

Modelado de Redes WiMAX



Dr. Victor Rangel Licea
Depto. Ing. en Telecomunicaciones
Facultad de Ingeniería
Universidad Nacional Autónoma de México

Octubre de 2009

AGRADECIMIENTOS

ESTE MATERIAL FUE ELABORADO CON EL APOYO DEL PROYECTO PAPIME PE103807: INTEGRACIÓN DE NUEVAS TÉCNOLOGÍAS Y ELABORACIÓN DE MATERIAL DIDÁCTICO PAR UN LABORATORIO MULTIDISCIPLINARIO DE REDES DE LA FACULTAD DE INGENIERIA 2007-2010

SE AGRADECE EL APOYO DE LA DGAPA-UNAM POR LOS RECUROS PROPORCIONADOS PARA LA ELABORACION DE ESTE MATERIAL.

Contenido

| | | |
|-------|--|----|
| 1.1 | Antecedentes | 1 |
| 1.2 | Redes Inalámbricas de Banda Ancha | 3 |
| 1.3 | Proceso de Estandarización | 4 |
| 1.4 | Redes WiMAX | 6 |
| 1.5 | Modelado de redes | 17 |
| 2.1 | Introducción | 21 |
| 2.2 | Evolución de los Sistemas Celulares | 22 |
| 2.3 | La Primera Generación 1G | 22 |
| 2.4 | La Segunda Generación 2G | 23 |
| 2.5 | La Generación 2.5G | 25 |
| 2.6 | Redes de Tercera Generación 3G | 27 |
| 2.7 | Sistemas de Banda Ancha | 33 |
| 3.1 | Introducción | 48 |
| 3.2 | Características de la capa MAC | 50 |
| 3.3 | Algoritmo <i>Exponential Backoff</i> | 53 |
| 3.4 | Direccionamiento y tipo de conexiones | 55 |
| 3.5 | Clasificación de paquetes | 57 |
| 3.6 | Formato MAC SDU | 58 |
| 3.7 | Supresión de encabezados | 58 |
| 3.8 | Construcción y transmisión de MAC PDU | 59 |
| 3.9 | Formatos MAC PDU | 60 |
| 3.9.1 | Encabezados MAC genérico (<i>Generic MAC Header – GMH</i>) | 61 |
| 3.9.2 | Mensajes de control MAC (<i>MAC Management Messages</i>) | 67 |
| 3.10 | Concatenación | 77 |
| 3.11 | Fragmentación | 77 |
| 3.12 | Empaquetamiento | 77 |
| 3.13 | Formato del Subframe UL y DL | 78 |

| | | |
|--------|--|-----|
| 3.14 | QoS | 79 |
| 3.14.1 | Flujos de servicio | 79 |
| 3.14.2 | Modelo de objetos | 80 |
| 3.14.3 | Clases de servicio | 81 |
| 3.15 | Adquisición del canal | 84 |
| 3.15.1 | <i>Ranging</i> inicial | 85 |
| 3.15.2 | Negociación de las capacidades básicas de la SS | 86 |
| 3.15.3 | Autenticación y registro de la SS | 87 |
| 3.15.4 | Registro con la SS | 88 |
| 3.15.5 | Conectividad IP | 88 |
| 3.15.6 | Establecimiento de la hora del día | 88 |
| 3.15.7 | Transferencia de parámetros de configuración. | 89 |
| 3.15.8 | Establecimiento de conexión | 89 |
| 3.16 | Mecanismos de solicitud y asignación de ancho de banda | 90 |
| 3.16.1 | Peticiones (<i>Requests</i>) | 90 |
| 3.16.2 | Concesiones (<i>Grants</i>) | 91 |
| 3.16.3 | Consulta (<i>Polling</i>) | 91 |
| 3.16.4 | Unicast | 92 |
| 3.16.5 | <i>Piggyback</i> | 92 |
| 4.1 | Descripción de los símbolos OFDMA | 95 |
| 4.1.1 | Descripción de los símbolos OFDMA en el dominio del tiempo | 95 |
| 4.1.2 | Descripción de los símbolos OFDMA en el dominio de la frecuencia | 96 |
| 4.1.3 | <i>Slots</i> OFDMA y regiones de datos | 97 |
| | | 99 |
| | Referencias | 102 |

Introducción a las Redes Inalámbricas de Banda Ancha

1.1 Antecedentes

Actualmente el mercado de las telecomunicaciones juega un papel muy importante en el desarrollo de una nación. Cifras actuales indican que el número de usuarios con equipos fijos y móviles que tienen acceso a Internet (en su mayoría con acceso limitado), es de aproximadamente 1.46 mil millones de usuarios, con un crecimiento aproximado del 405% del 2000 al 2009, y se espera que esta cifra crezca considerablemente en los próximos años. Así mismo, el número de usuarios de teléfonos celulares GSM/UMTS en el mundo es aproximadamente de 3.4 mil millones, y se espera que supere los 4.2 mil millones en el año 2010.

Este gran crecimiento de usuarios, que requieren nuevos servicios digitales tales como: acceso a Internet rápido, transferencia de datos seguros a gran velocidad, Voz sobre el protocolo IP (VoIP), servicios multimedia, televisión Móvil, videofonía y videoconferencias entre otras aplicaciones, ha motivado a la industria de las telecomunicaciones a diseñar nuevos sistemas de comunicaciones que puedan soportar esta gama de servicios, para que todos los usuarios fijos, móviles o celulares tengan acceso a ellos desde cualquier lugar por remoto que sea, a la hora que sea y con tarifas accesibles.

Hoy en día, la forma más común de acceder el Internet es desde el hogar, (con un 65% de todos los usuarios) a través de un módem (a 56 kbps). Pero desafortunadamente, la velocidad de transmisión es muy reducida y muchas de las veces resulta en una situación muy frustrante al tener que esperar por varios minutos para poder descargar o enviar un simple archivo de datos. Tecnologías alternativas para el envío de datos y voz, entre las cuales se encuentran la serie de protocolos de las compañías telefónicas (xDSL y ISDL) y las compañías de televisión por cable (CATV), resultan muy costosas para los usuarios de un nivel socioeconómico bajo/medio. Además, estos servicios

(xDSL, ISDL, CATV) solo existen en zonas residenciales, donde las compañías tienen cobertura, o las casas se encuentran relativamente cerca de la oficina telefónica (o de la oficina CATV). Otra de las alternativas es a través de las redes de telefonía celular, pero en la actualidad estos servicios son costosos para los usuarios en general.

Para poder brindar estos servicios digitales, los estándares de telefonía celular, basados en sistemas de conmutación de circuitos como GSM [1] y CDMA [2] están siendo modificados para brindar no solamente servicios de voz, sino también servicios de transmisión de datos basados en el protocolo IP. Pero una gran desventaja de estos sistemas de telefonía celular, en particular los de la tercera generación (GPRS, EDGE, UTM y CDMA2000), es que tienen que soportar ambos sistemas de conmutación de circuitos y paquetes, lo que los hace ser una tecnología bastante costosa, debido a que los equipos de conmutación no han evolucionado como se esperaba.

Por consiguiente, un gran número de proveedores de servicios de telefonía celular a nivel mundial, no desea migrar sus equipos a la tercera generación, y por el contrario están esperando a que los sistemas basados exclusivamente en conmutación de paquetes, como los sistemas inalámbricos de banda ancha “Broadband Wireless Access - BWA”, puedan proveer de una plataforma lo suficientemente robusta como para poder soportar servicios digitales con grandes tasas de transmisión de datos, con una alta movilidad y que sean fáciles de desplegar y configurar.

Los sistemas inalámbricos de banda ancha, basados en el protocolo IEEE 802.16, (conocido mundialmente como la tecnología WiMAX (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*)), es considerado como una de las mejores alternativas para el aprovisionamiento de los servicios digitales de la cuarta generación (4G), y que pretende satisfacer la necesidad de comunicación que hoy en día se requiere. No solamente en el hogar, sino también en las escuelas, hospitales, aeropuertos, gobierno, industrias, oficinas, centros de investigación, y sobre todo cuando uno se traslada de un lugar a otro y que disponga de una gran cobertura y alta capacidad de transmisión. Sin importar la hora, el lugar, el tipo de movilidad, ni el tiempo de conexión.

1.2 Redes Inalámbricas de Banda Ancha

El término banda ancha inalámbrica (*wireless broadband*) se refiere generalmente a las altas velocidades de transmisión de datos (como mínimo, varios cientos de *kilobits* por segundo) que ocurren entre dos o más puntos fijos, dentro de una red. Ésta promete entregar una amplia gama de servicios informáticos, rápidos y rentables, a los negocios y clientes residenciales. Desafortunadamente esa promesa se brinda con resultados no muy eficaces debido a que la tecnología existente no se ha desarrollado a la perfección, para ofrecer dichos servicios. Además de los altos costos de implementación de los equipos en una red inalámbrica.

Es por eso, que las tecnologías de acceso inalámbrico de banda ancha (*Broadband Wireless Access- BWA*) suenan como las más viables para, resolver los problemas que se presentan por transmitir datos a alta velocidad, reducir las probabilidades de error por el envío de paquetes y sincronización.

Existen varias propuestas para este tipo de tecnología y entre los más notables están: el protocolo europeo ETSI BRAN (*European Telecommunications Standards Institute Broadband Radio Access Network*), el cual pretende estandarizar tecnologías que alcancen velocidades de transmisión de 25 a 54 Mbps y el protocolo propuesto por la organización IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) cuyo nombre es IEEE 802.16 (conocido comercialmente con el nombre de WiMAX). Sin embargo, éste último cuenta con un gran soporte de compañías líderes en el mercado a través del *Foro WiMAX*. Este *Foro*, en la actualidad, está formado por más de 100 empresas dedicadas a diseñar los perfiles de operación de esta tecnología.

También se dedica a estudiar, analizar y probar los desarrollos implementados, lo cual le da una considerable ventaja con respecto a su homólogo europeo. Además de ser compatible con otros estándares como ATM (*Asynchronous Transfer Mode*) e IEEE 802.11 (*Wireless Fidelity-WiFi*), provee un gran ancho de banda, con el cual se pueden alcanzar tasas para transferencia de información de hasta 134 Mbps.

1.3 Proceso de Estandarización

En 1998, el IEEE formó un grupo llamado 802.16 para desarrollar el estándar *Wireless Metropolitan Area Network* o *Wireless MAN* (WMAN). Originalmente, este grupo se centró en el desarrollo de soluciones en la banda de 10 GHz a 66 GHz, con el principal objetivo de realizar conexiones de alta velocidad a las empresas que no podrían obtener una conexión de fibra. El grupo produjo el estándar IEEE 802.16-2001 [3], aprobado en diciembre de 2001. Este estándar, conocido también como *Wireless MAN-SC*, especifica una capa física (PHY) que utiliza técnicas de modulación *single-carrier* (portadora-unitaria) y una capa MAC (*Media Access Control*) con una estructura TDM (*Time Division Multiplexing*), que soporta FDD (*Frequency Division Duplexing*) y TDD (*Time Division Duplexing*), para facilitar su interoperabilidad con otros sistemas inalámbricos y celulares.

Debido a que es muy compleja la fabricación y operación de los sistemas que operan en el rango de frecuencias superior a 11 GHz, el grupo comenzó a trabajar para extenderlo hacia las frecuencias con y sin licencia en el rango de 2 GHz a 11 GHz, que permite un funcionamiento de NLOS (*Near Line of Sight*). Este nuevo esfuerzo se convirtió en el estándar IEEE 802.16a [4], fue terminado en 2003 con los esquemas agregados de OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) como parte de la capa física, para un funcionamiento en ambientes multidireccionales o multitrayectorias. Además de la capa física OFDM, también especificó opciones adicionales en la capa MAC incluyendo soporte para OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*). Además, el estándar IEEE 802.16a soporta un nuevo protocolo en configuración malla (*Mesh*), en donde los usuarios se pueden comunicar entre ellos mismos, extendiendo así el rango de funcionamiento del protocolo.

La extensión IEEE 802.16b incrementa el espectro y tecnología que puede usarse en las bandas de frecuencia de 5 a 6 GHz y provee calidad de servicio (QoS). El proveer de calidad de servicio asegura la prioridad de transmisión para la transmisión de voz y video en tiempo real y ofrece diferentes niveles de servicio a diferentes tipos de tráfico.

En 2004, se hicieron otras revisiones al estándar 802.16a y surgió el estándar revisado, IEEE 802.16-2004 [5], que substituye al 802.16, 802.16a, 802.16c y

802.16d [6], que también se adoptó como base para HIPERMAN (*High-Performance Metropolitan Area Network*) por la organización ETSI.

La *IEEE 802.16c* representa para la banda de 10 a 66 GHz el perfil de sistema que estandariza más detalles de la tecnología. Esto asegura mayor consistencia para la implementación e interoperabilidad del sistema.

