

Arquitectura de las Redes de Comunicación Inalámbrica WiMAX.

La red inalámbrica de Interoperabilidad Mundial para Acceso por Microondas (*World-wide Interoperability for Microwave Access*, **WiMAX**) está diseñada con las ventajas de las redes de banda ancha fija y móvil sin la necesidad de línea-de-vista directa (*direct line-of-sight LOS*) con la estación base. La banda ancha móvil ofrece portabilidad, sistema nómada y movilidad. Que un sistema sea nómada implica la habilidad de conectarse a la red de diferentes lugares via diferentes bases; movilidad implica la habilidad de seguir con la conexión activa mientras se desplaza a cierta velocidad en un vehículo.

WiMAX está basada en el estándar de la red inalámbrica de área metropolitana (**WMAN**) desarrollado por el grupo IEEE 802.16 y adoptado por el WiMAX Forum y el ETSI (*European Telecommunications Standards Institute*) HIPERMAN (*high-performance metropolitan area network*).

El IEEE es un organismo de normalización y opera en una función puramente técnica. El estándar IEEE 802.16 sólo define la Capa 1 -Capa Física- y la Capa 2 -Capa de Acceso MAC-. También incluye definiciones y descripciones de características obligatorias y opcionales.

WiMAX Forum es una organización sin fines de lucro dedicada a promover el uso del estándar IEEE 802.16. El WiMAX Forum es responsable de la certificación de interoperabilidad de los equipos de proveedores y laboratorios de prueba que operan en todo el mundo. También define los perfiles del sistema que definen el conjunto de características de los equipos WiMAX .

A continuación veremos un poco de los antecedentes de ésta tecnología.

3.1. Antecedentes.

El grupo de la IEEE 802.16 fue formado en 1998 para desarrollar un estándar de banda ancha inalámbrica. El estándar 802.16 original fue completado en diciembre del 2001 y estaba enfocado en un sistema inalámbrico, punto-a-multipunto con línea-de-vista (*LOS*) directa con la estación base con operación en la banda de 10GHz a 66GHz. Muchos de sus conceptos eran una adaptación a inalámbrico del estándar del modem cableado DOCSIS (*data over cable service interface specification*).

Posteriormente el grupo de la IEEE produjo el estándar 802.16a, el cual fue una corrección al anterior. Incluyó aplicaciones sin-línea-de-vista (*non-line-of-sight NLOS*) en la banda de 2GHz a 11GHz, usando una capa física basada en el multiplexado con división en frecuencia ortogonal (*OFDM*). También se incluyó en la capa de acceso soporte al acceso múltiple por división de frecuencia ortogonal (*OFDMA*). Nuevas revisiones dieron como resultado un nuevo estándar en el 2004, llamado 802.16-2004, el cual reemplazó todas las versiones anteriores y formó la base para WiMAX. Esta primera versión de WiMAX era sólo para aplicaciones fijas, se le conoce como WiMAX fijo.

En diciembre del 2005, la IEEE terminó y aprobó el estándar IEEE 802.16e-2005, el cual agrega la capacidad de movilidad. El IEEE 802.16e-2005 representa la base de WiMAX para aplicaciones móviles y nómadas, se le conoce como WiMAX móvil.

Con los estándares IEEE 802.16 se tiene una variedad de opciones de diseño. Esto se debe a que los estándares fueron desarrollados para resolver varias aplicaciones y varios escenarios, por lo que ofrece una gran variedad de diseños para ser escogidos por los diseñadores de los sistemas. Por razones de interoperabilidad entre los sistemas, el alcance del estándar necesita ser reducido y así tener un menor número de diseños a escoger para implementar. El WiMAX Forum realiza esto al definir un número limitado de perfiles del sistema y perfiles de certificación.

