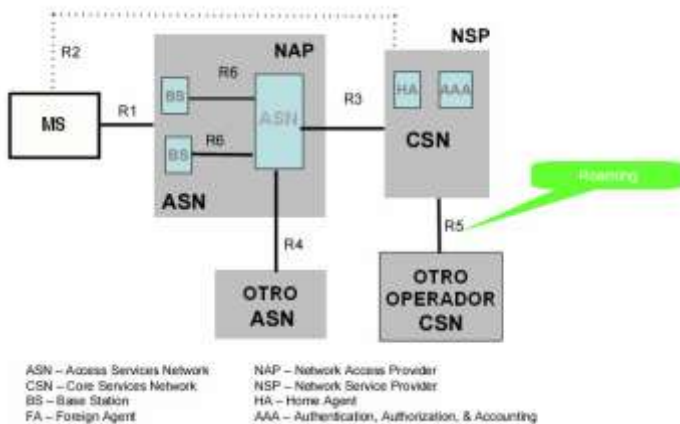


Figura 2. Modelo de referencia de la red WiMAX [7].

- **R1:** Es la interfaz entre la MS y el ASN. Incluye la interfaz de radio y los protocolos del plano de administración.
- **R2:** Interfaz entre la MS y CSN. Proporciona autenticación, autorización, configuración IP y gestión de movilidad.
- **R3:** Interfaz entre el ASN y CSN para la gestión de movilidad.
- **R4:** Interfaz entre dos ASN para soportar la movilidad entre varios ASN.
- **R5:** Interfaz entre dos CSN para dar soporte a *roaming* a través de los NSP (*Network Service Provider*).

- **R6:** Interfaz entre BS y ASN-GW que consta de portadores de múltiples caminos intra-ASN, proporcionando túneles IP para eventos móviles.
- **R7:** Interfaz entre dos BS que facilita el *handoff*.

5. Funcionamiento

El estándar IEEE 802.16 define las especificaciones para diferentes capas, ilustradas en la Figura 3:

- **Capa física,** correspondiendo con la Capa Física del modelo OSI.
- **Capa de Acceso al Medio,** correspondiendo con la Capa de Enlace del modelo OSI.
- **Capa de Convergencia entre Subcapas,** correspondiendo con parte de la Capa de Enlace, y encargándose de la adaptación de tramas con otros enlaces, como Ethernet o ATM.

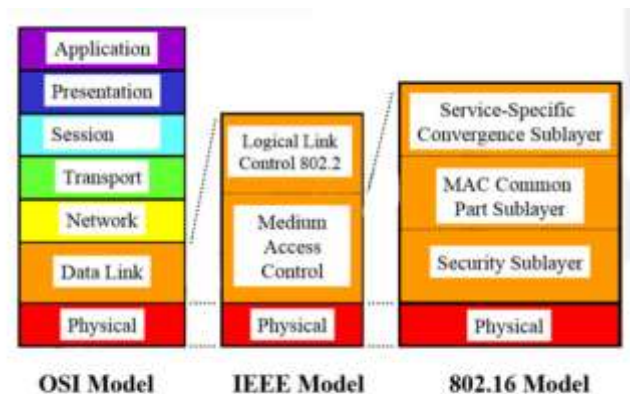


Figura 3. Capas definidas en el estándar IEEE 802.16.

5.1. Capa Física

La capa física está diseñada con un **alto grado de flexibilidad** con el fin de ofrecer a los proveedores de servicios la posibilidad de optimizar el despliegue de las celdas, capacidad del enlace de radio, coste y servicios.

Los modos de operación soportados, FDD y TDD, se consideran tanto como para *Uplink* (UL) y *Downlink* (DL).

En el modo FDD, las ráfagas de UL y DL son transmitidas simultáneamente y sin interferencias, gracias a que estas son transmitidas a distintas frecuencias. Esto permite utilizar un tipo distinto de modulación en cada enlace.

En el modo TDD, las ráfagas de UL y DL son transmitidas de manera consecutiva en la misma frecuencia. Puede usarse 0.5, 1 ó 2 milisegundos como tiempo de ráfaga. En este modo, las posiciones de DL y UL pueden variar.

