

# 9. Las redes de telecomunicación basadas en WiMAX (IEEE 802.16)

Carlos Rey Moreno<sup>1</sup>, Ignacio Prieto Egido<sup>2</sup> y  
Francisco Javier Simó Reigadas<sup>3</sup>

## 9.1. Introducción

WiMAX (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*) ha sido identificada por distintos autores como la tecnología que podría cubrir la falta de acceso a infraestructura de telecomunicaciones de grandes sectores de la población que habita las zonas rurales del planeta. Esto se debe fundamentalmente a que desde su inicio fue concebida para proveer acceso inalámbrico de banda ancha a distancias de decenas de kilómetros, con lo cual es posible llevar este servicio hasta zonas aisladas sin necesidad de realizar las altas inversiones requeridas para alcanzar esas mismas áreas con redes cableadas, lo que, no sólo abarata el coste, sino que también disminuye enormemente los tiempos de despliegue.

Además, al tratarse de una tecnología estándar permite beneficiarse del ecosistema que se forma en torno a ella, haciendo posible alcanzar economías de escala. Por ejemplo, los distintos fabricantes que opten por desarrollar la tecnología deben proponer soluciones innovadoras o menores precios para diferenciar sus productos, lo que sin duda lleva a que exista una mayor oferta de soluciones de la tecnología en cuestión. A esto hay que añadir la interoperabilidad entre los equipos de los distintos fabricantes, lo que proporciona una mayor independencia y una mayor sostenibilidad a largo plazo al no depender de las decisiones de un único fabricante.

El ser una tecnología que ha sido diseñada inicialmente para operadores también tiene sus ventajas: brinda una gran robustez, una seguridad muy superior a la de tecnologías inalámbricas precedentes y, quizás lo más importante, la posibilidad de ofrecer calidad de servicio estricta a todas las comunicaciones que tienen lugar dentro de la red.

---

<sup>1</sup>Fundación EHAS/Universidad Rey Juan Carlos, España

<sup>2</sup>Fundación EHAS, España

<sup>3</sup>Universidad Rey Juan Carlos, España

Estas ventajas, unidas a la gran flexibilidad que aporta tanto en las frecuencias en las que se puede utilizar como en los escenarios en los que es relevante (fijos o móviles), la convierten en una tecnología interesante como para ser considerada para dotar de conectividad a las zonas rurales de países en desarrollo. En este capítulo se describirá la tecnología, se planteará su viabilidad en zonas rurales, y se presentará una comparación entre ésta y Wi-Fi.

## 9.2. Tecnología WiMAX

El acrónimo WiMAX es la marca que certifica que los productos cumplen con el estándar IEEE 802.16 y que son interoperables con los equipos de otros fabricantes. La organización encargada de emitir este certificado es el *WiMAX Forum*, una entidad sin ánimo de lucro cuyo objetivo es promover el despliegue de servicios de banda ancha inalámbrica y formada por fabricantes de equipos y componentes electrónicos, operadores y proveedores de servicios que hacen uso de esta tecnología.

La versión en vigor del estándar es la 802.16-2009, que revisa y unifica las versiones anteriores del mismo: 802.16-2001, 802.16c-2002, 802.16a-2003, 802.16-2004 y 802.16e-2005, 802.16f, y 802.16g, añadiendo algunas funcionalidades. Este estándar fue diseñado para redes inalámbricas de área metropolitana (WMAN) y, como la gran mayoría de los estándares IEEE, define la capa física (PHY) y sobre todo se centra en especificar la capa de control de acceso al medio (MAC). En los siguientes apartados se describirán su arquitectura y las principales características de estas dos capas.

### 9.2.1. Arquitectura

Una red 802.16 está formada por dos elementos fundamentales: la estación base (BS) y las estaciones subscriptoras, pudiendo estas segundas ser fijas (SS) o móviles (MS). Las estaciones subscriptoras (móviles o fijas) no pueden establecer una comunicación directamente entre ellas, sino que deben conectarse a través de la BS. En la mayoría de los casos habrá más de una SS/MS, por lo que la arquitectura utilizada es punto a multipunto. Sin embargo, también se puede dar el caso en que se utilice una única estación cliente para realizar tareas de *backhauling*. Se han planteado también otras arquitecturas como *mesh* para permitir a las distintas SS conectarse entre ellas, o el uso de estaciones repetidoras para aumentar la cobertura y la capacidad de la red, pero no han sido acogidas positivamente y por lo tanto no están disponibles en el mercado.

En la arquitectura utilizada todas las comunicaciones pasan por la BS, que es además la encargada de gestionar el acceso al medio, identificando a las estaciones subscriptoras y permitiendo el acceso sólo a aquellas autorizadas. Además, es la BS la encargada de planificar los recursos que recibe cada estación suscriptor, sincronizando todas las estaciones para optimizar el uso del espectro, de forma que se puedan mantener los requisitos de QoS de las distintas comunicaciones que tienen lugar dentro de la red.