Un *perfil del sistema* define el subconjunto de características obligatorias y opcionales de las capas física y de acceso seleccionadas por el WiMAX Forum del estándar IEEE 802.16-2004 o del IEEE 802.16e-2005. Actualmente el WiMAX Forum cuenta con 2 perfiles de sistema: uno basado en el estándar IEEE 802.16-2004, con capa física basada en OFDM, llamado perfil del sistema fijo; el otro está basado en el estándar IEEE 802.16e-2005, con capa física basada en OFDMA escalable, llamado perfil del sistema móvil. Un *perfil de certificación* se define como una creación de instancias particulares de un perfil del sistema en donde la frecuencia de operación, el ancho de banda del canal, y el modo de duplexado se especifican.[3]

3.2. Características principales de WiMAX.

WiMAX es una alternativa de red inalámbrica de banda ancha que ofrece características muy flexibles en términos de opciones de desarrollo y posibles ofertas de servicios. Algunas de las características más destacadas son:

Capa física basada en OFDM La capa física de WiMAX (*PHY*) está basada en el multiplexado con división en frecuencia ortogonal, un sistema que ofrece buena resistencia al **Multipath** y permite a WiMAX operar en condiciones de **NLOS** (*non-line-of-sight*). OFDM ahora es ampliamente reconocido como el método a elegir para la mitigación del multitrayecto de la banda ancha inalámbrica.

Picos de muy alta velocidad de transmisión de datos WiMAX es capaz de soportar picos muy altos de velocidad de transmisión de datos. De hecho el pico de velocidad de transmisión puede llegar a los **74Mbps** cuando se opere mediante un espectro amplio de 20MHz. Operando con un espectro de 10MHz con sistema **TDD** (*Time Division Duplexing*) con relación 3:1 en **downlink-to-uplink** (*velocidad de carga y descarga*), el pico de velocidad de transmisión de datos es aproximadamente 25Mbps y 6.7Mbps para la velocidad de descarga y de carga respectivamente. Estos picos son alcanzados cuando se usa una modulación 64 **QAM** con tasa de 5/6 de corrección de errores de codificación.

Ancho de banda y velocidad de transmisión de datos escalables WiMAX cuenta con una arquitectura de la capa física escalable que permite para la velocidad de transmisión escalarse fácilmente con canales de ancho de banda disponibles. Esta escalabilidad es soportada en el modo OFDMA, donde el tamaño de la FFT (*Transformada de Fourier rápida*) puede ser escalado basándose en la disponibilidad de canales de banda ancha. Por ejemplo, un sistema WiMAX móvil puede usar FFTs de 128, 512 o 1024-bit basado en si el ancho de banda del canal es 1.25MHz, 5Mhz o 10MHz respectivamente. Este escalamiento se puede hacer dinámicamente para admitir el acceso a deferentes redes que puedan tener diferentes asignaciones de ancho de banda.

Retransmisiones en la capa de enlace Para conexiones que requieran mayor confiabilidad, WiMAX admite pedidos automáticos de retransmisión (**ARQ**) en la capa de enlace. Condiciones ARQ permitidas requieren que cada paquete transmitido sea conocido por el receptor; paquetes desconocidos se asumen perdidos y son retransmitidos.

Admisión de TDD y FDD Los estándares 802.16-2004 y 802.16-2005 de la IEEE admiten tanto división de tiempo dúplex (**TDD**) como división de frecuencia dúplex (**FDD**), así como FDD unidireccional (*half-duplex FDD*). TDD es favorecido por la mayoría de las implementaciones por sus ventajas: flexibilidad en escoger los coeficientes de velocidad de transmisión de subida y bajada, capacidad para explotar la

reciprocidad del canal, capacidad de ser implementado en nonpaired spectrum y un diseño menos complejo del transmisor-receptor.

Acceso múltiple por divisor de frecuencia ortogonal (OFDMA) WiMAX móvil usa OFDM como técnica de acceso múltiple, por lo que diferentes usuarios pueden ser asignados a diferentes subconjuntos de tonos de la OFDM. OFDMA facilita la explotación de la diversidad de frecuencias y la diversidad de multiusuario para mejorar significativamente la capacidad del sistema.