Existen tres interfaces físicas contemplados en el estándar IEEE 802.16 – 2012 [9]:

1. **Wireless MAN-SC:** Basada en una tecnología de una sola portadora para aplicación NLOS en las bandas de frecuencia entre de los 10 y 66 GHz. Soporta TDD y FDD para el uso del espectro, y las modulaciones que implementa son: QPSK, 16-QAM y 64-QAM. La capacidad es mucho menor OFDM (múltiples portadoras).
2. **Wireless MAN-OFDM:** Modulación OFDM para entornos NLOS y en bandas de frecuencia por debajo de los 11GHz. Existe la posibilidad de usar hasta 256 portadoras, aunque solo se usen 200 [10]. Modulaciones: BPSK, QPSK, 16-QAM Y 64-QAM en las portadoras (opcional en bandas no licenciadas). Acceso TDMA de las estaciones de usuario.
3. **Wireless MAN-OFDMA:** Como el anterior, pero con acceso OFDMA y posibilidad de tener hasta 2048 portadoras.

Además, existen diversas interfaces definidas en otros estándares, como **Wireless MAN-Advanced Air Interface**, abordado en el estándar IEEE 802.16.1-2012. Está diseñado para trabajar en modo NLOS en las bandas de frecuencia licenciadas de menos de 6 GHz. Soporta TDD y FDD (Incluyendo H-FDD AMS), y usa OFDMA tanto en el *downlink* como en el *uplink* [11].

5.2. Capa Mac

La capa MAC (*Medium Access Control*) fue diseñada para accesos a las aplicaciones punto-multipunto o PMP de banda ancha de muy alta tasa de datos y con una gran variedad de requerimientos de calidad de QoS [12].

Esta capa MAC usa un algoritmo de planificación o *scheduling*, en la que una estación de usuario necesita competir solo una vez para entrar de inicio en la red. Tras ello, la estación base le asigna un *slot* de acceso. El tiempo destinado a este *slot* de acceso puede contraerse o expandirse, lo que se conoce como TDMA dinámico, pero permanece asignado al usuario, de forma que otros usuarios no pueden acceder a él [3].

La capa MAC de WiMAX se puede subdividir en tres subcapas:

- **Capa de convergencia de servicios (CS, Service-specific Convergence):** Se encarga de convertir y mapear los datos recibidos desde la entidad usuaria a las *Service Data Unit* (SDU), que deberán ser recibidas por el siguiente nivel del MAC. Su principal función es asociar cada conexión con el servicio al que está ligada, de forma que no haya más necesidad que especificar el CID (*Connection Identifier*) [13]. Además, realiza tareas tales como establecer identificadores de conexión o de flujo de servicio, la supresión de cabeceras.
- **Capa común (MAC CPS, MAC Common Part Sublayer):** Núcleo de la capa MAC. Contiene todas las funciones necesarias para el intercambio de datos y el control de la capa MAC. Se encuentra conectada

a la subcapa CS mediante el MAC SAP. Realiza funciones fundamentales, como son la asignación del ancho de banda, o la creación y mantenimiento de un enlace [14]. Indagaremos en el formato de trama a este nivel más adelante.

- **La subcapa de seguridad:** provee a los suscriptores de privacidad, autenticación y confidencialidad a través de toda la red inalámbrica. Esto se consigue aplicando transformaciones criptográficas a las PDU de nivel MAC que se intercambian entre las BS y las SS. Para llevar esto a cabo, cuenta con los siguientes protocolos [15]:
 - Un **protocolo de encapsulación** para añadir seguridad a los datos de los paquetes que se envían por la red. Este protocolo define un conjunto de reglas criptográficas soportadas, como pueden ser los algoritmos de autenticación y cifrado de los datos, o reglas de aplicación de dichos algoritmos a la carga útil de la PDU MAC.
 - Un **protocolo de manejo de claves privadas** (PKM), proporcionando una distribución segura de las claves entre la BS y la SS. Gracias a este protocolo, las SS y las BS sincronizan estos datos de claves.

5.3. Formato de trama a nivel MAC CPS

Se le conoce como trama MAC a la MAC PDU. Tiene el formato general mostrado en la Figura 4: Se inicia con un encabezado de longitud fija, prosigue con el cuerpo del mensaje (parte en la que se encapsula la PDU CS) y puede contener un CRC (*Cyclic Redundancy*) o suma de verificación de redundancia cíclica [16].