### 9.2.2. La capa MAC

La capa MAC del estándar 802.16 se caracteriza por ofrecer una comunicación orientada a conexión y por realizar una planificación determinista para distribuir los recursos de la red, de forma que se puedan garantizar unos ciertos niveles de calidad de servicio (QoS) para cada conexión. Para ello, la comunicación entre la BS y las SS<sup>4</sup> utiliza tramas de una duración predefinida, donde las ranuras que la conforman han sido previamente asignadas por la BS para que cada una de las SS las utilice para la transmisión o la recepción de sus paquetes de datos, estando por tanto libre de contienda.

La gestión de recursos destinada a garantizar una determinada QoS para cada conexión se realiza a través de un mecanismo denominado *Grant/Request*. Al crear las conexiones de datos en una red WiMAX (puede haber varias por SS), éstas pueden ser asociadas a una serie de requisitos de QoS (*jitter*, caudal, retardo, etc.) en función a las necesidades de las aplicaciones de usuario cuyos datos van a ser transportados por esa conexión. Sin embargo no todas las conexiones son admitidas en la red, sino sólo aquellas a las que se les puedan garantizar esos requisitos de QoS en el largo plazo. El mecanismo que se encarga de admitir o rechazar una conexión en la red se conoce como Control de Admisión y se encuentra en la BS. Para decidir si acepta o no una nueva conexión, éste tiene en cuenta las conexiones ya existentes en la red y los recursos que tiene que comprometer para mantener la QoS de éstas.

En función de los requisitos de QoS que se hayan fijado para cada conexión admitida, las SS pueden hacer uso cada cierto tiempo de unos determinados mecanismos para indicar a la BS las necesidades de transmisión para cada una de sus conexiones (*Request*). La BS decide, en función de los recursos existentes en el canal inalámbrico y de los requisitos de QoS de cada conexión, cuánto asigna a cada SS, comunicándoselo mediante un *Grant*. Un *Grant* no es más que una asignación de una o más ranuras en la parte de la trama dedicada al enlace ascendente. Como los *Requests* se hicieron por cada conexión y los *Grants* se reciben por cada SS, éstas últimas tienen que decidir qué conexiones utilizarán los recursos asignados. Algo similar tiene que hacer la BS con los recursos con los que cuenta en la parte de la trama dedicada al enlace descendente, ya que al tener conocimiento del canal y no compartirlo con nadie, no es necesario que se coordine con ninguna otra estación. En los tres casos (planificación de recursos del enlace ascendente y elección del uso de recursos tanto en el enlace ascendente como en el descendente), esta tarea se lleva a cabo a través de planificadores.

Los planificadores, al igual que el módulo de admisión de control, juegan un rol muy importante para garantizar la QoS y sólo están definidos en el estándar de manera esquemática, de forma que cada fabricante puede decidir cuál es su implementación final. Por lo tanto, en la mayoría de los casos el algoritmo utilizado por los equipos instalados no es conocido.

La capa MAC proporciona así mismo otras funcionalidades ligadas a la seguridad (cifrado, descifrado, autenticación e intercambio seguro de claves), la inicialización de la

---

<sup>4</sup>En adelante sólo se hará referencia a las estaciones subscriptoras fijas, que son las de interés en este libro.

estación en la red, el control de la potencia de transmisión de ésta, y el establecimiento y mantenimiento de conexiones. En la MAC, además, se incorporan los mecanismos que permiten usar WiMAX en escenarios de movilidad, cuya viabilidad en los contextos que conciernen a este libro se describen en la Sección 9.3.

### 9.2.2.1. Servicios de Planificación

Como se ha indicado anteriormente, una SS podrá utilizar determinados mecanismos para solicitar ancho de banda para una conexión, con el fin de cumplir requisitos de QoS para ciertos parámetros de la comunicación como caudal (*throughput*), retardo o *jitter*. La capa MAC agrupa estos mecanismos en lo que se conoce como servicios de planificación. El estándar 802.16-2009 define cinco, a saber:

- *Unsolicited Grant Service* (UGS).
- *Real-time Polling Service* (rtPS).
- *Extended rtPS* (ertPS).
- *Non-real-time Polling Service* (nrtPS).
- *Best Effort service* (BE).

La clase **UGS** garantiza tramas periódicas de tamaño fijo evitando así la sobrecarga y el retardo que introducen las solicitudes de las estaciones, y puede emplearse por ejemplo para proporcionar conexiones T1/E1 y Voz sobre IP. Para la transmisión de datos asegura una tasa de transmisión mínima, y que la latencia y el *jitter* estarán por debajo de un máximo.