En *IEEE 802.16d* se incluyen pequeños detalles que ayudan a mejorar la extensión *802.16a*. Esta extensión también crea los perfiles del sistema para lograr que los dispositivos basados en *802.16a* sean probados.

En 2003, el grupo 802.16 comenzó el trabajo sobre revisiones a las especificaciones para permitir aplicaciones de alta movilidad en vehículos y el protocolo WiMAX Móvil fue terminado en diciembre de 2005 y publicado formalmente como el estándar *IEEE 802.16e-2005* [7]. Entre sus principales características, especifica un esquema OFDMA escalable (S-OFDMA) que soporta diferentes canales con 128, 512, 1024 y 2048 portadoras en la capa física y hace otras modificaciones a la capa MAC para soportar movilidad de alta velocidad, al incorporar procedimientos de cambio de estación base como *Soft Handoff (Cambio de estación base suave)*, el cual garantiza una calidad de Servicio (QoS) en la estación base entrante.

Las especificaciones del protocolo *IEEE 802.16* es una colección de estándares con un alcance muy grande y para acomodar las diversas necesidades de la industria, el estándar incorporó una amplia variedad de opciones. La interoperabilidad es el principal objetivo de usar la familia de estándares *802.16* y el *Foro WiMAX* es el encargado de solucionar este problema y promover las soluciones basadas en el estándar *IEEE 802.16*.

La tabla 1.1 muestra en detalle las principales características de las diferentes versiones del protocolo *802.16*, en la cual se resalta que, entre sus muchas bondades, puede ofrecer un servicio de conexión a Internet de alta velocidad (de 1 a 134 Mbps) y una capacidad de cobertura de hasta 50 km para usuarios fijos y de uno hasta 8 km para usuarios móviles, permitiendo transmitir imágenes, video, teleconferencias, servicios multimedia, datos IP, datos ATM, voz, televisión celular, televisión interactiva y muchos otros servicios, con diferentes tipos de calidad de servicio.

Tabla 1.1. Comparación de la familia de estándares de IEEE 802.16.

| | 802.16 | 802.16-2004 | 802.16e-2005 |
|-----------------------------------|---------------------------|--|---|
| Banda de frecuencia | 10GHz–66GHz | 2GHz–11GHz | 2GHz–11GHz para fijos; 2GHz–6GHz para aplicaciones móviles |
| Aplicación | Fijo, LOS | Fijo, NLOS | Fijo y Móvil, NLOS |
| Arquitectura MAC | Point-to-multipoint, mesh | Point-to-multipoint, mesh | Point-to-multipoint, mesh |
| Esquema de Transmisión | Sólo Single carrier | Single carrier, 256 OFDM o 2,048 OFDM | Single carrier, 256 OFDM o escalable OFDM con 128, 512, 1,024, or 2,048 subcarriers |
| Modulación | QPSK, 16 QAM, 64 QAM | QPSK, 16 QAM, 64 QAM | QPSK, 16 QAM, 64 QAM |
| Tasa de datos | 32Mbps–134.4Mbps | 1Mbps–75Mbps | 1Mbps–75Mbps |
| Multiplexación | Burst TDM/TDMA | Burst TDM/TDMA/OFDMA | Burst TDM/TDMA/OFDMA |
| Duplexación | TDD and FDD | TDD and FDD | TDD and FDD |
| Ancho de banda del canal | 20MHz, 25MHz, 28MHz | 1.75MHz, 3.5MHz, 7MHz, 14MHz, 1.25MHz, 5MHz, 10MHz, 15MHz, 8.75MHz | 1.75MHz, 3.5MHz, 7MHz, 14MHz, 1.25MHz, 5MHz, 10MHz, 15MHz, 8.75MHz |
| Denominación de la interfaz aérea | WirelessMAN-SC | WirelessMAN-SCa | WirelessMAN-SCa |
| | | WirelessMAN-OFDM | WirelessMAN-OFDM |
| | | WirelessMAN-OFDMA | WirelessMAN-OFDMA |
| | | WirelessHUMAN | WirelessHUMAN |

1.4 Redes WiMAX

1.4.1 Visión general de WiMAX

WiMAX es una tecnología inalámbrica basada en estándares que es capaz de proporcionar conectividad de banda ancha a hogares, empresas y usuarios móviles. WiMAX es similar a WiFi, pero puede ofrecer un ancho de banda mucho más grande, encriptación más fuerte, mayor capacidad de usuarios y mejora el rendimiento en largas distancias (por arriba de los 30 km.), gracias a la conexión con la BS que no necesariamente se encuentra en línea de vista. WiMAX emplea la tecnología OFDMA, la cual tiene una baja tasa de consumo de potencia y puede ser usada para varias aplicaciones, incluyendo

conexiones de banda ancha de “última milla”, *hotspot*¹, *backhaul*² celular y conectividad de alta velocidad para empresas de negocios, ya que soporta servicios de banda ancha tales como video y VoIP. Además, también puede ser una opción de tecnología *backhaul* para redes WiFi municipales en áreas rurales.

Como ya se mencionó, WiMAX está diseñado para operar tanto en los espectros de bandas con licencia como en los espectros de bandas sin licencia, mismos en los que opera WiFi, pero a diferencia de este último, WiMAX no requiere línea de vista para funcionar con un rendimiento óptimo, y no está limitado a una docena de usuarios por punto de acceso. WiMAX puede entregar acceso a Internet ultra rápido a varios kilómetros de distancia.

También se espera que WiMAX resuelva los problemas de conectividad rural, ya que es adecuado para lugares remotos que no tienen una infraestructura establecida de redes cableadas o líneas telefónicas. WiMAX tiene el potencial de proporcionar acceso a Internet generalizado que puede ser empleado para un crecimiento económico, mejor educación, salud, y mejorar los servicios de entretenimiento. En general, WiMAX se puede describir como la base de la evolución de la banda ancha inalámbrica, en vez de una simple implementación de tecnología inalámbrica.

Con el continuo desarrollo de la tecnología, se espera muy pronto ver la tecnología WiMAX en cámaras digitales, iPods, teléfonos móviles, computadoras y PDAs, por mencionar algunos.

1.4.2 El foro WiMAX

Como los estándares IEEE 802.16 proporcionan solamente la tecnología, es por ello que se necesitaba tener un organismo para la certificación, conformidad y verificación de la interoperabilidad de los equipos que se fabricaran por las diferentes compañías. El problema de la certificación fue muy importante, ya que muchos fabricantes decían tener productos pre-WiMAX verificados para el estándar IEEE 802.16.

El foro WiMAX fue creado en junio de 2001, con el objetivo de certificar y promover la compatibilidad e interoperabilidad de los productos

¹ Zona de cobertura WiFi.

² Conexión de baja, media o alta velocidad, para interconectar redes entre sí con diferentes tecnologías.

inalámbricos de banda ancha basados en los estándares IEEE 802.16. La meta de éste foro es acelerar la introducción de éstos sistemas dentro del mercado. El foro WiMAX certifica productos que son completamente inter-operables y soportan servicios de banda ancha fija, móvil y portátil. A lo largo de estas líneas, éste foro trabaja muy de cerca con los proveedores y reguladores de éste servicio, para garantizar que los sistemas certificados satisfagan a los clientes y los requerimientos gubernamentales.

El foro WiMAX tiene más de 522 miembros [14], entre los que se encuentran fabricantes de sistemas y semiconductores, operadores de red, instituciones académicas y otras organizaciones de telecomunicaciones. Algunos miembros del foro WiMAX son mostrados en la Tabla 1.2.

Tabla 1.2. Algunos miembros del foro WiMAX.

| Fabricantes | Proveedores de servicio |
|---|---|
| Airspan, Alcatel, Alvarion, Broadcom, Cisco, Ericsson, Fujitsu, Huawei, Intel, LG, Lucent, Motorota, Navini, Nortel, NEC, Proxim, Sagem, Samsung, Sequans, Siemens, ZTE, etc. | British Telecom, France Telecom, KT (Korea Telecom), PCCW, Sprint, Nextel, Telmex, etc. |

1.4.3 Características sobresalientes de WiMAX

WiMAX es una solución de banda ancha inalámbrica, que ofrece un amplio conjunto de características con una gran flexibilidad en términos de opciones de despliegue y oferta de servicios. Algunas de las características más importantes que merecen ser resaltadas son las siguientes:

- *Capa PHY basada en OFDM*: La capa PHY de WiMAX está basada en multiplexación por división ortogonal de frecuencias, un esquema que ofrece buena resistencia a las multitrayectorias e interferencia inter-símbolo y permite a WiMAX operar en condiciones NLOS. OFDM es ahora ampliamente reconocido como la mejor opción para mitigar la multitrayectoria en la banda ancha inalámbrica.

- *Altas tasas de datos:* WiMAX es capaz de soportar altas tasas de datos. De hecho, la tasa de datos en capa PHY puede ser tan alta como 74 Mbps, cuando se opera usando un ancho de frecuencia de 20 MHz³. Más típicamente, usando un espectro de operación de 10 MHz, un esquema TDD con una proporción 3:1 en los canales DL y UL respectivamente, la tasa de datos en capa PHY es aproximadamente 25 Mbps para el *downlink* y 6.7 Mbps para el *uplink*. Bajo muy buenas condiciones de señal, tasas más altas pueden ser conseguidas usando múltiples antenas y multiplexación espacial.

- *Soporte para ancho de banda escalable y tasas de datos:* WiMAX tiene una arquitectura de capa PHY, que permite escalar fácilmente las tasas de datos con un canal de banda ancha disponible (S-OFDMA). Esta escalabilidad es soportada en modo OFDMA, donde el número de subportadoras puede escalarse basado en la disponibilidad de un canal de banda ancha. Por ejemplo, un sistema WiMAX puede usar 128, 512, 1024 o 2048 subportadoras, ya sea que el ancho de banda del canal sea de 1.25, 5, 10 o 20 MHz respectivamente. Esta escalabilidad puede hacerse dinámicamente para soportar el desplazamiento de los usuarios a través de las diferentes redes, las cuales pueden tener diferentes asignaciones de ancho de banda.

- *Modulación y codificación adaptiva:* WiMAX soporta varios esquemas de modulación y corrección de errores (FEC), y permite que los esquemas sean cambiados por los usuarios en cada *frame*, basándose en las condiciones del canal. Éste es un mecanismo efectivo para maximizar el *throughput* en un canal variante en el tiempo. El algoritmo de adaptación típicamente es llamado para el uso de un esquema de modulación y codificación más alto, del que puede ser soportado en el receptor (debido a la relación señal a ruido y la proporción de interferencia). De tal manera que cada usuario es provisto con la más alta tasa de datos posible que puede ser soportada en sus enlaces respectivos.

- *Retransmisiones en la capa de enlace:* Para conexiones que requieren una mejor confiabilidad, WiMAX soporta solicitud automática de retransmisiones en la capa de enlace (ARQ). ARQ permite conexiones que requieren que cada

³ Los perfiles iniciales de WiMAX no incluyen soporte para 20 MHz, los 74 Mbps son combinando el *throughput* de capa PHY para el canal UL y el canal DL.

paquete transmitido sea reconocido por el receptor, los paquetes desconocidos son asumidos como paquetes perdidos y son automáticamente retransmitidos.

- *Soporte para TDD y FDD*: Los estándares IEEE 802.16-2004 y IEEE 802.16e-2005 soportan TDD y FDD, así como también *half-duplex* FDD, el cual permite la implementación de sistemas de bajo costo. TDD es favorecido por una mayoría de implementaciones, debido a que tiene como ventajas:
 - Flexibilidad para elegir proporciones de tasas de datos para los canales UL y DL.
 - Habilidad para explotar la reciprocidad del canal.
 - Habilidad para implementar un espectro disparejo y
 - Menor complejidad en el diseño del transceptor.

- *Acceso múltiple por división ortogonal de frecuencias (OFDMA)*: WiMAX móvil usa OFDMA como una técnica de múltiple acceso, donde diferentes usuarios pueden ser asignados a diferentes subconjuntos de tonos o portadoras OFDM.

- *Asignación de recursos flexible y dinámica por usuario*: La asignación de recursos en los canales UL y DL es controlada por un *scheduler* en la BS. La capacidad del sistema es compartida entre los múltiples usuarios usando un esquema TDM de ráfaga. Cuando se usa el modo OFDMA en la capa PHY, la multiplexación es hecha adicionalmente en la dimensión de la frecuencia, para asignar diferentes subconjuntos de subportadoras OFDM a diferentes usuarios. Los recursos también pueden ser asignados en el dominio espacial, usando opcionalmente un sistema avanzado de antenas.

- *Soporte para técnicas avanzadas de antenas*: Este esquema puede ser usado para mejorar la capacidad general del sistema y la eficiencia espectral, por el despliegue de múltiples antenas en el transmisor y/o en el receptor.