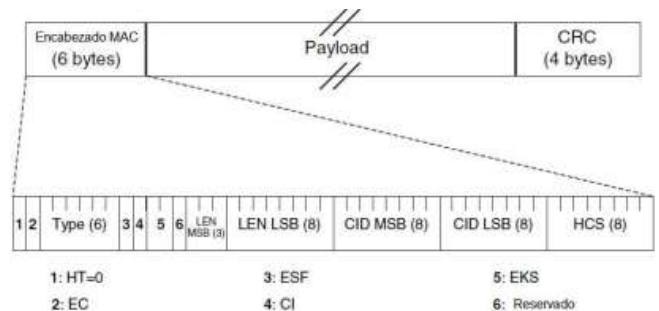


Figura 4. Formato de trama a nivel MAC CPS [16].

En esta misma figura vemos el formato de trama a nivel MAC CPS, y a continuación explicamos de qué campos se encuentra formada dicha trama:

- **HT (Header Type):** Indica el tipo del encabezado. Existen dos: El tipo genérico MGH y el que no tiene *payload* ni CRC.
- **EC (Encryption Control):** Indica si el *payload* ha sido cifrado.
- **Type:** Indica la presencia de sub-encabezados, y tipos especiales de *payload*.

- **ESF** (*Extended Subheader Field*): Indica si este tipo de encabezado está presente después del GMH, en *Up/Downlink*.
- **CI** (*CRC Indicator*): Indica la presencia o ausencia del CRC.
- **EKS** (*Encryption Key Sequence*): Índice de la clave de cifrado de tráfico y vector de inicialización usado en el cifrado del *payload*.
- **LEN** (*Length*): Longitud (en bytes) de la MAC PDU incluyendo el encabezado y el CRC.
- **CID** (*Connection ID*): Contiene el identificador de conexión mencionado en la sección anterior.
- **HCS** (*Header Check Sequence*): Secuencia usada para detectar errores en el encabezado.

6. Aplicaciones

6.1. Uso rural

Una de las aplicaciones más recurrentes de WiMAX se trata de dar servicio a las zonas rurales o a ciudades con baja densidad de población, donde llevar tecnologías como la fibra óptica supondría una rentabilidad muy baja debido al escaso número de usuarios o a las dificultades geográficas.

Aunque el despliegue de WiMAX sea económicamente plausible debido al bajo coste de su infraestructura, sigue siendo caro para el usuario, que normalmente tendrá que adquirir nuevos equipos compatibles con el estándar IEEE 802.16, además de que la red inalámbrica dependerá de varios factores, como dispersión o humedad, por lo que no se podrá garantizar una disponibilidad del 100%.

Dado al uso rural que se le ha querido dar a WiMAX, IEEE creó un grupo de trabajo para escribir un nuevo estándar, el IEEE 802.22, con la idea de utilizar canales no usados de televisión para transmitir red sin cables a largas distancias, y puede que en un futuro no muy lejano se dé más prioridad a esta tecnología en el ámbito rural.

6.2. Uso militar

Esta tecnología es aplicada en el ámbito militar, haciendo posible que los campamentos militares que se encuentren en diferentes localizaciones puedan estar conectados e intercambiar información de manera rápida y segura, gracias a las facilidades de despliegue de las antenas, pudiendo adherirlas a vehículos militares.

Cabe destacar el uso que tiene en la comunicación entre unidades de artillería antiaéreas en la Armada Española, donde se han hecho pruebas de QoE, despliegue e inclusión de nuevos sensores y servicios, como vídeo y VoIP [17].

Además de su uso bélico, puede ser utilizado en situaciones de desastre, como terremotos o inundaciones, donde las redes de cable pueden quedar fuera de servicio.

7. Comparativa

7.1. WiMAX Vs. LTE

WiMAX fue desarrollado por el WiMAX Forum y el IEEE sin tener en cuenta aspectos de las redes móviles. Sin embargo, LTE está desarrollada por 3GPP, siendo la evolución de las redes UMTS. Por esto, WiMAX tiene el inconveniente de no ser compatible con las tecnologías anteriores.

La **implementación** de WiMAX fue muy lenta y los dispositivos no estaban listos para usarla. Mientras tanto, 3GPP fue desarrollando LTE. Dada la compatibilidad citada con las redes existentes, la mayoría de operadores y fabricantes han decidido decantarse por LTE [18].