Asignación flexible y dinámica de los recursos por el usuario La asignación de la velocidad de descarga y de carga están controladas por un planificador en la estación base. La capacidad es compartida entre los múltiples usuarios en base a la demanda, usando un sistema de modulado por división de tiempo (TDM). Cuando es usado el modo OFDMA-PHY, el multiplexado es realizado adicionalmente en el dominio de la frecuencia, asignando diferentes subconjuntos de subportadoras de OFDM a diferentes usuarios. Los recursos también pueden ser asignados en el dominio espacial cuando es usado el sistema avanzado de antenas (*advance antenna system, AAS*) opcional. El estándar permite que los recursos de banda ancha sean asignados en tiempo, frecuencia y espacio, y tiene un mecanismo flexible para transmitir la información de la asignación de los recursos.

Admisión de técnicas avanzadas de antenas WiMAX tiene un número de anzuelos construidos en el diseño de la capa física, que admiten el uso de técnicas de múltiples antenas, como **Beamforming**, **Multiplexado Espacial** y codificación en espacio-tiempo. Estos sistemas pueden ser usados para mejorar la capacidad del sistema y la eficiencia espectral mediante el despliegue de múltiples antenas en el transmisor y/o el receptor.

Calidad de servicio (QoS) La capa MAC de WiMAX tiene una arquitectura orientada a la conexión diseñada para admitir una variedad de aplicaciones, incluyendo voz y servicios multimedia. El sistema ofrece soporte a la velocidad de bit constante, velocidad de bit variable, flujos de tráfico en tiempo real y no en tiempo real, además de el mejor esfuerzo en tráfico de datos. WiMAX MAC está diseñado para admitir un gran número de usuarios, con múltiples conexiones por terminal, cada una con sus requerimientos de Calidad de Servicio (*Quality of Service, QoS*).

Seguridad robusta WiMAX admite cifrado robusto, usando Estándar de cifrado avanzada (AES) y tiene una privacidad robusta y protocolo de manejador de llaves. El sistema también ofrece una arquitectura muy flexible de autenticación basada en el protocolo extensible de autenticación (*EAP*), el cual permite una variedad de credenciales de usuario, incluyendo nombre de usuario/clave, certificados digitales y tarjetas inteligentes.

Admisión de movilidad La variante móvil del sistema WiMAX tiene un mecanismo que admite entregas seguras sin fisuras para aplicaciones tolerantes de retardos y

completa movilidad, como VoIP. El sistema cuenta también con soporte para mecanismos de ahorro de energía que extiende la vida de la batería de dispositivos de mano suscritos. Mejoras en la capa física, como estimaciones más frecuentes de canal, subcanalización del enlace de subida y control de potencia están especificadas en el soporte a aplicaciones móviles.

Arquitectura basada en IP El WiMAX Forum ha definido una arquitectura de red de referencia que está basada en una plataforma totalmente IP. Todos los servicios end-to-end son entregados sobre una arquitectura IP confiando en protocolos basados en IP para el transporte de servicios de extremo a extremo, Calidad de Servicio, administración de sesiones, seguridad y movilidad. La confianza en IP permite a WiMAX facilitar la convergencia con otras redes y explotar la gran variedad de aplicaciones desarrolladas para IP.

3.3. Características de los estándares.

En la siguiente tabla se enlistan las principales características de los diferentes estándares publicados en la IEEE para el estándar IEEE 802.16 o WiMAX ¹.

	802.16	802.16a	802.16e
Año de publicación	2001	2003	2005
Espectro	10 - 66 GHz	2 - 11 GHz	2 - 6 GHz
Funcionamiento	Sólo con vista directa (LOS)	Sin vista directa (NLOS)	Sin vista directa (NLOS)
Tasa de bits	32 - 134 Mb/s con canales de 28 MHz	75 Mb/s con canales de 20 MHz	15 Mb/s con canales de 5 MHz
Modulación	QPSK, 16QAM y 64QAM	OFDM con 256 subportadoras, QPSK, 16QAM y 64QAM	OFDM con 256 subportadoras, QPSK, 16QAM y 64QAM
Anchos de banda	20, 25 y 28 MHz	Seleccionables entre 1.25 y 20 MHz	Seleccionables entre 1.25 y 20 MHz
Radio de celda típico	2 - 5 km	5 - 10 km, alcance máximo 50 km	2 - 5 km

3.4. Arquitectura de las Redes WiMAX.

En la figura 3.1 se muestra el modelo de referencia de las redes WiMAX desarrollada por el WiMAX Forum, que es una representación lógica de la arquitectura de la red.