- *Soporte de QoS*: La capa MAC de WiMAX tiene una arquitectura orientada a conexión, que está diseñada para soportar una variedad de aplicaciones, incluyendo voz y servicios multimedia. El sistema ofrece soporte para tasas de datos constantes, variables, en tiempo real, flujos de tráfico que no son en tiempo real y adicionalmente tráfico de datos BE. La capa MAC de WiMAX está diseñada para soportar un gran número de usuarios con

múltiples conexiones por terminal, cada una con sus propios requerimientos de QoS.

- *Seguridad robusta:* WiMAX soporta una fuerte encriptación, usando un estándar de encriptación avanzada (AES). Este tiene una privacidad robusta y un protocolo de administración de claves. El sistema también ofrece una arquitectura de autenticación muy flexible, basada en el protocolo de autenticación extensible (EAP). El cual permite una variedad de credenciales de usuario, incluyendo nombres de usuario, contraseñas, certificados digitales y tarjetas inteligentes.
- *Soporte para movilidad:* La variante móvil del sistema WiMAX, tiene un mecanismo para soportar *handovers* perfectos y seguros, para aplicaciones de completa movilidad y tolerantes a retrasos, como VoIP. El sistema también tiene soporte para mecanismos de ahorro de energía, que extienden la vida de la batería o de los dispositivos suscriptores portátiles. Mejoras en la capa PHY, como una estimación del canal más frecuente, subcanalización *uplink* y control de potencia, también son especificados en el soporte para las aplicaciones móviles.
- *Arquitectura basada en IP:* El foro WiMAX ha definido recientemente una referencia de arquitectura de red, basada completamente en una plataforma IP. Todos los servicios punto a punto son entregados sobre una arquitectura IP, dependiendo de los protocolos basados en IP para el transporte punto a punto, QoS, administración de la sesión, seguridad y movilidad. Esto facilita la convergencia con otras redes y explota el rico ecosistema para el desarrollo de aplicaciones basadas en IP.

1.4.4 Aplicaciones de WiMAX

Las aplicaciones que usan una solución inalámbrica WiMAX pueden ser clasificadas como punto multi-punto, *mesh* y móviles. Las aplicaciones punto multi-punto (Figura 1.1) incluyen por ejemplo:

- Conectividad entre edificios empleando un *backhaul*.
- Banda ancha para zonas residenciales y pequeñas oficinas u oficinas en el hogar (SOHO).
- Servicios T1 simétricos para empresas de negocios.

- Servicios T1 fraccionados para pequeñas a medianas empresas (SME) y
- *Backhaul* inalámbrico para *hotspots* WiFi.

En los sistemas inteligentes de transporte (ITS), caracterizados por largas distancias y múltiples “saltos” en la comunicación, la redes *mesh* son buenas candidatas para soportar varios tipos de aplicaciones ITS, entre las que se incluyen por ejemplo, sistemas inteligentes de transporte marítimos [16].

Las aplicaciones móviles que se pueden considerar son por ejemplo:

- Conectividad para usuarios en autobuses a través de un *hotspot*.
- Conexión en automóviles, para brindar servicios de localización y mantenimiento a distancia.
- Servicios de conectividad en trenes, etc.

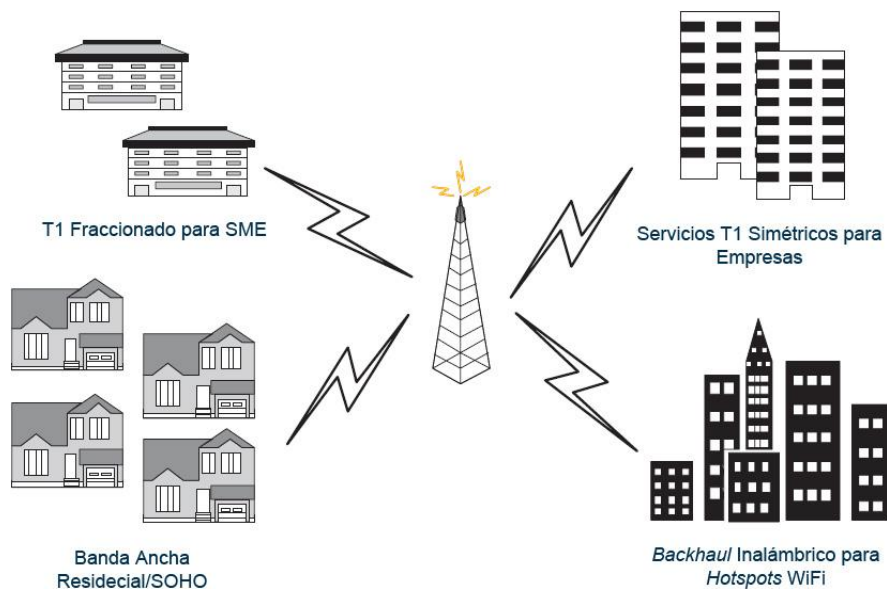


Figura 1.1 Aplicaciones WiMAX punto multi-punto.

1.4.5 Sistemas punto multi-punto (PMP)

Una de las más grandes aplicaciones de WiMAX en un futuro cercano, probablemente es el acceso de banda ancha para zonas residenciales, SOHO y mercados SME. Los servicios de banda ancha de WiMAX fijo pueden incluir acceso a Internet de alta velocidad, servicios de telefonía mediante VoIP y un sin número de otras aplicaciones basadas en Internet. La banda ancha inalámbrica fija ofrece varias ventajas sobre las tradicionales soluciones cableadas. Estas ventajas incluyen menores costos, más rápido y fácil

despliegue, reutilización, la habilidad para construir la red de acuerdo a las necesidades, menores costos de operación, administración y mantenimiento de la red.

Desde la perspectiva de un CPE (*Customer Premise Equipment*)⁴, dos tipos de modelos de despliegue pueden ser empleados para los servicios de banda ancha inalámbrica fija, en las zonas residenciales, SOHO y mercados SME. Un modelo requiere la instalación de una antena exterior del lado del cliente, el otro utiliza un radio módem con la antena incluida, que el cliente puede instalar en el interior, como una instalación tradicional de DSL o Cable Módem.

Utilizando antenas exteriores se mejora el enlace de radio, y por lo tanto el rendimiento del sistema. Éste modelo permite coberturas de área más grandes por parte de la BS. Sin embargo, una antena exterior implica costos más grandes del lado de la SS. Por otra parte, una instalación interior del lado del cliente, permitirá también un modelo de negocios que puede explotar la venta por mayoreo y distribución del canal, y ofrecer a los clientes una variedad de opciones.

Una gran oportunidad para WiMAX fijo en los mercados desarrollados, es como una solución competitiva para servicios T1/E1, servicios T1/E1 fraccionados, o servicios de mayor velocidad para el mercado empresarial. Dado que solo una pequeña fracción de los edificios comerciales a lo ancho del mundo tiene acceso a redes de fibra óptica, hay una clara necesidad para una solución alternativa de servicios de banda ancha para los clientes empresariales. En el mercado de los negocios, hay una demanda por servicios T1/E1 simétricos, que tanto DSL y Cable Módem no han podido satisfacer hasta ahora, debido principalmente a los requerimientos técnicos. Las soluciones de banda ancha fija utilizando WiMAX, pueden competir potencialmente en éste mercado y pueden ser mejores opciones sobre las soluciones de línea terrestre, en términos de comercialización, precio y abastecimiento dinámico de ancho de banda.

Otra oportunidad interesante para WiMAX en el mundo desarrollado, es el potencial que tiene para servir como conexión *backhaul* inalámbrica, en el floreciente mercado de los *hotspots* WiFi (). En los Estados Unidos y en otros mercados desarrollados, un creciente número de *hotspots* WiFi están siendo

⁴ El CPE es referido como una SS, en WiMAX fijo.

desplegados en áreas públicas, como centros de convenciones, hoteles, aeropuertos y cafeterías. Se espera que los despliegues de *hotspots* WiFi continúen creciendo en los próximos años. La mayoría de los operadores de *hotspots* WiFi, actualmente usan conexiones de banda ancha cableadas para conectar los *hotspots* a un punto de red. WiMAX puede servir como una alternativa más rápida y más barata que los *backhails* cableados. Usando las capacidades de transmisión punto multi-punto de WiMAX, para servir como un enlace *backhaul* para los *hotspots*, puede mejorar sustancialmente el negocio de los *hotspots* WiFi y proporcionar más adelante un impulso para el despliegue de los *hotspots*.

También, en aquellos países que cuentan con una buena infraestructura cableada, la banda ancha inalámbrica fija es más probable que sea usada en áreas rurales sin servicio, ya que las instalaciones de cable tradicionales son mucho más costosas. La alternativa es utilizar la banda ancha inalámbrica fija, como *backhaul* inalámbrico para *hotspots* WiFi y así poder satisfacer las necesidades de comunicación de dichas áreas.

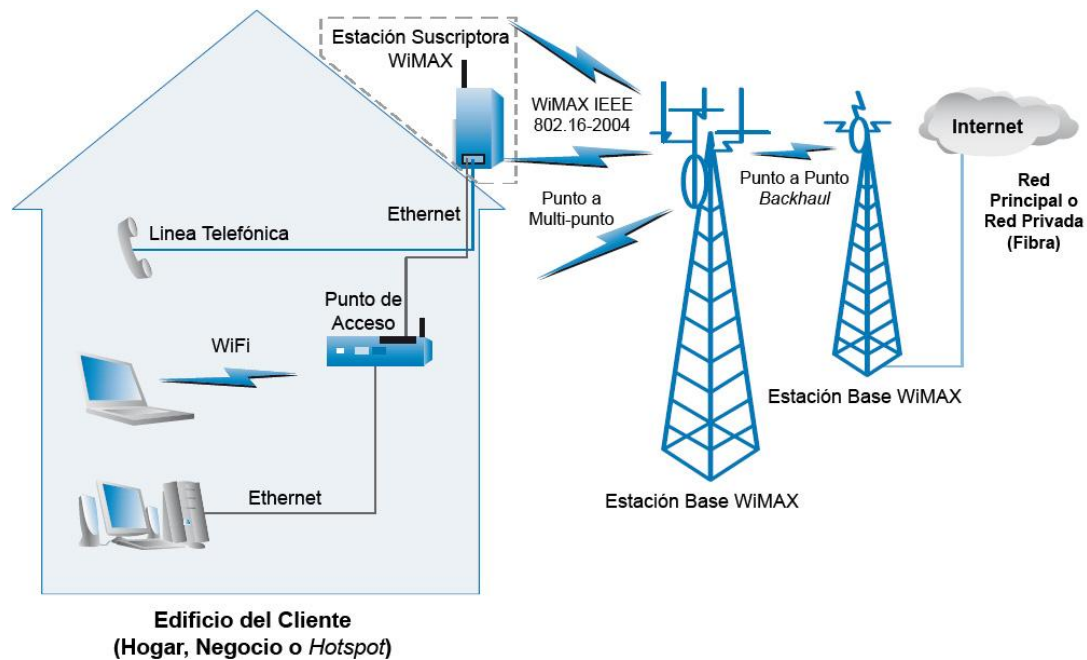


Figura 1.2. Backhaul inalámbrico WiMAX.

1.4.6 Sistemas *mesh*

Otra gran oportunidad para WiMAX fijo son las redes *mesh* (Figura 1.3). Las aplicaciones PMP son una topología centralizada, donde la BS es el centro del sistema. Por el contrario, en una red *mesh* esto no es así. Los elementos que componen una red *mesh* son llamados “nodos”, por ejemplo; una SS en una red *mesh* es un nodo.

En una red *mesh*, cada nodo puede crear su propia comunicación con otro nodo vecino de la red. Así, en una red *mesh*, cada nodo puede actuar como un ruteador simple. Esto no restringe la comunicación de las SSs solamente con la BS. De este modo, la mayor ventaja de las redes *mesh*, es que el alcance de una BS puede ser mucho mayor, dependiendo del número de “saltos” hasta la SS más distante. Esto trae la habilidad de rodear grandes obstáculos como una montaña, la cual puede bloquear una SS del alcance de una BS.

Cada nodo de una red *mesh* puede tener varios vecinos, creando múltiples rutas para la comunicación entre dos dispositivos. Es por ello que las redes *mesh* son tolerantes a fallas, es decir; si falla un nodo de la red o si una interferencia ocurre entre una comunicación, la red continúa operando. Simplemente los datos son enviados a lo largo de una ruta alterna [17]. Por otro lado, el empleo de redes *mesh* trae consigo el estudio de otro tema de investigación, el ruteo en las redes *Ad-hoc* (sin infraestructura).