Respecto a la **tecnología de acceso**, LTE utiliza para el canal de descarga OFDMA y para el canal de subida SC-FDMA. Sin embargo, WiMAX utiliza en ambos canales tecnología OFDMA.

La **duración de la trama** en LTE es de 10 ms, las cuales son formadas a través de 10 sub-tramas de 1 ms cada una, mientras que en WiMAX la duración es de 5 ms. Esto quiere decir que, a altas velocidades de transferencia, WiMAX ofrece más eficiencia para tramas de menor tamaño.

En cuanto al **coste**, el despliegue de una red WiMAX es mucho más barato que el despliegue de la red LTE.

Si observamos el rango de **ancho de banda del canal**, LTE soporta de 1.4 MHz a 20MHz, mientras que WiMAX de 3.5 MHz a 10 MHz.

La **cobertura** ofrecida por WiMAX puede llegar a cubrir 50 km, pero con bastantes pérdidas, por lo que es bueno para distancias cortas. Por otro lado, LTE puede llegar a cubrir 100 km.

WiMAX soporta **conexiones** con una **movilidad** de hasta 120 km/h, LTE, sin embargo, de hasta 250 km/h [19].

7.2. WiMAX Vs. Wi-Fi

WiMAX y Wi-Fi son soluciones complementarias para dos aplicaciones bastante diferentes. WiMAX fue diseñado para redes metropolitanas (MAN), también conocido como “última milla”. Wi-Fi en cambio fue diseñada para redes locales (LAN), también conocido como “distribución en sitio”. Las principales diferencias que encontramos son las siguientes:

En cuanto a **bandas de frecuencia**, Wi-Fi permite emitir en las bandas de radio sin licencia de 2.4 GHz o 5 GHz. WiMAX incluye un rango mucho mayor, de 10 a 66 GHz y de 2 a 11 GHz. Además, WiMAX realiza un uso más eficiente del espectro, 4.2 bps/Hz contra los 3.3 bps/Hz de Wi-Fi.

Respecto a la **duplexación**, Wi-Fi utiliza sistemas TDD basados en contención, donde todos los puntos de acceso inalámbricos (AP) y las estaciones móviles compiten por

el uso del mismo canal. WiMAX, sin embargo, puede ser configurado para utilizar FDD o TDD [20].

En cuanto a la **cobertura**, Wi-Fi ofrece una máxima distancia de 300 metros en el mejor de los casos. WiMAX, sin embargo, podría llegar a los 50 km, pero con pérdidas considerables.

Si hablamos de la **seguridad**, en la tecnología Wi-Fi el cifrado es opcional y dispone de tres técnicas diferentes: WEP, WPA y WPA2. Por el contrario, en WiMAX, al ser definida para el uso de redes públicas, todas las transmisiones son cifradas.

Otra diferencia entre ambas reside en el hecho de que Wi-Fi se ejecuta a través del protocolo *Media Access Control's CSMA/CA*, mientras que WiMAX se ejecuta a través de una conexión orientada a MAC.

Respecto a la **calidad de mecanismos de servicios** que utilizan, son muy diferentes. WiMAX utiliza un mecanismo de QoS basado en las conexiones que se establecen entre la estación base y el dispositivo del usuario. En cambio, Wi-Fi utiliza afirmación de acceso [21].

8. Presente y futuro: WiMAX 2

Aunque la gran mayoría de operadores de todo el mundo están apostando por LTE para desplegar sus redes de telefonía móvil 4G, los desarrolladores de WiMAX han seguido mejorando constantemente su tecnología.

Así, en 2011, el IEEE terminó de definir la versión **802.16m** para cumplir así con los requerimientos de ITU-R IMT-Advanced para sistemas 4G. Esta nueva evolución, que pasará a ser más comúnmente conocida como **WiMAX 2**, permite alcanzar velocidades teóricas de 1 Gbps en punto fijo y hasta 100 Mbps en redes móviles. Además, al estar construida sobre la versión 802.16e, se garantiza su compatibilidad con la misma.

Para llegar a la velocidad máxima (1 Gbps teórico), se necesitan tres canales de 20 MHz simultáneamente (algo que hasta ahora no se podía hacer), con un sistema MIMO de 4x4 antenas y multiplexación por división en el tiempo.