¹Todos los datos obtenidos de las referencias [4], [5] y [6]

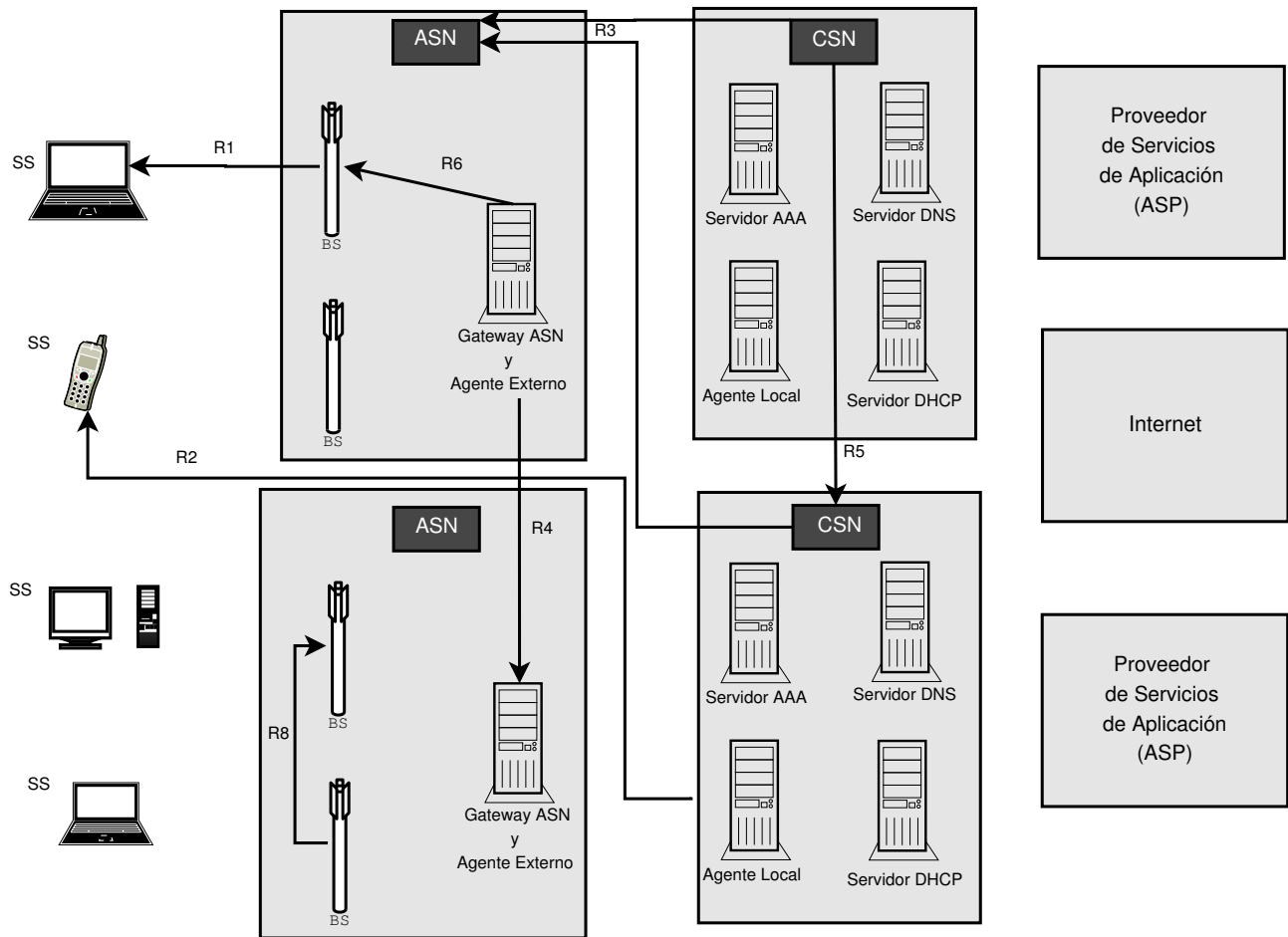


Figura 3.1: Modelo de referencia de las redes WiMAX.