La clase **rtPS** está diseñada para cursar tráfico en tiempo real con paquetes periódicos de tamaño variable, como sucede con el video codificado en formato MPEG. En este caso la estación subscriptora tiene reservada una ranura (*slot*) para solicitar ancho de banda periódicamente (*unicast poll*), especificando el tamaño deseado para el intervalo de transmisión. Este mecanismo incrementa la sobrecarga frente a UGS, pero aumenta la eficiencia del transporte de datos al permitir que los intervalos de transmisión tengan tamaño variable. En esta clase de servicio se garantiza una tasa de transmisión mínima y un límite superior para la latencia.

La clase **ertPS** pretende aunar las ventajas de UGS y rtPS, garantizando los intervalos de transmisión como en UGS a la vez que se proporcionan mecanismos para que la estación subscriptora solicite cambiar el tamaño del intervalo de transmisión asignado a esa conexión en el enlace ascendente. De esta manera se reduce la sobrecarga al tiempo que se facilita un mejor aprovechamiento del ancho de banda disponible. Esta clase de servicio está diseñada para cursar tráfico en tiempo real de paquetes periódicos con tamaño variable, como en el caso de Voz sobre IP con supresión de silencios, y como en el caso anterior garantiza una tasa mínima de transmisión y una latencia máxima.

La clase **nrtPS** proporciona de forma regular la oportunidad de solicitar intervalos de transmisión, garantizando que la conexión pueda cursar solicitudes de ancho de banda

incluso con la red congestionada. De este modo se consigue asegurar una tasa mínima de transmisión para esa conexión.

Las estaciones deberán solicitar siempre intervalos de transmisión para sus conexiones **BE**, y cuando la red está muy congestionada se verán obligadas a competir con otras estaciones para enviar dicha solicitud. Esta clase de servicio no garantiza ningún parámetro de la comunicación.

### 9.2.3. La capa PHY

El estándar define cuatro posibles PHY que se diferencian fundamentalmente por el rango de frecuencias en el que trabajan, la modulación que emplean y el mecanismo de duplexación permitido. El objetivo de definir varios PHY es conseguir que la tecnología sea lo suficientemente flexible para emplearse en diferentes aplicaciones y rangos de frecuencias, dejando abierta la posibilidad de definir nuevos PHY para adaptarse a necesidades futuras. Las PHY definidas actualmente son:

- *WirelessMAN-CS*: está concebida para trabajar en entornos con línea de vista (LOS), para lo cual emplea una modulación monoportadora y trabaja en bandas con licencia comprendidas entre los 10 y los 66 GHz. Para dar mayor flexibilidad en el uso del espectro, la diferenciación del enlace ascendente y descendente puede realizarse en el tiempo (TDD, *Time Division Duplex*) o en frecuencia (FDD, *Frequency Division Duplex*).
- *WirelessMAN-OFDM*: orientada a conexiones punto-multipunto fijas en entornos sin línea de vista (NLOS), trabaja en bandas con licencia inferiores a 11 GHz y permite tanto TDD como FDD. La técnica de acceso al medio que utilizan para evitar las colisiones es TDMA.
- *WirelessMAN-OFDMA*: trabaja en el mismo rango de frecuencias que la anterior y permite aprovechar la flexibilidad de la modulación OFDMA para buscar un compromiso entre consumo y tasa de transferencia en dispositivos con recursos energéticos limitados, como es el caso de los dispositivos móviles. La técnica de acceso al medio que utilizan para evitar las colisiones es TDMA/OFDMA.
- *Wireless-HUMAN*: esta PHY también emplea modulaciones OFDM u OFDMA con frecuencias inferiores a 11 GHz, pero en cambio está diseñada para trabajar en bandas sin licencia, lo que obliga a considerar algunas restricciones regulatorias y a definir funcionalidades adicionales. El estándar sólo permite el empleo de la banda sin licencia de 5 GHz, ya que la de 2,4 GHz está saturada. Este PHY sólo establece el empleo de duplexación en el tiempo.

Las capas PHY de WiMAX admiten además el empleo de modulaciones adaptativas, lo que significa que definen los mecanismos necesarios para que las estaciones puedan variar de forma dinámica el esquema de modulación empleado en la transmisión en función del estado del canal inalámbrico. La calidad del canal inalámbrico es peor cuanto más largo sea el enlace, por lo que el esquema de modulación elegido por WiMAX será más robusto cuanto más aumente la distancia entre la BS y SS. Es conveniente

indicar que cuanto más robusta sea una modulación, menor será la cantidad de datos que podrá transportar. La capa física de WiMAX por tanto permite que se establezca un compromiso entre la distancia entre dos estaciones y la cantidad de datos que pueden intercambiar entre ellas. En este sentido, el caudal máximo que puede ofrecer una red WiMAX es muy dependiente, no sólo de la PHY utilizada, sino del número de SS que se conecten a ella, y del estado del canal entre ellas y la BS.