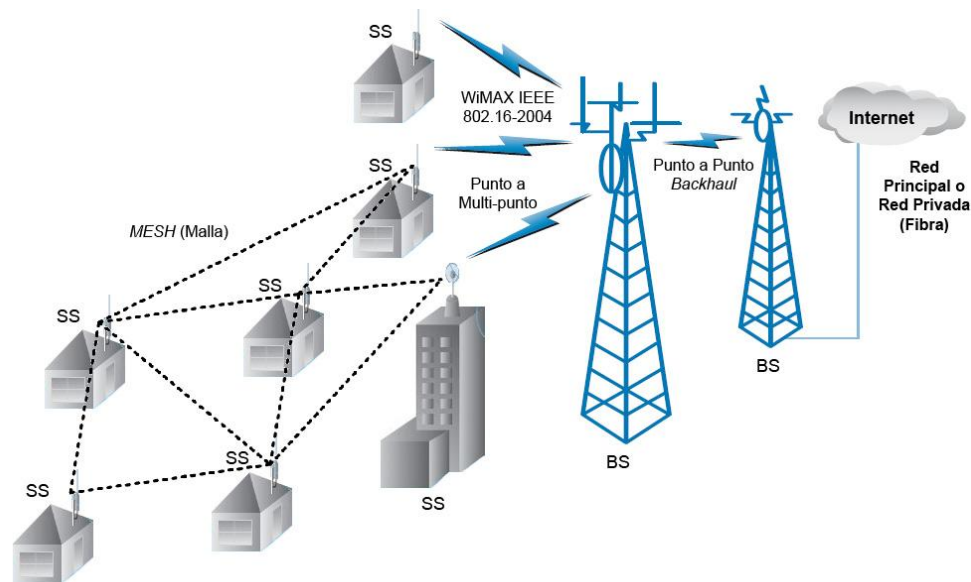


Figura 1.3 Red mesh WiMAX.

Los primeros despliegues de WiMAX fueron planeados siguiendo principalmente una topología punto multi-punto. La topología *mesh* no es parte todavía de un perfil de certificación WiMAX (septiembre de 2006) [18]. Aunque se ha reportado, que algunos fabricantes están planeando incluir características *mesh* en sus productos, incluso antes de que ésta topología esté en un perfil de certificación.

1.4.7 Sistemas móviles

Aunque los despliegues iniciales de WiMAX son probablemente para aplicaciones fijas, el potencial completo de WiMAX será realizado sólo cuando se use para innovadoras aplicaciones de banda ancha móvil, como se muestra en la Figura 1.4. Como los usuarios finales están acostumbrados a la banda ancha de alta velocidad en el hogar y en el trabajo, demandarán servicios similares en el contexto nomádico y móvil y muchos proveedores de servicio podrían usar WiMAX para satisfacer ésta demanda.

El primer paso hacia la movilidad pudiera venir simplemente agregando capacidades nomádicas a la banda ancha fija. Proveyendo servicios WiMAX a dispositivos portátiles, permitirá a los usuarios la experiencia de la banda ancha no solo en el hogar o en el trabajo, sino que también en otras ubicaciones. Los usuarios podrían llevar su conexión de banda ancha con ellos, a la vez que se mueven de una ubicación a otra.

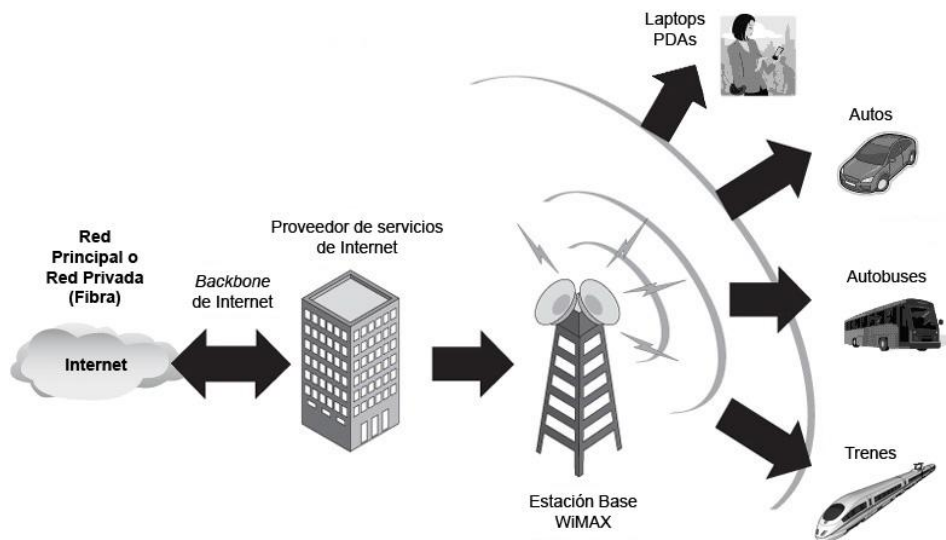


Figura 1.4. Sistemas móviles.

En muchas partes del mundo, existen empresas de telecomunicaciones con líneas fijas, que no tienen sus propios sistemas celulares y pudieran mirar hacia WiMAX para proporcionar servicios móviles. Como la industria se mueve a lo largo de una ruta para ofrecer juegos de servicios cuádruples (voz, datos, video y movilidad), algunos proveedores de servicios que no ofrecen servicios móviles a su cartera de clientes, probablemente encuentren a WiMAX como una atractiva alternativa.

Adicionalmente al acceso a Internet de alta velocidad, WiMAX móvil puede ser usado para proporcionar servicios de voz sobre IP. Nuevos y existentes operadores también están intentando usar WiMAX para ofrecer servicios personales de banda ancha diferenciados, tal como entretenimiento móvil. Los canales de ancho de banda flexibles y el soporte de múltiples niveles de QoS, permitirán que WiMAX sea usado por los proveedores de servicio, para aplicaciones de entretenimientos de banda ancha diferenciadas. Por ejemplo, WiMAX podría ser incluido dentro de los dispositivos de juegos portátiles, para ser usado en ambientes fijos y móviles por los juegos interactivos. Entre otros ejemplos se tienen, servicios de audio para reproductores MP3 y servicios de video para reproductores multimedia portátiles.

1.5 Modelado de redes

No fue hasta la evolución de las Redes de Área Local (con el desarrollo de las redes *Ethernet* y *Token Ring*) que el rendimiento de las redes de comunicaciones se convirtió en un tema de interés y de gran importancia [8]. El cuestionamiento respecto a la eficiencia sucedió debido a la necesidad de soportar aplicaciones multimedia en redes de computadoras. Esta demanda ha permitido la introducción de nuevas técnicas y protocolos que han sido diseñados para manejar tasas de datos variable y constante simultáneamente con una alta calidad de servicio.

Los requerimientos para medir el análisis de eficiencia de las redes de comunicaciones incluye principalmente:

MEAN ACCESS DELAY (Retardo promedio de acceso)

El retardo promedio entre que el paquete que está listo para ser transmitido hacia un nodo, hasta que el paquete es transmitido y recibido hacia su destino final (en este caso la estación base).

THROUGHPUT (Máxima capacidad de transmisión de datos)

La tasa de datos que son transmitidos entre los nodos. El análisis es comúnmente hecho en términos del número total de bits transferidos en la capa WiMAX MAC (kbps, Mbps o como el porcentaje de la capacidad del canal).

UTILISATION (Utilización de la red)

La fracción de la capacidad total del canal que está siendo usado, (incluyendo datos, protocolos de encabezado, peticiones de reservación, retransmisión y colisiones).

PACKET LOSS (Paquetes perdidos)

Es la tasa de pérdida de paquetes que se tiene ya sea por interferencia, o por retardos excesivos. Las aplicaciones de tiempo real, como VoIP, videoconferencia, etc., requieren una pérdida de paquetes menor al 3% para que puedan ser soportados.

Estos son los requerimientos importantes en la evaluación de una red, de acuerdo a Stallings [9]. Los resultados, para este tipo de parámetros, son generalmente mostrados como una función de la carga ofrecida (la cual es la carga actual o el tráfico demandado en la red) o como una función del número de estaciones activas transmitiendo tráfico en la red. Adicionalmente, hay algunas otras propiedades que afectan el desempeño:

- Capacidad del canal.
- Retardo de propagación.
- Número de bits por *frame*.
- Protocolo local de la red.
- Número de estaciones.

Los primeros tres factores listados arriba pueden ser vistos como parámetros que caracterizan la red y generalmente son tratados como constantes. Los protocolos locales de las redes es el punto principal en el diseño de técnicas para estudiar el comportamiento de una red y principalmente consiste en el acceso al medio y la capa física. Esta última no parece ser un factor relevante, generalmente la información de datos es transmitida con un pequeño retardo.

La capa de acceso al medio tiene un efecto significativo en el desempeño de la red y es discutido extensamente en esta tesis. Los dos últimos factores tienen que ver con el desempeño, como una función de la carga ofrecida y el número de estaciones activas. Un factor que no fue listado arriba es la tasa de error del canal. Con técnicas de corrección de errores usadas por los protocolos de comunicación. Pero en una segunda etapa se enfocará exclusivamente a analizar los problemas de las tasas de error en los canales inalámbricos.

Las técnicas iniciales utilizadas para estimar el análisis de desempeño de los protocolos de comunicaciones eran soportadas en modelos matemáticos utilizando procesos estocásticos basados en probabilidad y teoría de colas [10]. La alta complejidad envuelta en la solución para redes de colas permitió la formalización de métodos de aproximación tales como MVA (*Mean Value Analysis*) [11] [12], convolución [13] y programación lineal [14] y [15]. Dichos modelos tiene varias consideraciones, ejemplos de los cuales son tasas aleatorias de arribo de paquetes y un número definido de estaciones.

De acuerdo con [16], la consideración del arribo aleatorio es incorrecta y el tráfico en redes de computadoras es congestionado con patrones que se distinguen porque se repiten en intervalos de tiempo específico. Por lo tanto puede ser útil, las consideraciones de arribos aleatorios puede no ser totalmente acertado para el análisis de redes de computadoras [17]. Sin embargo, aún cuando el tiempo de arribo de los paquetes puede ser estimado con una precisión adecuada, la evaluación del desempeño de las redes está lejos de ser solucionado debido a los accesos híbridos de los protocolos de accesos aleatorios.

Por otro lado la simulación es otra técnica utilizada para el análisis de desempeño, el cual ha sido utilizado para el análisis de protocolos de comunicación con gran éxito durante las últimas décadas [18]. El uso de simulaciones se debe en gran parte a el gran número de redes en existencia. El diseño de simulación de paquetes se basó especialmente para los sistemas de comunicaciones, los cuales reducen el desarrollo de modelos y considerablemente el tiempo de análisis, teniendo una mejor precisión así como beneficios en incrementos continuos de procesos de poder disponibles. Con frecuencia, los modelos de simulación son diseñados para estudiar escenarios complejos en lugar de técnicas analíticas [19].

Los errores pueden ser introducidos durante las etapas de diseño y como una medida para minorizar éstos, los resultados de simulación se comparan contra los resultados obtenidos por otros métodos de evaluación de desempeño. Los métodos pueden incluir análisis matemáticos o prácticos.

Una desventaja de los casos prácticos es la validación, ya que ésta requiere un sistema existente que pueda ser medido. Arquitecturas complejas son difíciles de llevar a la práctica (ejemplo cuando se trata de predecir el desempeño de redes remotas geográficamente).

Sistemas de Comunicación Inalámbricos

2.1 Introducción

El innovador mundo de las telecomunicaciones se encuentra en uno de sus procesos más importantes de su historia, donde la tecnología más dinámica, se encuentra en el campo de las comunicaciones móviles que ha tenido grandes avances desde su introducción a inicios de los años 80s. Dentro de este campo la telefonía celular es una de las que ha tenido mayor desarrollo. A pesar que la telefonía celular fue concebida para la voz únicamente, debido a las limitaciones tecnológicas de esa época, la tecnología celular de hoy en día es capaz de brindar otro tipo de servicios tales como datos, audio y video con algunas limitaciones, pero la telefonía inalámbrica del mañana hará posible aplicaciones que requieran un mayor consumo de ancho banda.

Es por ello que los sistemas de telefonía móvil actualmente, ofrecen perspectivas de ampliación, actualización y nuevos servicios. Por otro lado el crecimiento y la demanda de acceso a altas velocidades a servicios de Internet hacen inminente el desarrollo para el acceso a servicios de banda ancha en la última milla.

En este capítulo se presentan una clasificación de los sistemas móviles en distintas generaciones dependiendo del grado de evolución técnica de los mismos para posteriormente dar paso a las redes inalámbricas de banda ancha.

2.2 Evolución de los Sistemas Celulares

Los sistemas móviles de comunicaciones han sido testigos de un crecimiento exponencial en demanda durante las últimas décadas. Esta aceptación no había sucedido en los servicios móviles de telefonía. Las aplicaciones de datos móviles fueron creadas principalmente para transportar servicios financieros y de telemática. Actualmente, las aplicaciones y servicios en Internet son los principales movilizadores de las comunicaciones móviles. Este paradigma incrementa la realización de más reglas, que hagan más accesible a las computadoras o aún más rentables para un gran número de personas.