La arquitectura de las redes WiMAX está basada en las redes IP, lo cual permite el uso de estándares existentes y se evita la creación de nuevos estándares.[7]

La arquitectura está compuesta principalmente por los siguientes elementos:

- Servicio de Acceso a la Red (*Access Service Network, ASN*)
 - Provee la interfaz inalámbrica que conecta la estación del suscriptor (*Suscriber Station, SS*) con la red.
 - Maneja la interfaz inalámbrica y abarca a las estaciones base (*Base Station, BS*).
 - Abarca al Gateway ASN el cual mantiene relación con la BS.
 - El Gateway ASN maneja la movilidad entre BS's.
 - La función del Agente Externo (*Foreign Agent, FA*) actúa en la autenticación y en las IP móviles.

- Servicio de Conectividad de la Red (Connectivity Service Network, CSN)
 - Provee de conectividad entre las ASN e Internet o un proveedor de servicios de aplicación (Application Service Provider, ASP).
 - El Agente Locales (*Home Agent, HA*) y el Servidor AAA (Authentication, Authorization and Accounting, AAA) proveen la autenticación.
 - El Agente Local y el DHCP proveen el manejo de las direcciones IP.
 - El servidor AAA se encarga de los registros de facturación.
 - El Agente Local apoya en la movilidad.
- Interfaces Lógicas
 - Interfaces del estándar 802.16
 - Interfaz R1 - Conexión de SS a BS.
 - Interfaces del WiMAX Forum
 - Interfaz R2 - SS a HA, provee de roaming.
 - Interfaz R3 - ASN a CSN, provee autenticación, facturación y mensajes en IP Móvil (*Mobile IP, MIP*).
 - Interfaz R4 - ASN a ASN, define procedimientos de movilidad cuando un SS cruza de un ASN a otro.
 - Interfaz R5 - CSN a CSN, provee de roaming.
 - Interfaz R6 - BS a Gateway ASN, provee de mensajes de movilidad.
 - Interfaz R7 - Interno en el Gateway ASN.
 - Interfaz R8 - BS a BS, provee de **handoff**.

3.5. La Capa Física de WiMAX.

La capa física de WiMAX (*PHY*) esta basada en el estándar IEEE 802.16 y fue diseñada con mucha influencia de Wi-Fi. Al igual que Wi-Fi, WiMAX esta basada en los principios del multiplexado con división en frecuencia ortogonal (*OFDM*), la cual es una técnica de modulación y de acceso. El estándar IEEE 802.16 define cuatro diferentes tipos de capas físicas, de las cuales dos están basadas en OFDM. Éstas dos son:

- *WirelessMAN OFDM*, capa física basada en OFDM con una FFT de 256 puntos para operaciones punto-a-multipunto en condiciones NLOS en frecuencias entre 2GHz y 11GHz. Ésta PHY ha sido aceptada por WiMAX para operaciones en sistemas fijos.
- *WirelessMAN OFDMA*, PHY basada en SOFMDA (*OFDMA escalable*) con una FFT de 128, 512, 1024 ó 2048 puntos para operaciones punto-a-multipunto en condiciones NLOS en frecuencias entre 2GHz y 11GHz. El tamaño de la FFT variable

permite el óptimo desempeño del sistema en una amplia gama de anchos de banda de canal y condiciones del radio de cobertura. Ésta PHY fue aceptada por WiMAX para los sistemas móviles o portables.

A continuación se indicarán las diferentes etapas de la capa física de WiMAX . Las primeras etapas están relacionadas a la corrección de errores posteriores (*Forward Error correction, FEC*) lo cual incluye codificación de canal (*channel encoding*), rate matching, interleaving y mapeo de símbolos (*symbol mapping*). El siguiente conjunto de etapas está relacionado con la construcción del símbolo de OFDM en el dominio de la frecuencia. Durante esta etapa, los datos son mapeados a los subcanales y subportadoras apropiados. Símbolos pilotos son insertados en subportadoras piloto, lo que permite al receptor estimar y conocer la información del estado del canal (*channel state information, CSI*). El último conjunto de funciones está relacionado a la conversión del símbolo de OFDM del dominio de la frecuencia al dominio del tiempo y eventualmente a una señal analógica que pueda ser transmitida por el aire. en la figura 3.2 se muestra un diagrama genérico de la capa física de un sistema WiMAX .