### 9.3. WiMAX en aplicaciones con movilidad

El estándar IEEE 802.16e-2005 se encargó de definir las características y funcionalidades que posibilitan emplear la tecnología WiMAX en entornos móviles, dando lugar a lo que algunos fabricantes y operadores denominaron WiMAX Móvil. La versión actual del estándar (IEEE 802.16-2009), que integra las versiones anteriores, incluye también estas funcionalidades destinadas a proporcionar conectividad a terminales móviles.

Las aplicaciones móviles requieren terminales que puedan ser transportados por una persona, lo que supone emplear baterías de pequeño tamaño y antenas omnidireccionales de dimensiones y ganancia reducidas. En estos entornos surge además la posibilidad de que un terminal se mueva del área de cobertura de una estación base a la de otra estación base adyacente, lo que implica que el terminal se desconectaría de la primera estación y se conectaría a la segunda en un proceso que se conoce como *hand-over* (o *hand-off*). Si durante este proceso se admite que el terminal pierda la conectividad, se trataría de un *hard hand-over*, y la tecnología no sería válida para aplicaciones de voz en movilidad. El estándar 802.16 define los mecanismos necesarios para proporcionar *soft hand-over*, de forma que el proceso de cambio de estación base se produzca sin pérdida de conectividad, permitiendo que una conversación de voz se mantenga aunque el usuario se desplace.

Otro tipo de comunicaciones móviles serían aquellas que se establecen entre vehículos (V2V), o entre un vehículo y una infraestructura fija (V2I). En este caso los terminales podrían tener un consumo mayor y emplear antenas más grandes.

Un factor muy importante también en comunicaciones móviles son las bandas de trabajo disponibles, ya que aquéllas resultan poco viables en bandas sin licencia. Las dificultades técnicas ligadas a las comunicaciones móviles se enumeran a continuación:

1. El alcance de la señal se ve limitado por el uso de terminales móviles porque:
  - estos terminales deben funcionar también en interiores, donde las pérdidas de propagación son altas debido a la absorción de las paredes.
  - son terminales alimentados por batería que requieren un consumo reducido, lo que limita su potencia de transmisión.
  - la antena en este tipo de terminales es omnidireccional y de baja ganancia, por lo que su contribución al balance de enlace es muy reducida.

2. Las altas pérdidas de propagación deben ser compensadas en ambos sentidos de la comunicación. En sentido ascendente (desde el terminal móvil a la estación base) se recurre a un mecanismo de acceso múltiple como OFDMA (WiMAX) o CDMA (3G). Estas mismas técnicas no mejoran el balance de enlace en sentido descendente (desde la estación base al terminal móvil), por lo que la única forma de compensar las pérdidas en el enlace descendente es transmitir con altas potencias (de al menos 2 W), lo cual es ilegal en bandas sin licencia donde la potencia de transmisión está muy limitada. Por consiguiente, el enlace es inviable en interiores.

Estas dificultades no se dan en las comunicaciones vehículo a vehículo (V2V) o vehículo a infraestructura (V2I), dado que los vehículos pueden transportar antenas de mayor ganancia y los terminales pueden emplear la energía del vehículo para transmitir con mayor potencia. En este caso el empleo de bandas libres reduciría el coste de la red al no tener que obtener una licencia, y además facilitaría un despliegue más rápido dado que en muchos casos no es necesario realizar trámites administrativos. Estas características pueden resultar de interés en redes de comunicaciones que requieran desplegarse rápidamente en situaciones de emergencia.

En resumen, en bandas libres el modelo converge al de aplicaciones fijas: terminales de exteriores fijos y propagación con línea de vista, a excepción de comunicaciones muy específicas como V2V o V2I.

## 9.4. WiMAX para zonas rurales

Desde su creación, WiMAX ha sido considerada como una solución potencial para paliar los problemas de acceso existentes en grandes zonas del planeta. Esta idea fue secundada por el gran interés inicial mostrado por los operadores de países desarrollados, que vieron en esta tecnología la posibilidad de acceder a un mercado al que hasta ese momento era implantable darle servicio a un coste razonable. Estos operadores, haciendo uso de la banda licenciada de 3,5 GHz, han desplegado en los últimos años multitud de redes que están proporcionando, de forma bastante exitosa, servicios de datos a precios asequibles en zonas rurales y aisladas donde era impensable unos años antes. Este éxito, sin embargo, no se ha visto reflejado en zonas rurales de países en vías de desarrollo, donde los operadores ven muy complicado obtener algún retorno de inversión sobre los altos costes que implica desplegar redes de telecomunicación en estas áreas.