Debido al paradigma antes mencionado, algunos centros de voz, redes de comunicación de baja tasa y sistemas han sido mejorados para proveer servicios de altas tasas de datos para servicios móviles de comunicación multimedia en este tercer milenio. ETSIs GSM no han sido la excepción y han experimentado un continuo mejoramiento en tasas bajas de circuitos de datos conmutados CSD (*Circuit-Switched Data*) a través de alta velocidad de circuitos conmutados HSCSD (*High-speed Circuit-Switched Data*) y de paquetes generales de servicio de radio GPRS (*General Packet Radio Service*) y posteriormente por el mejoramiento de tasa de datos de la evolución de GSM EDGE (*Enhanced Data rate for GSM Evolution*).

Las características fundamentales de cada una de estas generaciones, se resumen a continuación.

2.3 La Primera Generación 1G

Es la más antigua de todas, haciendo su aparición en 1979, engloba a todas aquellas tecnologías de comunicaciones móviles analógicas con capacidad para transmitir únicamente. La calidad de los enlaces de voz era muy baja (2400 *bauds*), la transferencia entre celdas era muy imprecisa, tenían baja capacidad (basadas en FDMA) y no existía seguridad.

El primer sistema desarrollado y puesto en servicio, fue basado en la normativa NMT-450 (*Nordic Mobile Telephone*) desarrollado en los países nórdicos de Europa. Posteriormente se especificó el AMPS (*Advanced Mobile Phone System*) en los Estados Unidos de América en la banda de los 800 MHz.

Más tarde surgieron toda una serie de estándares diferentes en diversos países: *NTT (Nippon Telegraph and Telephone)* en Japón, y posteriormente dos más, uno como versión del *AMPS* conocido como *TACS (Total Access Communications System)* desarrollado para Europa en la banda de los 900 MHz y otro *NMT-900* basado en su predecesor *NMT-450*.

En las redes *1G* cada estación trabaja con un rango de frecuencias, que delimita el número máximo de llamadas simultáneas que puede soportar, puesto que a cada llamada se le asigna un par de frecuencias diferentes: una para cada sentido de la comunicación. Las celdas colindantes no pueden utilizar las mismas frecuencias, para que no se produzcan interferencias. Pero las celdas que están algo más alejadas, si que podrían reutilizar estas frecuencias. Y esto, es lo que se hace. Se parte de una determinada cantidad de frecuencias disponibles. Luego, teniendo en cuenta la densidad estimada de llamadas por área, tanto el tamaño de la celda, como las frecuencias por celda y la reutilización de frecuencias son determinadas.

2.4 La Segunda Generación 2G

La segunda generación se caracterizó por ser digital, haciendo su arribo en la década de los 90s. Las limitaciones de la primera generación de telefonía móvil condujeron al desarrollo de sistemas como *GSM (Global System for Mobile Communications)*, *IS-136 TDMA* (conocido también como *TIA/EIA-136* o *ANSI-136*), *CDMA (Code Division Multiple Access)* y *PDC (Personal Digital Communications)*.

Los protocolos empleados en los sistemas de *2G* soportan velocidades de información más altas para voz pero limitados en comunicaciones de datos. Se pueden ofrecer servicios auxiliares tales como datos, fax y *SMS (Short Message Service)*.

El sistema *2G*, utiliza protocolos de codificación más sofisticados y son los sistemas de telefonía celular usados en la actualidad. La mayoría de los protocolos de *2G* ofrecen diferentes niveles de encriptación. En los Estados Unidos y otros países se les conoce como *PCS (Personal Communications Services)*.

GSM es una tecnología móvil de radio que ofrece una solución total de red inalámbrica. A pesar de que fue iniciada por ETSI ha tenido una penetración global y es ampliamente PLMN adoptada. El canal de radio GSM está especificado para velocidad máxima en la terminal de 250-300 km/h, justificando con esto un alto escalafón en la tecnología. GSM divide su espectro de frecuencia en portadoras de radio frecuencia (RF) de 200-kHz, y cada portadora es dividida en ocho slots de tiempo TDMA (en el canal de físico) de 577-µs de duración. Cada transmisión de slot tiempo de 'normal' es de ráfagas 156.25 bits (comprimiendo 3 bits en la cola, 57 bits de payload, 26 de secuencia de entrenamiento de bits alojados en un pequeño espacio (comprimido) de un bit de toggle, 57 bits de payload, 3 bits de cola seguidos por 8.25 bits de guarda en ese orden). Esto da como resultado un promedio de datos de 270.9 kbps por frame. GSM tiene tres interfaces estándar-la Um, de 16-kbps, Abis (cuello de botella en GPRS) y la ,64-kbps una interfase A (no considerada por GPRS).

Funcionalmente una red GSM está dividida en estación móvil MS (*Mobile Station*), subsistema de estación base BSS (*Base Station Subsystem*) que consiste en una base de radio transmisora y receptora BTS (*Base Transceiver Station*), la estación base controladora BSC (*Base Station Controller*), y el centro de servicio conmutado MSC (*Mobile Services Switching Center*). GSM emplea cuatro bases de datos llamadas HLR (*Home Location Register*), VLR (*Visitor Location Register*), AUC (*Authentication Center*) y EIR (*Equipment Identity Register*). Las dos categorías de canal lógico definidas en GSM son los canales de tráfico son TCH (*Traffic Channels*) y la señalización de canales. Esta última está dividida en tres subgrupos de canales de broadcast BCH (*Broadcast Channel*), control común de canal CCCH (*Common Control Channel*) y control dedicado de canal DCCH (*Dedicated Control Channel*). Cada uno de estos tres grupos posteriormente está subdividido en tres tipos de canales. En el lenguaje de GPRS estos canales están precedidos con la palabra paquete 'packet'. Ejemplo RACH (*PRACH*).

2.5 La Generación 2.5G

Aquí se incluyen todas aquellas tecnologías de comunicaciones móviles digitales que permiten una mayor capacidad de transmisión de datos y que surgieron como paso previo a las tecnologías 3G. Muchos de los proveedores de servicios de telecomunicaciones (*carriers*) se moverán a las redes 2.5G antes de entrar masivamente a 3G debido a que la tecnología 2.5G es más rápida y más económica para actualizar a 3G.

Una de estas tecnologías 2.5G es GPRS (*General Packet Radio System*), basada en la transmisión de paquetes y donde los canales de comunicación se comparten entre los distintos usuarios de forma dinámica. GPRS coexiste con GSM, compartiendo gran parte de la infraestructura desplegada en el mismo, pero ofreciendo al usuario un servicio portador más eficiente para las comunicaciones de datos, especialmente en el caso de los servicios de acceso a redes IP como Internet. La velocidad teórica máxima que puede alcanzar GPRS es de 171.2 kbps.

GPRS es una mejora del sistema GSM (*Global System Mobile Communication*) con la introducción de servicios basados en la técnica de conmutación de paquetes. Este servicio provee eficientemente un mejor uso de los recursos de radio, por medio del acomodo de recursos de datos que son impredecibles por naturaleza, tal como aplicaciones de Internet. La estandarización de las especificaciones GPRS han sido ejecutado por el ETSI (*European Telecommunications Standards Institute*), al igual que se han realizado estudios específicos para analizar el comportamiento de GPRS y con ello decidir la calidad del servicio (QoS) o medidas relativas.

Las redes inalámbricas de paquete de datos, como GPRS, son planeadas para soportar una variedad de aplicaciones particulares por diferentes características, tales como navegación (*web browsing*), transferencia de archivos, servicios de correo electrónico, etc. Diferentes aplicaciones tienen diferentes requerimientos, los cuales permiten que los usuarios que tengan diferentes percepciones de la calidad del servicio (QoS) que se ofrece por la red. Por un lado soporta dichas aplicaciones que requiere la red para satisfacer a un número de diferentes requerimientos que cumpla con las expectativas del usuario. Por otro lado, lograr un mejoramiento en la

evaluación correcta de la QoS , el análisis del comportamiento de los sistemas tiene que ser diseñado con las especificaciones de cada tipo de aplicación.

GPRS introduce un servicio de datos orientado por paquete para *GSM*. Un punto importante para la tecnología *GPRS* es hacer posible que los tomadores de las licencias *GSM* compartan los recursos físicos de la estación base del subsistema *BSS* (*Base Station Subsystem*) de manera dinámica, base flexible entre paquetes de servicios de datos y otros servicios *GSM*.

Los protocolos de nivel bajo están organizados de la siguiente manera.

La capa de control de enlace lógico *LLC* (*Logical Link Control*) es responsable de mover los datos del usuario entre las estaciones móviles *MS* (*Mobile Stations*) y la red. La capa de control de enlace de radio *RLC* (*Radio Link Control*) permite transmitir datos sobre la interfase aérea. La capa de control de acceso al medio *MAC* (*Medium Access Control*) controla la transmisión de datos en paquetes de forma orientada. La capa *RLC/MAC* asegura el acceso existente hacia los recursos del radio entre varias de las *MS*. Cada bloque de *RLC* es dividido en cuatro ráfagas (*bursts*) normales que tiene la misma estructura que una ráfaga de radio *GSM*. *GPRS* permite varios canales lógicos “*Logical channels*” para compartir el canal físico llamado *PDCH* (*Packet Data CHannel*) a través del multiplexaje por división de tiempo. *PDCHs* esta asociado con un único *slot* de tiempo de un *frame TDMA* (compuesto por 8 *slots* de tiempo).

En una célula que directamente soporta *GPRS*, un Maestro (*Master PDCH*) es alojado, para proveer el control y la señalización de información para comenzar la transferencia de datos tanto en el canal de subida y bajada y manejar la movilidad del usuario. Un *MPDCH* acomoda un canal lógico para la transmisión del canal de subida de las solicitudes del canal: los paquetes aleatorios del canal de acceso *PRACH* (*Packet Random Access Channel*). Cuando una estación móvil necesita transmitir, esta tiene que enviar una solicitud al canal hacia la red. El método de acceso, basado en el procedimiento de acceso aleatorio (*Random Access Procedure*), pueden causar colisiones entre las solicitudes por las diferentes *MSs*, por lo tanto esto puede convertirse en un cuello de botella para el sistema. Las *MSs* toman los parámetros de control de acceso (incluyendo el número de máximas retransmisiones *M* y el nivel de persistencia *P*) por medio de escuchar los paquetes de control de *broadcast* *PBCCH* (*Packet Broadcast Control CHannel*). Después de que una solicitud es

conocida, la MS espera por algún tiempo aleatorio. Si no se recibe la asignación del paquete en el canal de bajada (*Packet Down-link Assignment*) o en la cola de paquetes (*Packet Queuing*) en ese tiempo, se intentará de nuevo, si es que la MS tiene permitido realizar nuevos intentos, de otra manera una falla es notificada hacia la capa superior. Tráfico en los canales de paquetes de datos, llamados esclavos PDCH, son necesarios en una célula para transportar los datos de los usuarios y las señales de transmisión como una aceptación o no del mensaje. En lo concerniente a la transferencia de datos, los canales de subida y bajada su alojamiento es completamente independiente y una MS puede operar la transferencia de datos en el canal de subida o bajada simultáneamente.

2.6 Redes de Tercera Generación 3G

Las tecnologías denominadas de tercera generación (comúnmente llamadas 3G) son un conjunto de nuevos procedimientos de comunicación, estándares y dispositivos que mejorarán la calidad y velocidad de los servicios actualmente disponibles en teléfonos móviles.

Las terminales 3G combinarán la funcionalidad de un teléfono móvil con la de un PDA y una PC con conexión de banda ancha a Internet. Mientras que las redes de comunicación, según la ITU (*International Telecommunications Union*), permitirán a los dispositivos preparados para ello transmitir y recibir datos a una velocidad superior a los 144 kbps (en la práctica la tecnología está permitiendo velocidades cercanas a los 384 kbps, muy por encima de los 14.4 kbps de GSM o 53.6 kbps de GPRS). En la Figura 2.1 se observa las velocidades teóricas de diversos protocolos disponibles así como la evolución de estos.

Algunas de las funcionalidades más interesantes de la tecnología 3G, aparte de mejorar la calidad de las transmisiones de voz, están las capacidades de comunicación instantánea (fax, *e-mail*, transmisión de grandes archivos, de imágenes, etc.), conexión a Internet con banda ancha (BWA), videoconferencia, multimodalidad, capacidades de procesamiento que permitan ejecutar complejas aplicaciones en el teléfono como si fuera un PDA, funcionalidades de GPS, sistemas de pago, sistemas de identificación, comunicación con radiofrecuencia, infrarrojos, transmisión por conmutación de paquetes mejor que punto a punto (siempre *online*), *roaming* global, etc.