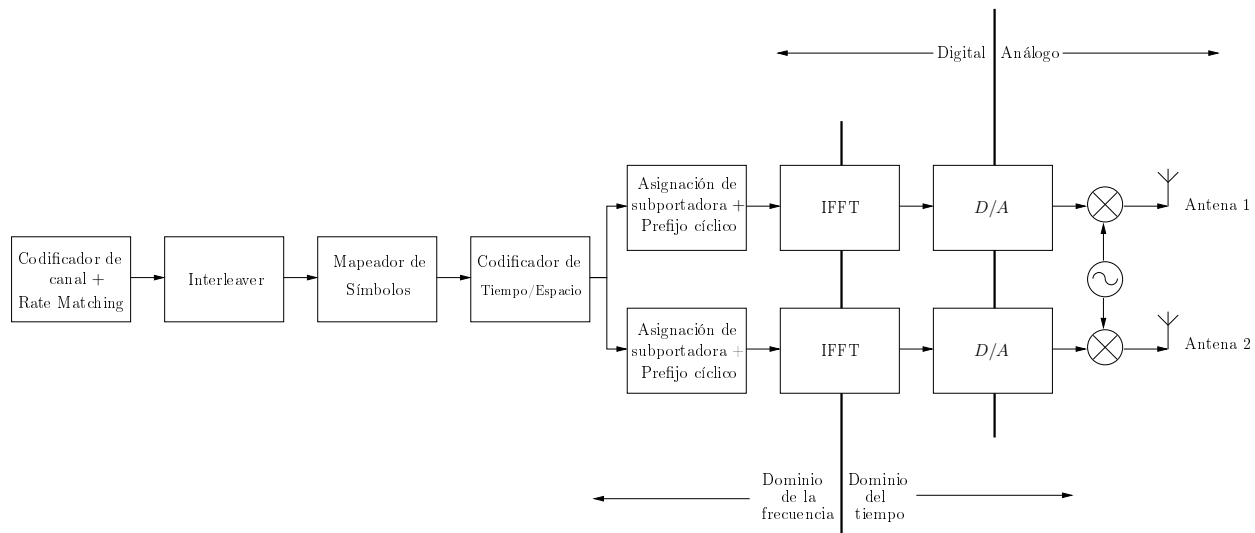


Figura 3.2: Diagrama de la Capa Física de WiMAX.

En el estándar IEEE 802.16 e-2005, la etapa de codificación de canal consiste en los siguientes pasos:

Aleatorización de datos. El propósito de esta etapa es de encriptar los datos y evitar que un receptor no autorizado decodifique los datos.

Codificación de canal. Se trata de una combinación de detección de errores y corrección de errores. Consiste en la división en un número entero de subcanales. Un subcanal

es la unidad básica de asignación de recursos en la capa física y comprende varios datos y subportadoras piloto.

Rate matching. Éste proceso se lleva a cabo para que el tamaño del bloque de datos concuerde con el establecido. Repetirá bits para incrementar la tasa o cortará los bits para disminuirla.

Híbrido Automatic Repeat Request (*HARQ*). Está diseñado para brindar corrección de errores y retransmisión de paquetes de datos a través de interfaces inalámbricas cuando el receptor lo requiera o detecte demasiados errores.

Interleaving (*intercalado*). Es el proceso mediante el cual una cadena de bits o símbolos de una Unidad de Datos de Protocolo (*Protocol Data Unit, PDU*) o de una Unidad de Datos de Servicio (*Service Data Unit, SDU*) puede ser propagada en un orden específico con bits o símbolos de otro PDU o SDU. Esta técnica es usada para reducir el efecto de errores en la transmisión.