El hecho de que los operadores no quieran arriesgar sus inversiones en estas zonas, y de que gran parte del ecosistema WiMAX esté volcado hacia la prestación de servicios de banda ancha móvil, no quiere decir que la tecnología no ofrezca multitud de características que permiten tenerla en cuenta para realizar despliegues del tipo de los mencionados en este libro, y por tanto ser considerada una alternativa viable para la interconexión de establecimientos de salud en zonas rurales de países en desarrollo.

### 9.4.1. Motivos por los que usar WiMAX en estos entornos

La primera de estas características es la posibilidad de operación en bandas de frecuencia que no requieren licencia, algo que está establecido para la PHY Wireless-HUMAN del estándar 802.16-2009. Además, no sólo está definido teóricamente, sino que existen multitud de fabricantes que ofrecen equipos en estas bandas, entre los que se encuentran Alvarion, Proxim, Alentia, Aperto o Tranzeo. Sin embargo, y pese a que multitud de estos fabricantes garantizan la interoperabilidad entre ellos [160, 161], el WiMAX Forum aún no ha definido un perfil de certificación para ellos. Aunque esto supone alguna limitación, puesto que no hay un organismo internacional que garantice qué equipos de distintos fabricantes pueden trabajar juntos, y no es formalmente correcto utilizar el término WiMAX para equipos que no están certificados, en la práctica éstos contienen todas las características técnicas definidas por 802.16 y descritas en la sección anterior.

Esto permite a estos equipos beneficiarse de las economías de escala alcanzadas para fabricar los equipos WiMAX para bandas licenciadas, y que ha supuesto un descenso drástico de su precio en los últimos años, cayendo desde los 20.000 USD que podía costar una BS en 2006 [162], a los 5.000 en los que se estimaba su coste en 2008 [163], y a alrededor de 1.500 USD por los que se pueden adquirir en la actualidad. Las estaciones cliente siempre han tenido un coste más reducido, en torno a los 200 USD actualmente. En cualquier caso, el coste de los equipos parece marginal con respecto a los altos costes en los que se incurre al instalar la infraestructura para desplegar redes de comunicaciones en estas áreas: torres ventadas de decenas de metros, alimentación eléctrica autónoma, protección eléctrica frente a descargas atmosféricas, etc.

Además, según el estudio presentado en [164], parece que aunque el ecosistema WiMAX en general sí que pudiera estar en problemas, la viabilidad de contar con equipos WiMAX en bandas libres no peligrará para los próximos años. Ello es debido fundamentalmente a que éstos son los que más se utilizan en los "mercados verticales", que es donde se considera que WiMAX tendrá su principal aplicación en el futuro. Los mercados verticales están orientados a satisfacer las necesidades de un grupo de "usuarios" con similares requisitos en comunicaciones, que pueden ir desde sistemas de videovigilancia y gestión de tráfico, a la provisión de acceso a Internet de una red de colegios o de centros de salud.

El uso de altas frecuencias, como las disponibles en la banda de 5 GHz, impone una restricción cuando pretenden ser utilizadas para establecer enlaces de decenas de kilómetros como los que se describen en este libro: es imprescindible que exista línea de vista radioeléctrica entre ambos extremos del enlace. Esta restricción que es propia de la banda de frecuencias y no de la tecnología, se solventa con el uso de antenas de mayor ganancia y radios de mayor potencia, y es el único factor limitante de la distancia máxima a la que se puede establecer un enlace con WiMAX. Sin embargo, es importante añadir que, al ser una tecnología muy orientada a las soluciones propietarias llave en mano, no es tan sencillo utilizar radios de potencia superior a las ofrecidas por el fabricante, que por lo general ofrecen un potencia de transmisión máxima en torno a los 20 dBm.



Otra de las características que se requiere en tecnologías que han de ser desplegadas en estos entornos es el bajo consumo, dado que los equipos han de ser alimentados mediante sistemas autónomos que encarecen enormemente el coste del proyecto. En WiMAX, la mayoría de las BS tienen un consumo alrededor de los 20 Vatios, siendo menor para el caso de las SS (6 a 10 Vatios), lo que permite considerarlas viables para estos entornos.

Además de ofrecer la mayoría de características requeridas para funcionar en estos entornos, el hecho de haber sido diseñada para operadores otorga a WiMAX una serie de características intrínsecas que aportan un gran valor añadido a su uso en estas zonas. Entre ellas destacan su capacidad para proporcionar servicios IP con garantías de servicio, su robustez y su esquema de seguridad.

Una de las características principales de la tecnología WiMAX es su capacidad para garantizar los recursos que las aplicaciones necesiten, pudiendo asegurar, por ejemplo, un caudal mínimo o un retardo máximo. Garantizar estos parámetros permite que los servicios proporcionados por la red gocen de una mayor calidad, es decir, que funcionen como se espera. A esta capacidad de los sistemas se la denomina Calidad de Servicio (QoS). Además, al no definir las capas superiores, cualquier tipo de tráfico puede ser cursado y priorizado en una red WiMAX, entre ellos el tráfico de cualquier aplicación IP que requiere el usuario final. Garantizar QoS para las aplicaciones de una red es especialmente importante para la telemedicina, donde para algunos servicios es crítico funcionar sin pérdida de información.