Hay que tener en cuenta que, aunque 3G hace referencia principalmente a la disposición de más ancho de banda para transmitir datos y voz a través de dispositivos móviles, el desarrollo de estas redes coincidirá con el aumento de las capacidades de procesamiento, memoria y contenidos multimedia de los terminales, lo que conllevará la aparición de paquetes más atractivos a la hora de diseñar nuevos usos en el mundo de la movilidad.

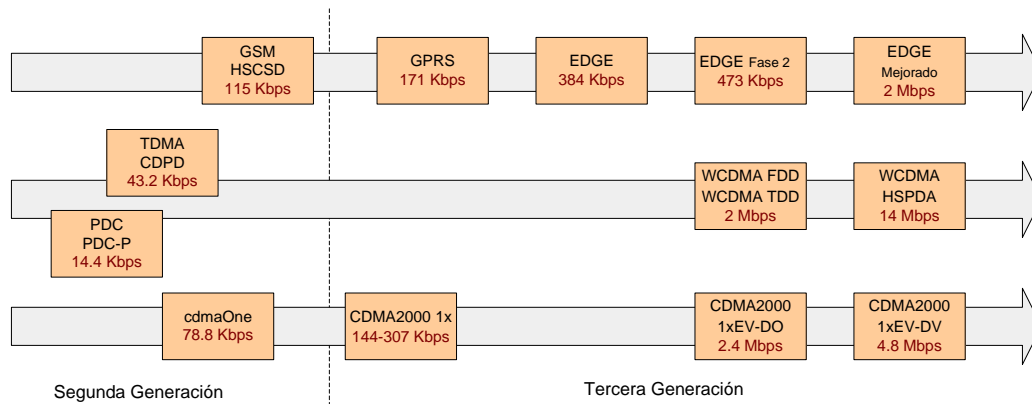


Figura 2.1. Visión de la evolución de los distintos protocolos disponibles, con sus velocidades máximas teóricas.

La ITU ha aprobado como estándares oficiales de 3G una serie de sistemas, surgidos de la colaboración entre distintas compañías, agrupados bajo el nombre genérico IMT2000 (*International Mobile Telecommunication 2000*), incluyendo cinco tecnologías de radio-transmisión las cuales se muestran en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1 Tecnologías de Radio-transmisión.

| Tecnologías de radio-transmisión de IMT2000 |
|--|
| IMT-DS (<i>Direct Spread</i>) referido a ULTRA-FDD, W-CDMA, UMTS-FDD |
| IMT-MC (<i>multi-Carrier</i>) referido a CDMA2000 |
| IMT-TC (<i>Time Code</i>) referido a ULTRA-TDD Y TD-SCDMA |
| IMT-SC (<i>Single Carrier</i>) referido a UWC-136 EDGE |
| IMT-FT (<i>Frequency Time</i>) referido a DECT |

De estos cinco estándares se han popularizado básicamente tres tecnologías: EDGE, CDMA2000 (*Code Division Multiple Access*) y WCDMA (*Wideband Code Division Multiple Access*).

2.6.1 EDGE

EDGE (Enhanced Data Rates for Global Evolution) es una tecnología de radio con red móvil que permite que las redes actuales de GSM ofrezcan servicios de 3G dentro de las frecuencias existentes. Como resultado evolutivo de GSM/GPRS, *EDGE* es una mejora a las redes GPRS y GSM. GPRS es una tecnología portadora de datos que *EDGE* refuerza con una mejora de la interfaz de radio, y proporciona velocidades de datos tres veces mayores que las de GPRS. Añadir *EDGE* a la red de GPRS significa aprovechar en toda su extensión las redes de GSM.

EDGE puede aumentar el rendimiento de la capacidad y producción de datos típicamente al triple o cuádruplo de GPRS, proporcionando así un servicio de 3G espectralmente eficiente. En particular, *EDGE* permitirá que se exploren todas las ventajas de GSM/GPRS, con el establecimiento de una rápida conexión, mayor amplitud de banda y velocidades en la transmisión de datos medios de 80-130 kbps y tan rápidas como 473 kbps.

Al ser una tecnología de radio de banda angosta (canales de 200 kHz), *EDGE* permite que los operadores de telecomunicaciones, ofrezcan servicios de 3G sin la necesidad de comprar una licencia 3G. Al desarrollar la infraestructura inalámbrica ya existente, *EDGE* permite que los proveedores de servicios (*carriers*) brinden al mercado servicios de 3G en un lanzamiento rápido. En la mayoría de los casos sólo se necesitan cambios secundarios para pasar de GPRS a *EDGE*. Además, *EDGE* reduce el costo al implementar sistemas de 3G a nivel nacional porque está diseñada para integrarse a una red de GSM ya existente. Así, *EDGE* representa una solución fácil, incremental del coste que sea una de las rutas más rápidas a desplegar los servicios de 3G.

La tecnología *EDGE* tiene grandes ventajas entre las que destacan:

- Ofrece a los *carriers* un servicio de 3G económico y espectralmente eficiente.
- Es una solución 3G diseñada específicamente para integrarse al espectro existente, permitiendo así a que los *carriers* ofrezcan nuevos servicios de 3G con licencias de frecuencia existente al desarrollar la infraestructura inalámbrica actual.

- Ofrece servicios de Internet Móvil con una velocidad en la transmisión de datos a tres veces superior a la de *GPRS*.
- Esta diseñada para integrarse a la red de *GSM* ya existente, lo que reducirá el costo cuando se implementen sistemas de 3G a nivel nacional; al desarrollar la infraestructura existente, se acorta el tiempo de comercialización con un lanzamiento rápido y fácil.
- *EDGE* será importante para los operarios con redes de *GSM* o *GPRS* que se desarrollarán en *WCDMA*; mejorar la infraestructura de *GSM* con *EDGE* es una manera eficiente de lograr una cobertura de 3G complementaria en la red consistente al volver a emplear lo invertido en la tecnología de 2G.

2.6.2 CDMA2000

CDMA2000 parte del legado de la tecnología *CDMAONE* para ofrecer servicios de datos eficientes y de gran capacidad de voz en una cantidad mínima de espectro. Permite mayores velocidades de datos de usuario y un uso más eficiente del espectro de radio que las técnicas de radio actuales.

CDMA 2000 es una tecnología de interfaz de radio compatible con el estándar *IMT-2000* y ofrece una evolución simple y eficaz en función de costos hacia 3G para operadores internacionales que operan actualmente redes *cdmaOne*, *CDMA2000* ofrece mejoras en la calidad y capacidad de voz respecto a *cdmaOne*, junto con servicios de datos multimedia de alta velocidad.

La norma *CDMA 2000* está dividida en fases para permitir la pronta instalación de la nueva tecnología. Este enfoque permite a los operadores introducir más capacidad para servicios de voz junto con incrementos en la velocidad de los datos en intervalos que coinciden con la demanda emergente del mercado.

La primera fase de *CDMA2000* o *CDMA2000 1X* entregará transmisión de datos a 144 kbps. La fase dos, llamada *CDMA2000 1xEV* proveerá transmisiones mayores a los 2 Mbps.

2.6.3 CDMA2000 1X

El estándar IS-2000 (CDMA2000 1X) fue publicado por la TIA (Telecommunications Industry Association). 1X ofrece aproximadamente el doble de capacidad para voz que *cdmaOne*. Las transmisiones de datos promedio son de 144 kbps. CDMA2000 1X se refiere a la implementación de CDMA2000 dentro del espectro existente para las portadoras de 1.25MHz de *cdmaOne*. Esto se muestra en la Figura 2.2. El termino técnico se deriva de N = 1 (es decir, el uso de la misma portadora de 1.25MHz de *cdmaOne*) y el 1X significa una vez 1.25MHz.

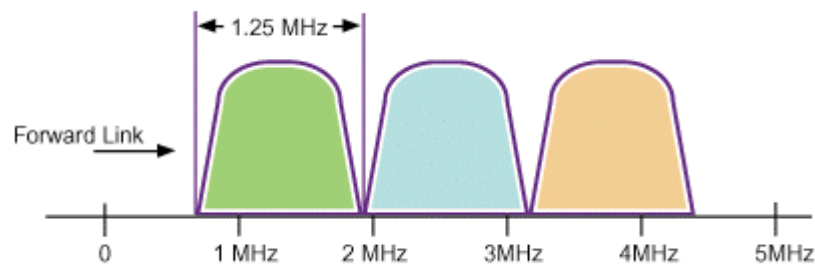


Figura 2.2. CDMA2000 1X puede ser implementado en un espectro existente o en un nuevo espectro designado.

2.6.4 CDMA2000 1Xev

La evolución de CDMA2000 después de 1X es llamado CDMA2000 1xEV. Esta versión está dividida en dos categorías: *1xEV-DO* (1X Evolution Data Only) y *1xEV-DV* (1X Evolution Data and Voice). La primera mejora el volumen de transmisión de datos y alcanza velocidades pico de 2.4 Mbps sin requerir más de 1.5 MHz de ancho de banda. Esta fase está optimizada para lograr un enfoque eficiente que reúne los mejores esfuerzos para la entrega de datos. Mientras tanto, *1xEV-DV*, se centra en las capacidades de voz y datos en tiempo real y en los aumentos de rendimiento para lograr eficiencia tanto de voz como de datos.

2.6.5 WCDMA

WCDMA es la tecnología de interfaz de aire en la que se basa la UMTS (*Universal Mobile Telecommunications Service*), el cual es un estándar europeo 3G para los sistemas inalámbricos. Se trata de una tecnología pensada para ofrecer elevados anchos de banda de voz y datos, alcanzando velocidades de hasta 2 Mbps, adecuados para aplicaciones tales como videoconferencia. Esta tecnología, constituye una buena elección cuando se piensa a medio-largo plazo, ya que ofrece mayores posibilidades aunque también es más compleja.

La razón de que la especificación WCDMA sea algo más compleja y menos eficiente de lo que debería puede estar en la participación de multitud de agentes tecnológicos diferentes en su desarrollo, principalmente fabricantes de equipos, lo que obliga a adoptar numerosas soluciones de compromiso en su implementación.

La tecnología WCDMA está altamente optimizada para comunicaciones de alta calidad de voz y comunicaciones multimedia, como pueden ser las videoconferencias. También es posible acceder a diferentes servicios en una sola terminal, por ejemplo, podemos estar realizando una videoconferencia y al mismo tiempo estar haciendo una descarga de archivos muy grande, etc.

2.6.6 UMTS HSPDA

UMTS (*Universal Mobile Telecommunications Service*) es una tecnología de voz y datos a alta velocidad que integra la familia de normas inalámbricas de tercera generación. La tecnología radial utilizada en UMTS es la WCDMA (*Wideband Code Division Multiple Access*), que entrega velocidades de datos pico de hasta 2 Mbps. UMTS utiliza una combinación de las tecnologías Acceso Múltiple por División de Código y Acceso Múltiple por División de Tiempo para hacer un uso altamente eficiente del espectro.

El HSDPA (*High Speed Downlink Packet Access*) es la primera evolución 3G, del UMTS/WCDMA. Una tecnología de transmisión, que puede dar una velocidad pico teórica de hasta 14 Mbps y soportar tasas de *throughput* promedio cercanas a 1 Mbps.

HSDPA lleva a *WCDMA* a su máximo potencial en la prestación de servicios de banda ancha, y la capacidad de datos celulares definida con *throughput* más elevado. De la misma manera en que *EDGE* incrementa la eficiencia espectral en comparación con *GPRS*, *HSDPA* incrementa la eficiencia espectral en un factor de hasta 3.5 veces en comparación con *WCDMA*.

La eficiencia espectral y las velocidades aumentadas no sólo habilitan nuevas clases de aplicaciones, sino que además dan soporte para que la red sea accedida por un mayor número de usuarios. *HSDPA* alcanza sus elevadas velocidades mediante las mismas técnicas que amplifican el rendimiento de *EDGE* superando a *GPRS*. Estas incluyen el agregado de modulación de mayor orden (Modulación de Amplitud en Cuadratura 16-QAM), codificación variable de errores, y redundancia incremental, así como el agregado de nuevas y potentes técnicas tales como programación rápida. Además, *HSDPA* emplea un eficiente mecanismo de programación para determinar qué usuario obtendrá recursos. Finalmente, *HSDPA* comparte sus canales de alta velocidad entre los usuarios del mismo dominio de tiempo, lo que representa el enfoque más eficiente.

2.7 Sistemas de Banda Ancha

El rápido crecimiento y la demanda para el acceso a altas velocidades a los servicios *web*, Internet y voz multilínea para usuarios residenciales así como para pequeños negocios han creado una demanda para acceso de banda ancha en la última milla. Típicamente la tasa máxima de datos de un acceso de banda ancha compartido para usuarios residenciales y *SOHO* (*Small Office/Home Office*) son alrededor de 5-10 Mbps en el canal de bajada y 0.5-2 Mbps en el canal de subida. Esta asimetría ocurre por la naturaleza del tráfico *web* y su dominio. Voz y videoconferencias presenta un tráfico simétrico. Mientras la evolución de los servicios de Internet y el tráfico resultante es difícil de predecir, la demanda de las tasas de datos y la calidad de los servicios en la última milla se incrementarán dramáticamente en un futuro cercano.