En el interleaving los bits codificados son intercalados en un proceso de dos etapas. La primera etapa asegura que los bits adyacentes codificados son mapeados a subportadoras no adyacentes, lo que proporciona diversidad de frecuencias y mejora el rendimiento del decodificador. La segunda etapa asegura que los bits adyacentes son mapeados alternadamente a bits menos y más significativos de la constelación de la modulación.

En la siguiente etapa se realiza el mapeo de símbolos, la secuencia de bits binarios es convertida en símbolos de valores complejos. Las constelaciones de modulación definidas en el estándar son QPSK y 16QAM, con 64QAM opcional. Aunque la modulación 64QAM es opcional, la mayoría de los sistemas WiMAX prefieren implementarla, por lo menos para el downlink.

El siguiente bloque en la capa física de WiMAX es la codificación en tiempo y espacio. Existen varias opciones de codificación en espacio/tiempo, hay esquemas con dos, tres y cuatro antenas que pueden ser usados y están definidos en el estándar IEEE 802.16 e-2005. Los más comunes de implementar son los esquemas con dos antenas.

Los siguientes bloques en la capa física de WiMAX corresponden a la estructura de un sistema basado en OFDM .

3.6. OFDM.

La capa física de WiMAX está basada en el multiplexado con división en frecuencia ortogonal. OFDM es el esquema de transmisión elegido para habilitar las comunicaciones de datos a alta velocidad y multimedia. Es usado por una gran variedad de sistemas

de banda ancha comerciales, incluyendo DSL, Wi-Fi, DVB-H (*Digital Video Broadcast-Handheld*) al igual que WiMAX.

En un sistema OFDM una secuencia de símbolos a alta velocidad se divide en multiples secuencias de baja velocidad paralelas, cada una de ellas es usada para modular un tono o subportadora ortogonal. La señal de banda base transmitida, que es un ensamble de las señales en todas las subportadoras, puede ser representada como:

$$x(t) = \sum_{i=0}^{L-1} s[i] e^{-2\pi j(\Delta f + iB_c)t} \quad 0 \leq t \leq T,$$

donde $s[i]$ es el símbolo transportado en la i -ésima subportadora; B_c es separación en frecuencia entre dos subportadoras adyacentes, también es conocido como el ancho de banda de las subportadoras; Δf es la frecuencia de la primer subportadora; y T es la duración total de los símbolos utilizables. En el receptor, un símbolo enviado en una subportadora especifica es recuperado mediante la integración de la señal recibida con un complejo conjugado de la señal tono durante todo T . Si la sincronización en tiempo y frecuencia entre el transmisor y el receptor es perfecta, la ortogonalidad entre las subportadoras se mantiene en el receptor.

El concepto de modulación de forma independiente de múltiples tonos de frecuencia ortogonal con símbolos de banda estrecha es equivalente a primero construir la señal completa de OFDM en el dominio de la frecuencia y después utilizar la transformada de Fourier rápida inversa (*IFFT*) para convertir la señal al dominio del tiempo. El método de la IFFT es mas fácil de implementar, como no requiere de multiples osciladores para transmitir y recibir la señal de OFDM . En el dominio de la frecuencia, cada símbolo OFDM es creado mapeando la secuencia de símbolos en las subportadoras. WiMAX tiene tres clases de subportadoras.

1. Subportadoras de datos, son usadas para transportar símbolos de datos.
2. Subportadoras piloto, son usadas para transportar símbolos piloto. Los símbolos piloto son conocidos a priori y pueden ser usados para estimación de canal y rastreo de canal.
3. Subportadoras nulas, no tienen potencia, incluye las subportadoras de DC y las subportadoras de guarda.

Para poder crear el símbolo de OFDM en el dominio de la frecuencia, los símbolos modulados son mapeados en los subcanales que han sido asignados para la transmisión del bloque de datos. Un subcanal, como esta definido en el estándar IEEE 802.16 e-2005, es un conjunto de subportadoras. Es importante darse cuenta que en WiMAX las subportadoras que constituyen un subcanal pueden ser adyacentes entre ellas o estar distribuidas en toda la banda de frecuencia.