Introducir los requisitos de QoS de cada una de las aplicaciones para que la BS los tenga en cuenta en sus planificaciones y pueda garantizarlos, hace que la configuración de WiMAX sea muy compleja y por lo tanto requiera un mayor conocimiento de la tecnología para llevarlo a cabo. En contraprestación, esta complejidad se traduce en una mayor robustez en la prestación de los servicios, lo que conlleva a un menor esfuerzo y coste dedicado al mantenimiento de este tipo de redes.

Además, WiMAX ofrece un esquema de seguridad muy robusto ya que fue diseñado conjuntamente con el estándar en sí. En concreto, la seguridad la gestiona una subcapa dentro de la capa MAC que permite, desde garantizar la privacidad de los datos mediante cifrado hasta una autenticación de los usuarios mediante certificados, pasando por una gestión dinámica y segura del intercambio de claves.

#### 9.4.2. Ventajas y desventajas de equipos que incluyen OFDMA

Algunos autores apuntan también como ventajosa para el despliegue de WiMAX en zonas rurales la posibilidad de usar algunas de las técnicas avanzadas que están definidas en el estándar, como MIMO, AAS (*Adaptive Antenna System*) o *Beamforming*, para mejorar las prestaciones en zonas rurales de países en desarrollo [165]. Sin embargo, hay muy pocos equipos en el mercado operando en bandas no licenciadas que incorporen estos mecanismos, y los que lo hacen tienen unos costes muy superiores a los mencionados anteriormente: en torno a 15.000 USD por BS y 600 USD por CPE (*Customer-premises equipment*, equipamiento del usuario).

Estos equipos tienen la adaptación para su funcionamiento en 5 GHz, de dispositivos que se acogen a la certificación Wave 2 de WiMAX. Este perfil de certificación, ideado inicialmente para comprobar la interoperabilidad en escenarios de movilidad, incluye una serie de características que permiten ampliar enormemente las prestaciones de la red, como la posibilidad de utilizar canales de 20 MHz y el uso de la tecnología MIMO; además, se basan en OFDMA como mecanismo de acceso al medio, lo que ofrece multitud de ventajas en estos escenarios. Ofrecer servicios de banda ancha móvil es una de las prioridades de la mayoría de los grandes operadores de telecomunicaciones, por lo que el ecosistema WiMAX está centrando todas sus evoluciones basándose en este perfil. Esto hace prever que todas las evoluciones y reducciones de precios que se produzcan en el futuro gracias a las economías de escala tendrán lugar usando esta tecnología como base.

Sin embargo, los dispositivos para OFDMA son incompatibles con los basados en OFDM y TDMA, que es el mecanismo de acceso al medio utilizado por la gran mayoría de los equipos WiMAX que operan en bandas libres disponibles en el mercado. Además, la inclusión en estos últimos de los mecanismos avanzados descritos no es sencilla ya que muchos de ellos han sido diseñados para funcionar con OFDMA. Esto hace que en la actualidad la mayoría de los equipos WiMAX disponibles (aquellos basados en OFDM y TDMA) no puedan competir a nivel de prestaciones con otras tecnologías propietarias existentes en el mercado que operan en bandas libres, como Mikrotik o Ubiquiti, que a precios similares sí que incluyen la posibilidad de usar MIMO y canales de 20 y hasta 40 MHz, con el aumento de caudal que ello lleva asociado. Habrá que esperar, por tanto, para comprobar si el grueso de los fabricantes de equipos WiMAX en bandas libres decide usar la tecnología OFDMA en sus equipos, para ver si en el futuro pueden rivalizar en coste y prestaciones con los equipos propietarios mencionados. En cualquier caso, y pese a que a mayor caudal mayor será la cantidad de tráfico que podrá cursar la red en condiciones óptimas, las tecnologías propietarias mencionadas no pueden garantizar QoS a las aplicaciones que van sobre la red.

### 9.4.3. Problemas impuestos por el ecosistema

Pese a que WiMAX se presenta como una alternativa viable en estos contextos tal y como está concebida actualmente, el ecosistema WiMAX no ha impulsado muchas de las iniciativas que hubieran hecho de WiMAX una tecnología aún más atractiva para su despliegue en zonas rurales de países en desarrollo.