Actualmente el acceso de banda ancha es ofrecido a través de líneas digitales suscriptoras *xDSL* (*Digital Subscriber Line*), por cable y acceso inalámbrico de banda ancha *BWA* (*Broadband Wireless Access*). Cada una de estas técnicas tiene

diferentes costos, desempeño y balance efectivo. Mientras que el servicio de cable y *DLS* están siendo efectivas en gran escala, *BWA* está emergiendo como una tecnología con varias ventajas. Estas incluyen la evasión de los límites de distancias de *DSL* y altos costos de cableado, rápida ejecución, alta escalabilidad, bajo mantenimiento y costos de actualizaciones e inversiones granulares para ser compatibles con el crecimiento del mercado. Pero por otro lado, se tiene un número de problemas importantes que incluye la eficiencia del espectro, escalabilidad de la red, instalación propia de la antena del usuario *CPE* (*Customer Premises Equipment*), y operación confiable sin la línea de vista *NLOS* (*Non-Line-Of-Sight*) debe ser resuelta antes de que *BWA* pueda penetrar en el mercado exitosamente.

Servicios inalámbricos en la banda de 24-48 GHz tal como los Servicios Locales de Distribución Multipunto *LMDS* (*Local Multipoint Distribution Services*) son apropiados solo para grandes oficinas corporativas donde enlaces directos y líneas de vista *LOS* (*Line-of-Sight*) pueden ser establecidos. Por otro lado los servicios sub-3 GHz como son *MDS* (*Multipoint Distribution Services*), *MMDS* (*Multichannel Multipoint Distribution Services*) y *WCS* (*Wireless Communications Services*) y bandas sin licencia donde la penetración del follaje y la operación *NLOS* son necesarios para alcanzar a los usuarios caseros.

2.7.1 Panorama de las Redes de Banda Ancha

Con la introducción de los ruteadores *multi-gigabit* y líneas de transmisión óptica, esencialmente las redes se han convertido en redes de alta velocidad que pueden ofrecer una gran variedad de servicios a los usuarios. El cuello de botella que se presenta en la velocidad es en el ingreso a red que conecta al usuario final con el extremo hacia la red central, típicamente con la oficina central más cercana ó el multiplexor. El más conocido medio físico de ingreso a red es el cobre de par cruzado, el cual es utilizado virtualmente para todas las casas y negocios. Estos cables tradicionalmente son utilizados para la transmitir servicios de voz y comunicación de datos a baja velocidad utilizando *modems*. Actualmente, estos cables son utilizados para servicios de abonado de líneas digitales *DSL* (*Digital Subscriber Line*) el cual cuenta con dos modalidades. *HDSL* (*High-speed DSL*) este utiliza dos o tres pares de cables cruzados ofreciendo simetría a 2 Mbps en servicios de datos, mientras que para el servicio más reciente llamado *ADSL* (*Asymmetric DSL*) esta tecnología

ofrece de 6-8 Mbps en promedio en el canal de bajada y varios cientos de kbps para el canal de subida. Similarmente, el cable coaxial para las redes de cable fueron tradicionalmente usadas para servicios de televisión *broadcast*, y que han recientemente evolucionado para redes bidireccionales que ofrecen altas velocidades en datos y telefonía hacia los abonados, a este sistema se le conoce como la tecnología CableModem usando el Sistema de Televisión por Cable (CATV) [20].

El surgimiento de accesos inalámbricos de banda ancha es muy reciente, debido a las recientes desregulaciones y a las exigencias del mercado mundial de las telecomunicaciones. Las redes de acceso inalámbrico son muy atractivas para los nuevos operadores debido a la no existencia de una infraestructura de una red cableada, una gran ventaja es la rápida implementación y la baja inversión inicial. Esta es una característica muy atractiva con respecto a las redes cableadas en donde la mayor inversión necesita ser realizada durante la fase de implementación.

Más frecuencias para acceso inalámbrico de banda ancha están disponibles y son ondas milimétricas de frecuencias de entre 20 y 45 GHz. Bandas dedicadas de frecuencia para este tipo de aplicaciones están siendo recientemente disponibles en Europa, Norte América, Asia y otras regiones. Después de un extenso período de intentos, el acceso a sistemas inalámbricos opera en frecuencias de ondas milimétricas que están actualmente en fase inicial de introducción por debajo del desarrollo masivo comercial.

Estas redes de radio celular las cuales son comúnmente referidas como redes *LMDS (Local Multipoint Distribution Service)*, estas redes son implementadas para ofrecer servicios integrados de banda ancha para usuarios residenciales de negocios. Las redes *LMDS* son particularmente para satisfacer las necesidades de áreas urbanas y suburbanas con una alta densidad de usuarios, esto es debido a la capacidad de la célula que típicamente soporta una tasa promedio de datos *STM-1* de (155 Mbps) y la célula cubre un radio de 2 a 5 Km.

Aun cuando los rangos de frecuencias de ondas milimétricas son menores, hay algunas bandas de frecuencias disponibles debajo de los 11 GHz. Estas incluyen los servicios de banda *MMDS (Multichannel Multipoint Distribution Services)* en los Estados Unidos, los 3.5 GHz en Europa, y los 10 GHz en un número de países. Por debajo de los 11 GHz, hay algunas bandas de frecuencia que no tienen licencia, como 5.8 y 2.4 GHz.

2.7.2 Arquitectura de las Redes de Banda Ancha

Un sistema BWA está compuesto por al menos una estación base BS (*Base Station*) y una o más estaciones suscriptoras SS's (*Suscriber Stations*). La BS y las SS's conforman la interfaz aérea del sistema ODU (*Outdoor Unit*), en donde se incluye los transmisores, receptores y antenas. Por otro lado, se encuentra la interfaz alámbrica IDU (*Indoor Unit*) que es la interfaz que permite el acceso hacia y desde las redes *backbone* de datos y PSTN. Las dos interfaces se interconectan a una frecuencia intermedia. Esto se puede ver en la Figura 2.3.

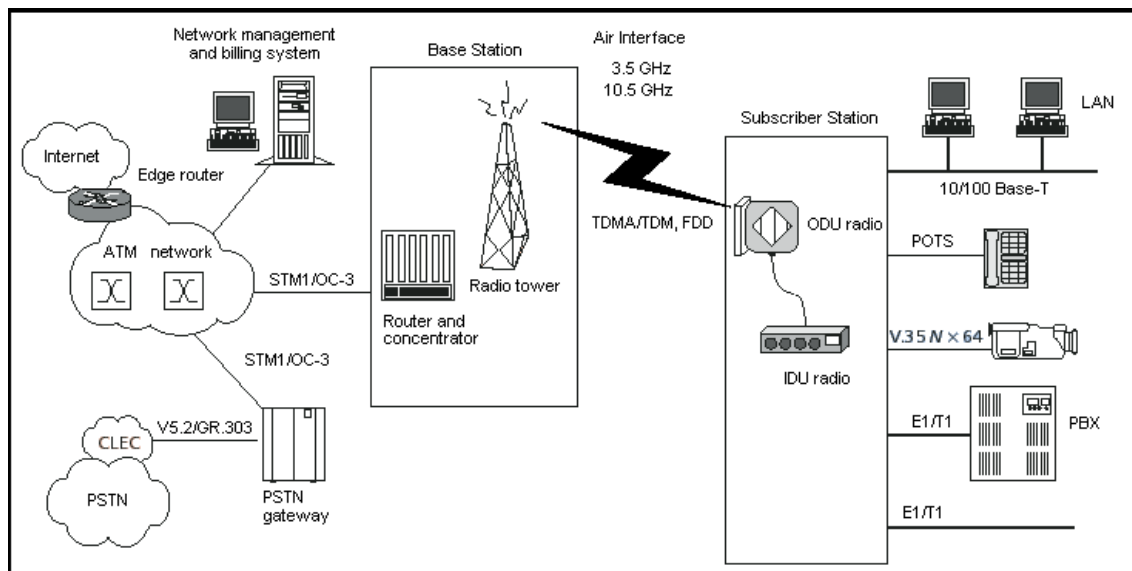


Figura 2.3. Arquitectura BWA.

La BS le asigna un canal de radio a cada una de las SS's de acuerdo a las políticas de control de acceso al medio (MAC). Todos los sistemas BWA constan de tres subsistemas, los cuales se citan a continuación:

Sistema de Radiofrecuencia: Es la parte inalámbrica de alta capacidad que permite la transmisión y recepción de las señales con cada SS. En la estación base, los módulos de transmisión y recepción están conectados en un lado con el equipo de acceso de datos de la BS y por otro lado con una antena cuyas características dependen de los requisitos del sistema. Por otro lado, las estaciones remotas un módulo transmisor-receptor recibe la señal de bajada de

la BS y la pasa al módem de cada SS. Asimismo, recibe el tráfico de la SS y lo trasmite hacia la BS.

Sistema de Acceso: Representa la interfaz de comunicación entre la SS y la BS, es el responsable de la estructuración y manejo del tráfico de señal de bajada o de subida con dirección al sistema de radiofrecuencia. En una red BWA, las SS's comparten en el tiempo los canales de subida *UL (Up Link)* y de bajada *DL (Down Link)*. En el enlace de subida, el canal es usualmente ranurado permitiendo así el acceso al canal mediante la técnica *TDMA*, mientras que en el canal de bajada se emplea el esquema *TDM*. Cada SS puede entregar voz y datos utilizando interfaces comunes, por ejemplo, *Ethernet, E1/T1*, etc.

Interfaz de red en la BS: Representa la conexión entre el proveedor de servicios y la red *IP*, las principales aplicaciones que se usan con el sistema de acceso a Internet, acceso a alta velocidad a servicios multimedia, además del acceso a la *PSTN* para aplicaciones *VoIP*. En el lado de la SS, es la red de conexión con el sistema inalámbrico.

A continuación se presenta los estándares más utilizados para las redes de banda ancha (*BWA*).

2.7.3 Redes Inalámbricas IEEE 802.11

WiFi (Wireless Fidelity) es el nombre popular del estándar *IEEE 802.11* para redes inalámbricas de área local (*WLAN*) que operan utilizando espectro sin licencia en la banda de 2.4 Ghz. La generación actual de *WLAN* soporta velocidades para datos que pueden llegar hasta 54 Mbps, sin embargo esta tasa de transmisión de datos tan alta solamente es posible en un rango de cobertura por debajo de los 100m.

Este protocolo no sólo se queda en el terreno de la transmisión de datos, sino que ha abierto la posibilidad de ofrecer servicios de voz gracias al protocolo Internet o voz sobre *IP*. Sin embargo, su principal reto es la penetración en las ciudades o en cualquier lugar en donde una persona realice una llamada mediante una red inalámbrica y que no esté condicionada a permanecer en un campus universitario, en un aeropuerto, en una oficina, etc.

2.7.3.1 Breve historia de IEEE 802.11

La aparición repentina de 802.11 se llevó a cabo como resultado de una decisión tomada en 1985 por la Comisión Federal de Comunicaciones FCC (*Federal Communications Commission*) de liberar varias bandas del espectro inalámbrico para la utilización sin licencia del gobierno. También llamadas bandas basura (*garbage bands*) donde actualmente se encuentran alojados los equipos tales como hornos de microondas. Para operar en estas bandas, los dispositivos requieren el uso de la tecnología *spread spectrum*. Esta tecnología esparce una señal de radio hacia un rango amplio de frecuencias, haciendo que la señal sea menos susceptible a la interferencia y difícil de interceptar.

En 1990, un nuevo comité IEEE llamado 802.11 fue establecido para buscar el comienzo de un estándar. Sin embargo, no fue hasta 1997, que este nuevo estándar fue publicado (aunque dispositivos con pre-estándar se encontraban ya en el mercado).

Dos variantes fueron ratificadas en los dos siguientes años 802.11b el cual opera en la banda de la Industria Médica y Científica ISM (*Industry Medical and Scientific*) de 2.4 GHz y 802.11a el cual opera las bandas de 5.3 GHz y 5.8 GHz de la infraestructura de información nacional sin licencia (*the Unlicensed National Information Infrastructure*).

La popularidad de 802.11 despegó con el crecimiento con el acceso a Internet de banda ancha a alta velocidad en la casa. Fue de esta manera y permanece la forma fácil de compartir un enlace de banda ancha entre varios equipos esparcidos en una casa. El crecimiento de *hotspots*, y puntos de acceso *access points* han agregado popularidad al protocolo 802.11. Una variante fue 802.11g, la cual opera en la misma banda de frecuencia que 802.11b. Esta tecnología 802.11, como 802.11g/a, utiliza una forma más avanzada de modulación llamada OFDM (*Orthogonal Frequency-Division Multiplexing*), y está habilitada para ser utilizada en la banda de 2.4 y 5.8 GHz con tasas de transmisión de datos hasta 54 Mbps.