A pesar del grandísimo salto de rendimiento respecto a los estándares previos de WiMAX, la cobertura se sigue manteniendo menor de 50 kilómetros en línea recta desde el punto de acceso, siendo lo óptimo 5 km [22].

En la tabla 1, se pueden observar algunas de las principales diferencias entre WiMAX 2 y su predecesora:

	802.16e ("WiMAX 1.0")	802.16m (WiMAX 2)
Modos de multiplexación	Tiempo	Tiempo, frecuencia
Canales	3.5/7/8.75/10 MHz	5/10/20 MHz
Esquemas MIMO Típicos (estandarizado 8x8)	Descarga: 2x2 Subida: 1x2	Descarga: 2x2, 2x4, 4x2, 4x4 Subida: 1x2, 1x4, 2x2, 2x4
Latencia	Acceso: 20 ms Cambio de estación: 35-50 ms	Acceso: <20 ms Cambio de estación: <30 ms
Eficiencia espectral por sector (valores pico)	Bajada: 6.4 bits/s/Hz Subida: 2.6 bits/s/Hz	Bajada: 15 bits/s/Hz Subida: 6.75 bits/s/Hz
Eficiencia espectral por sector (valores sostenidos)	Bajada: 1.55 bits/s/Hz Subida: 0.9 bits/s/Hz	Bajada: 2.6 bits/s/Hz Subida: 1.3 bits/s/Hz
Usuarios VoIP	25 usuarios/sector/MHz	>60 usuarios/sector/MHz

Tabla 1. Comparativa entre WiMAX 2 y las versiones previas [22].

Desde entonces, sigue habiendo nuevas revisiones del estándar que van paulatinamente mejorando sus características. Entre ellas destacan una mayor fiabilidad (802.16n) o un soporte mejorado para aplicaciones máquina a máquina (802.16p). La versión más reciente del estándar, la 802.16q, incorpora mejoras en los protocolos MAC y PHY para habilitar la cooperación entre estaciones base en redes multicapa, reduciendo las interferencias y mejorando la gestión de la movilidad y la administración de energía [23].

9. Conclusiones

Se trata de una tecnología que, pese al desconocimiento que existe respecto a ella, se encuentra en disposición de triunfar, debido a la gran cantidad de **ventajas** que tiene. Cabe destacar las siguientes:

- Provee servicios de banda ancha en regiones donde el cable tiene un coste elevado para el usuario y es inestable en zonas con baja densidad de población, como puede ser en las áreas rurales.
- Bajo coste en su implementación.
- No existe un límite de tráfico, ni límite en la cantidad de archivos que podemos descargar o enviar, que al alcanzarlo disminuya la velocidad de conexión.
- Tiene una latencia mucho menor que la del satélite, por eso es adecuado para videoconferencias o juegos online.
- Presenta un alto nivel de seguridad mediante un fuerte cifrado.
- Instalación sencilla del panel, a través de la cual cada estación base se conecta con múltiples usuarios.

Sin embargo esta tecnología presenta también serias **desventajas** como:

- Limitación de potencia para prever interferencias con otros sistemas.
- Reducción considerable de la distancia a la que puede dar servicio una estación a sus usuarios si esta tiene que atravesar varios objetos.

- Las empresas que deseen prestar servicios en bandas de licencia tienen que estar en el registro de operadoras de la CMT y especificar bandas concretas.
- Puede ser susceptible al efecto conocido como “*Rain-fade*”, el cual produce una atenuación en la señal en caso de lluvia.
- La calidad de servicio se puede ver reducida drásticamente en el caso de que se conecten simultáneamente muchos usuarios.
- Consumo muy grande de energía y necesidad de mucha potencia.

Para finalizar, vamos a localizar a las tecnologías que hemos mencionado. Si bien en el área móvil han triunfado los estándares de **3GPP** gracias a la compatibilidad con estándares asentados (**LTE** es compatible con **GSM** y **UMTS**, lo que facilita el *handover*), el uso de WiMAX en zonas rurales se ha extendido (en especial a partir del estándar IEE 802.16-2004) y, en el caso de España, es posible contratar servicios de acceso a Internet con WiMAX en ámbitos donde el ADSL no es capaz de llegar.

10. Referencias

Todas las referencias abajo citadas están consultadas en Abril de 2015.