Entre estas iniciativas se encontraban la definición de mecanismos para permitir topologías WiMAX *mesh* o la posibilidad de introducir repetidores para extender la cobertura de la BS y la capacidad de la red. Ninguna de ellas ha suscitado el interés necesario en los operadores como para ser llevada a la práctica por los fabricantes. A esto se une el poco apoyo que han recibido los equipos que operan en bandas no licenciadas, lo que ha impedido un mayor desarrollo y oferta de los mismos. Ello impide, por ejemplo, que existan equipos de usuario (portátiles, móviles, etc.) que puedan conectarse a una infraestructura WiMAX operando en banda libre, lo cual obliga, como en el caso de tecnologías propietarias, al uso de equipos de exterior adicionales a los que se conectará el usuario final.

Esta falta de apoyo ha mostrado a WiMAX internacionalmente como una tecnología de operador para escenarios de movilidad, lo que ha provocado que muchos de sus beneficios para desplegarla en zonas rurales de países en desarrollo sean desconocidos por muchos de los actores que podrían estar potencialmente interesados en estos entornos.

#### 9.4.4. Casos de éxito

Los motivos mencionados en la sección anterior han provocado que existan pocas iniciativas que hayan hecho uso de WiMAX en zonas rurales de países en desarrollo. De entre ellas, el proyecto *Siyakhula Living Labs*<sup>5</sup>, destaca por ser el que más tiempo lleva activo.

Se trata de una iniciativa desarrollada conjuntamente por los Centros de Excelencia Telkom de los Departamentos de Informática de las universidades de Rhodes y Fort Hare en Sudáfrica. El proyecto comenzó en 2006 en la municipalidad de Mbashe, dentro de la reserva natural de Dwesa-Cwebe, en la costa este de Sudáfrica. El objetivo fundamental del proyecto es desarrollar y probar en terreno una plataforma de comunicación multifuncional distribuida que pueda ser utilizada en las zonas rurales del país.

Para cumplir este objetivo se ha creado, hasta el momento, una red inalámbrica de banda ancha que conecta las escuelas de Mpume, Ngwane, Mthokwane, Nondobo y Nqabara con tecnología WiMAX (Figura 9.1). La red se ha construido con equipos Alvarion de la BreezeMAX, con una MicroBS instalada en Ngwane y 4 CPE en el resto de puntos, siendo la distancia máxima entre ellos de 6 km. Esta red usa la banda de 3,5 GHz, que en Sudáfrica es licenciada, gracias a un acuerdo con Amatole Telecommunications, operador que tiene en propiedad la operación de esa banda en esa zona del país. La salida a Internet se realiza a través de una conexión VSAT instalada en Mpume (primera escuela conectada por el proyecto), para evitar que todos los dispositivos de red con un rol importante para su funcionamiento se ubiquen en el mismo lugar.

En cada una de las escuelas se ha instalado un laboratorio de clientes ligeros (*thin clients*) en el cual se conectan entre 5 y 20 usuarios (dependiendo del tamaño de la escuela). Aparte de dotar de acceso a Internet a estos laboratorios, la red les ofrece servicios internos como VoIP, correo electrónico y compartición de ficheros. Además, se ha creado una plataforma de comercio electrónico para que los comerciantes y hosteleros locales puedan promocionar y vender sus productos. Este último servicio entra dentro de la filosofía *Living Labs* en la que se basa el proyecto, que trata de fomentar que sean los propios usuarios los que propongan nuevos productos y servicios que se puedan ofertar aprovechando la existencia de la red. Esto se produce gracias a que los laboratorios de clientes ligeros están abiertos al público para que todo aquel que tenga curiosidad experimente a "navegar" por Internet. Entre los nuevos servicios que han propuesto los usuarios se encuentran sistemas de e-Salud que se están desarrollando dentro del proyecto Reed House.

---

<sup>5</sup><http://siyakhulal1.org/>

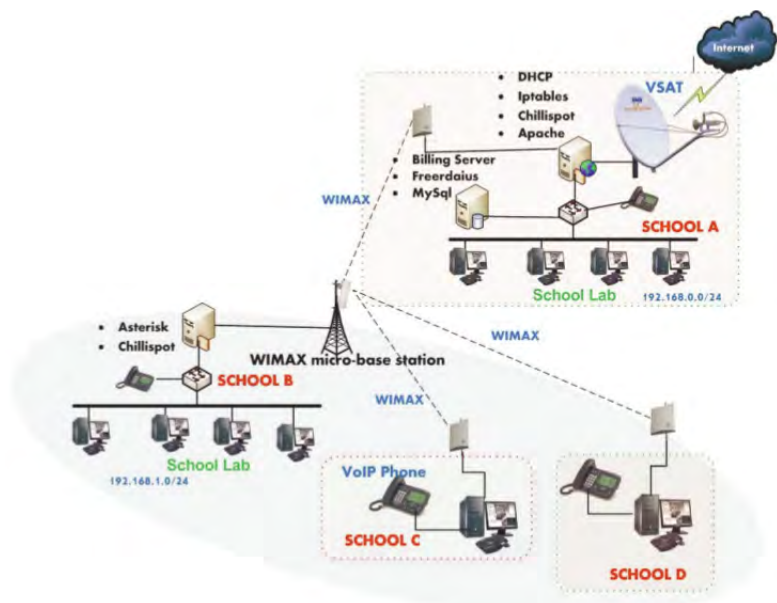


Figura 9.1.: Esquema del proyecto Siyakhula.