- [1] Roper Mancera, Ramón. “Las tecnologías Wi-Fi y WiMAX”. *Diputación de Badajoz*, 2009. Disponible en Internet: <http://bit.ly/1OS90TT>.
- [2] González, Pablo. Trabajo de fin de carrera, 2006. Disponible en Internet: <http://bit.ly/1EK2o21>.
- [3] Martínez Abiétar, Alejandro. *Sistemas de Difusión de Radio y Cable. Departamento de Comunicaciones, Universidad Politécnica de Valencia*, 2011. Disponible en Internet: <http://bit.ly/1bTuKwy>.
- [4] Maqueda Gil, Eladio, “Las tecnologías Wi-Fi/WiMAX: Aspectos tecnológicos”, *red Provincial de Comunicaciones Seguras e Informática*. Disponible en Internet: <http://bit.ly/1IE1EhA>.
- [5] Rodríguez Maltés, Luis Raúl, “Análisis y predicción de cobertura de WiMAX a 3.3-3.4 GHz para zonas rurales”, Capítulo 1, 2010. Disponible en Internet: <http://bit.ly/1GUadFH>.
- [6] Rotondo, Miguel, “IEEE 802.16 WMAN/WiMAX”, 2006. Disponible en Internet: <http://bit.ly/1bTv8Ll>.
- [7] Kuo-Hui Li, “WiMAX Network Architecture”, Jun-2006. Disponible en Internet: <http://bit.ly/1PgBa5K>.
- [8] “WiMAX Forum Mobile Radio Specifications”, Release 2.1, Mar-2013. Disponible en Internet: <http://bit.ly/1dGzRBC>.
- [9] IEEE 802.16-2012, Capítulo 6.3, 2012. Disponible en Internet: <http://bit.ly/1E80Prg>.
- [10] IEEE 802.16-2012, Capítulo 8, *Physical Layer*. Disponible en Internet: <http://bit.ly/1DXt4K2>.
- [11] IEEE 802.16-2012, Tabla 8-38, *OFDM symbol parameters*. Disponible en Internet: <http://bit.ly/1DXt4K2>.
- [12] Díaz Reguero, Alexandra. “Comunicaciones Wimax Y UMTS basadas en HAPS”. *Universidad Autónoma de Madrid*. Disponible en Internet: <http://bit.ly/1EPGaNc>.
- [13] González Muñoz, Paula, “Estudio de la tecnología 802.16 de IEEE”, *Universidad Carlos III de Madrid*. Disponible en Internet en: <http://bit.ly/1E814Co>.
- [14] Malpartida Martínez-Darve, Gonzalo. *Simulador de nivel MAC y comparativa de mecanismos de ARQ en el estándar IEEE 802.16*. Disponible en Internet en: <http://bit.ly/1F0guzx>.
- [15] IEEE 802.16-2012, Capítulo 7, *Security sublayer*. Disponible en Internet: <http://bit.ly/1DXt4K2>.
- [16] “Comparación de la eficiencia volumétrica entre redes inalámbricas Wi-Fi y WiMAX”, *Facultad de Ingeniería UNAM. Departamento de Ingeniería en Telecomunicaciones*. Disponible en Internet en: <http://bit.ly/1GSSjAD>.
- [17] “Tactical Use of WiMAX-based networks for anti-aircraft artillery units, UPV”. Disponible en Internet: <http://bit.ly/1dGzZ46>.
- [18] Suárez, Francisco, “WiMAX y LTE: Complemento o competencia”. Disponible en Internet: <http://bit.ly/1bTvRwc>.
- [19] Fernández Cruz, Y., & Marante Rizo, F. (2014). LTE vs. WiMAX. *Revista digital de las tecnologías de la información y las comunicaciones*, 46-50.
- [20] Soro, D., González, A., Rojo, D., & Feijóo, C. (2012). Tendencias de la regulación de las tecnologías inalámbricas. Disponible en Internet: <http://bit.ly/1QdjfiJ>.
- [21] Yépez, C., Briones, A., & Gracia, N. (2011). “Análisis comparativo de las tecnologías Wi-Fi y WiMAX”. Disponible en Internet: <http://bit.ly/1OSa0HB>.
- [22] “WiMAX 2 se completará en noviembre”, artículo de Bandaancha.eu. Disponible en Internet: <http://bit.ly/1F0gVd7>.
- [23] “IEEE Standards Association”: <http://bit.ly/1zGyv3S>