## 9.5. Comparativa Wi-Fi-WiMAX

Aparte de las soluciones propietarias basadas en Wi-Fi (Mikrotik, Ubiquiti, etc.), hay muchos proyectos de despliegue en zonas rurales de países en desarrollo que están aprovechando la posibilidad de usar equipos estándar Wi-Fi y adaptarlos para enlaces de largas distancias. Este hecho, unido a la existencia de una gran oferta de radios Wi-Fi de alta potencia (hasta 26 dBm) y la opción de utilizar la banda de 2,4 GHz, donde las ondas electromagnéticas se propagan mejor que en la banda de 5 GHz, conlleva a que se puedan realizar enlaces más largos con esta tecnología que con WiMAX, ante condiciones de propagación similares.

La posibilidad de usar radios de alta potencia es sólo una de las ventajas que ofrece la construcción de nodos Wi-Fi a la medida de las necesidades de la red, lo que aporta mucha más flexibilidad al despliegue de la red que las soluciones llave en mano de WiMAX. Dicha flexibilidad también permite utilizar varias tarjetas en un mismo nodo, lo que hace posible la configuración de topologías alternativas en el diseño de la red, así como instalar en los nodos otras aplicaciones, como centralitas Asterisk o paquetes para configurar mecanismos de encaminamiento avanzados, que en el caso de WiMAX requerirían la instalación de un equipo adicional.

A esto hay que añadir que la gran acogida que ha tenido Wi-Fi como tecnología para el acceso en redes inalámbricas de área local ha ocasionado una gran difusión de la tecnología y unas economías de escala que permiten encontrar dispositivos Wi-Fi casi

en cualquier país del mundo<sup>6</sup> a un coste menor que el de los dispositivos WiMAX (en torno a 300 USD). Estos dispositivos tienen un consumo similar a las estaciones cliente de WiMAX (en torno a 5 Vatios), pero muy inferior al de las estaciones base (en torno a 20 Vatios), por lo que los despliegues Wi-Fi requieren menos infraestructura eléctrica, reduciendo los costes de la instalación.

Sin embargo, este menor coste de las redes basadas en Wi-Fi se vuelve irrelevante cuando se despliegan en zonas muy aisladas, donde el transporte de los materiales y la necesidad de la construcción de torres para proporcionar línea de vista entre ambos extremos de un enlace es varios órdenes de magnitud superior al de los equipos de comunicación.

Las soluciones llave en mano de WiMAX, por su parte, ofrecen una serie de ventajas que, dependiendo del contexto, podrían rivalizar con las mencionadas para Wi-Fi. Estas soluciones, por el mero hecho de haber sido producidas en serie y específicamente diseñadas para entornos rurales, ofrecen una robustez muy superior a la proporcionada por las soluciones *ad-hoc* Wi-Fi, cuyo mantenimiento es mucho más complejo debido a la multitud de aplicaciones y componentes físicos que conforman la solución final.

A esto hay que añadir la posibilidad de proporcionar QoS estricta, que es donde reside la principal ventaja de WiMAX frente a Wi-Fi, que emplea una capa MAC estadística con acceso al medio por contienda y transmisión por ráfagas. El acceso al medio por contienda implica que ningún elemento coordina el acceso al canal, lo que puede dar lugar a colisiones entre dos o más usuarios intentando transmitir al mismo tiempo. Cuando el número de usuarios es alto las posibilidades de colisión aumentan y la capacidad de la red se reduce, haciendo que sea imposible garantizar unos determinados niveles de QoS. En cambio, en las redes 802.16 las estaciones subscriptoras sólo compiten por el medio cuando se conectan por primera vez a la red o para enviar solicitudes de ancho de banda para servicios poco prioritarios, lo que posibilita proporcionar QoS a las conexiones que tienen lugar dentro de ella. Éste es especialmente el caso en enlaces punto a multipunto (PtMP), donde las prestaciones de Wi-Fi se ven reducidas debido a las colisiones o a la existencia de nodos ocultos, y para los que WiMAX, sea utilizando OFDMA o TDMA, ha sido específicamente diseñada y ofrece sus mejores resultados.

Por lo tanto, se hace difícil decidir cuál de las dos tecnologías es mejor, y será en función de las características y los requisitos de la red que se pretenda desplegar que resultará más interesante proponer una u otra.

---

<sup>6</sup>A fecha de la redacción de este capítulo, abril de 2011, no existía en Perú un distribuidor de equipos Alvarion, el fabricante principal de equipos WiMAX en bandas no licenciadas.