Actualmente existen tres versiones del estándar IEEE 802.11. Las principales diferencias entre ellos se muestran en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2. Comparación entre las versiones del estándar IEEE 802.11.

| | 802.11b | 802.11a | 802.11g |
|----------------|------------------|-----------------|----------------|
| Velocidad | 11Mbps/5.5 Mbps | 54 Mbps/30 Mbps | 54 Mbps/30Mbps |
| Frecuencia | 2.4 GHz | 5.8 GHz | 2.4 GHz |
| Precio | Económico | Medio | Medio |
| Distancia | 50 a 100 m | 50 a 100 m | 50 a 125 m |
| Popularidad | Amplia | Nuevo | Nuevo |
| Compatibilidad | Comúnmente usado | No compatible | 802.11b |

2.7.3.2 Infraestructura IEEE 802.11

En una red WiFi, cada componente, ya sean estaciones o puntos de acceso AP (*Access Point*), requieren un radio transmisor y una antena. Las estaciones pueden ser incorporadas a una tarjeta LAN instalada en una PC de escritorio, un adaptador USB, una PCMCIA o puede ser integrada a un dispositivo PDA. Los AP's forman un puente entre redes alámbricas e inalámbricas. La red puede ser configurada en dos formas básicas, como se muestra en la Figura 2.4.

Modo ad hoc (peer-to-peer): Esta configuración es idéntica a su contraparte alámbrica, solo que sin cables. Dos o más estaciones pueden comunicarse entre sí sin un AP.

Modo infrastructure networking (Client/Server): Esta configuración consiste de múltiples nodos conectadas a un AP que actúa como puente a una red alámbrica.

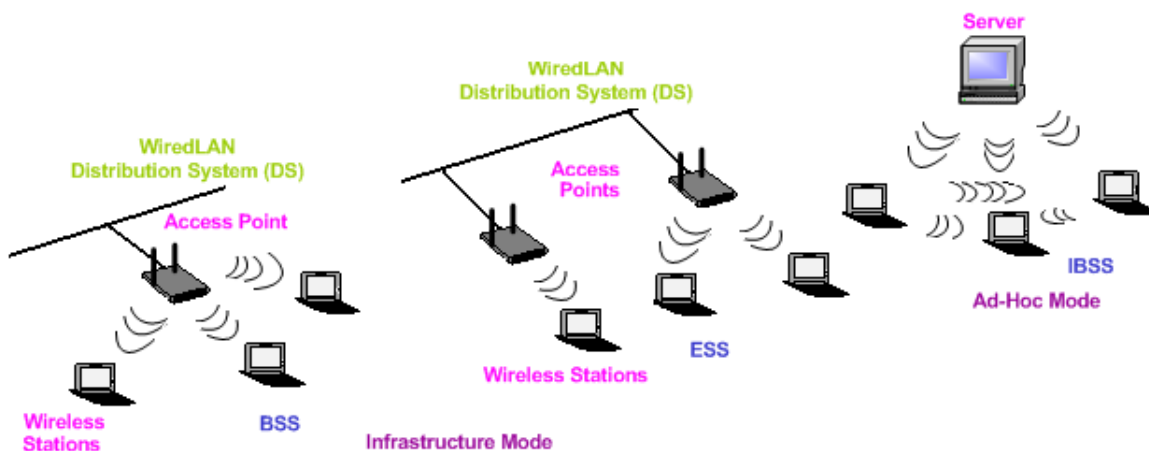


Figura 2.4. Configuración de una red LAN.

2.7.3.3 Nuevos retos para 802.11

Actualmente 802.11 se encuentra rápidamente proliferando en todo el planeta. Sin embargo, aún se enfrenta aún número de retos tecnológicos. El mayor reto es el rango de alcance. El dispositivo más alejado actualmente puede moverse en un área estipulada y aún así recibir una señal adecuada de un punto de acceso AP 802.11, alrededor de 20-150m siempre y cuando no exista un muro o una obstrucción física sustancial. Más aún, cuando un usuario se aleja del AP el desempeño decae rápidamente.

Otro reto mayor que se enfrente 802.11, incluye como mejorar la velocidad máxima de tasa de transmisión, la seguridad y la calidad de servicio.

Actualmente, 802.11a/b/g para redes inalámbricas de área local (WLAN) proveen un desempeño adecuado para las aplicaciones que hoy en día se utilizan, por lo tanto la conveniencia de las conexiones inalámbricas poseen un gran valor. Las siguientes generaciones de aplicaciones inalámbricas requerirán altas tasas de transmisión de datos (*higher WLAN data throughput*) y por lo tanto la gente demandará mayor rango de cobertura. En respuesta a estas necesidades el grupo de trabajo IEEE 802.11n Task Group al igual que las alianzas Wi-Fi se encuentran trabajando en ello.

El objetivo del grupo de trabajo 802.11n es definir las modificaciones a la capa física y a la capa de control de acceso al medio PHY/MAC (*Physical Layer and Media Access Control Layer*) que proporciona un mínimo de la máxima capacidad de transmisión a 100 Mbps en el punto de acceso al servicio de la MAC MAC SAP (*Service Access Point*).

El requerimiento mínimo de la máxima capacidad de transmisión aproximadamente cuadriplica el desempeño de la máxima capacidad de transmisión WLAN comparada con las redes de hoy en día 802.11a/g. El objetivo principal sobre es alcanzar una capacidad de transmisión por arriba de los 200 Mbps para alcanzar los requerimientos de máxima capacidad de transmisión de 100 Mbps MAC SAP.

Otras mejoras necesarias incluyen un rango de acuerdo a la máxima capacidad de transmisión dada, que sea robusto respecto a la interferencia y una mejora y más servicios uniformes dentro del área de cobertura de un

punto de acceso *AP BSS (Basis Service Set)*. Canales amplios de ancho de banda y múltiples configuraciones de antenas que puedan permitir tasas de datos de 500 Mbps.

El grupo de trabajo también se está asegurando de las transiciones suaves con los requerimientos pasados de compatibilidad con el legado de las soluciones existentes *IEEE WLAN (802.11a/b/g)*.

Mientras la transferencia de datos y audio han tenido una atracción primaria para la mayoría de los usuarios *802.11*, la siguiente generación de aplicaciones será el video. En el futuro es Internet una herramienta para bajar películas. Poder ver *streaming* video en una computadora portátil o un *PDA* sobre una conexión inalámbrica. Actualmente, *802.11g* es capaz de soportar *streaming* para video, pero los problemas respecto a la calidad de servicio aún dañan el desempeño. La imagen de video puede ser degradada cuando la red se encuentra saturada.

El grupo de trabajo de las especificaciones de los servicios multimedia *802.11e* ha desarrollado un nuevo sistema. Una velocidad mejorada llamada tecnología de ráfagas de paquetes que incrementa la máxima capacidad de transmisión del canal permitiendo que múltiples paquetes viajen a través de las ondas aéreas sin el encabezado extra de espacio entre los paquetes, esto incrementa la velocidad de la red. Las especificaciones *802.11e* toman lugar en la capa *MAC* y por ende será común en la capa física (*PHY*) para todas las tecnologías *WLAN 802.11*. Consecuentemente, en *802.11e* las ráfagas de paquetes (*packet-bursting*) estarán disponibles en *802.11g*, y *a*.

2.7.4 Estandarizaciones Actuales

Los estándares y las arquitecturas de acceso de radio de banda ancha son temas de interés para Europa, Japón y los Estados Unidos. Dependiendo de la región y país se usan diferentes términos cuando se refieren a estos estándares. En Europa, éstos son referidos como *BRAN (Broadband Radio Access Networks)*, en los Estados Unidos, como *LMDS (Local Multipoint Distribution Service)* [20], *IEEE 802.16* y *BWA*, además de otros términos. En Canadá y otros países, son referidos como Sistemas de Comunicación Multipunto Locales *LMCS (Local Multipoint Communication Systems)* [21]. Sus aplicaciones, sin

embargo, son variadas: fijas y móviles, locales y de área ancha que incluyen aplicaciones prometedoras como:

- Acceso a Internet de alta velocidad.
- Dos maneras de comunicación de datos (*peer-peer* o *cliente/servidor*).
- Telefonía pública o privada.
- Dos tipos de servicio multimedia tales como videoconferencias y video comercio.
- Video *broadcast*.

Mientras la primera generación de sistemas *LMDS* se encontraban en el campo de despunte, las actividades de estandarización se encontraban ya en camino para el caso de *IEEE* y *ETSI* definiendo las especificaciones técnicas de los próximos sistemas futuros. Los grupos que están llevando a cabo este trabajo son *IEEE 802.16* y el *ETSI BRAN*. Las especificaciones para ambos grupos cubren la capa física y las funciones de la capa *MAC*.

2.7.4.1 ETSI-BRAN

La familia de estándares *BRAN* incluyen: *HIPERLAN (High Performance Radio Local Area Networks)* Tipo 1 (*LANs* inalámbricas de alta velocidad), *HIPERLAN* Tipo 2 (*Acceso inalámbrico de rango corto a redes IP (Internet Protocol)*), *ATM (Asynchronous Transfer Mode)* y *UMTS (Universal Mobile Telecommunications System)*) ambos operando en la banda de 5 GHz, Acceso inalámbrico fijo de banda ancha punto a multipunto (*HIPERACCESS*) e Interconexión de banda ancha inalámbrica (*HIPERLINK*) operando en la banda de 17 GHz. Esto se describe en la Figura 2.5 en donde se indican las bandas de frecuencia en la que operan y la velocidad de transmisión en la interface de aire.

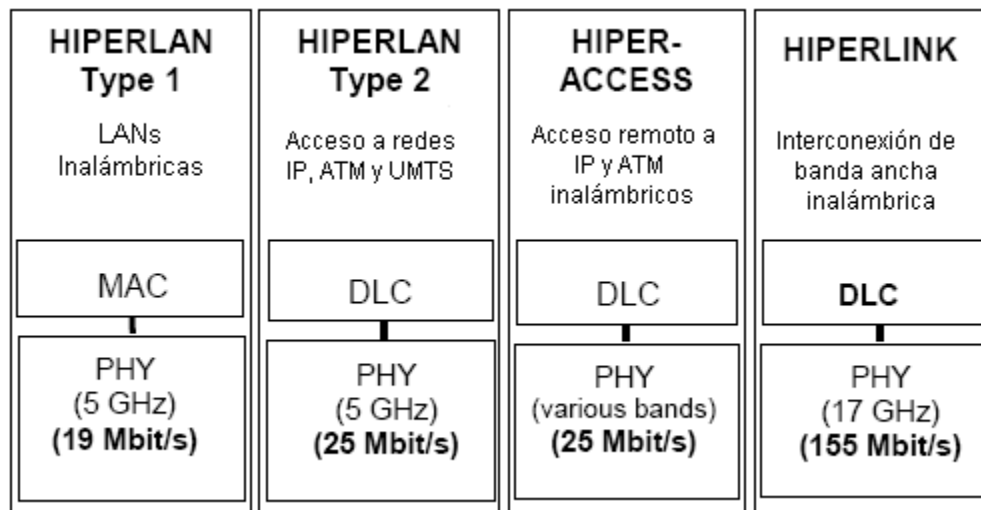


Figura 2.5 Estándares BRAN.

El acceso de banda ancha consiste en *HIPERACCESS*, *HIPERLAN* e *HIPERLINK* (*High Performance Radio Link*), como se muestra en la Figura 2.5. En las definiciones de la *ETSI*, se indica una topología jerárquica distinta, en ellas es posible que las LAN's inalámbricas se conecten directamente con cualquier parte de la red central o de las terminales *HIPERACCESS*.

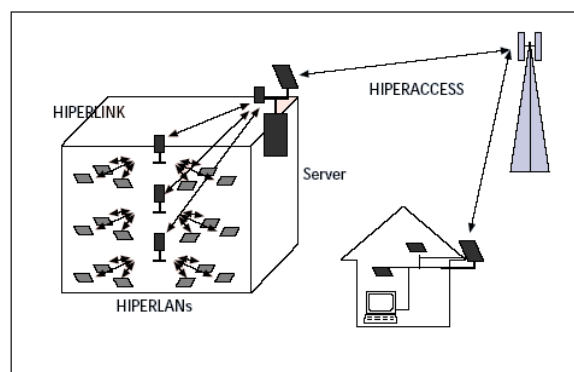


Figura 2.5. Acceso Inalámbrica de Banda Ancha.

Los sistemas *HIPERACCESS* conectados principalmente a residencias, oficinas, y pequeñas y medianas empresas, tienen como premisa el tener acceso a una gran variedad de servicios de telecomunicaciones tales como voz, datos, y servicios multimedia con velocidades de transmisión de los 2 Mbps a los 25 Mbps. Los sistemas *HIPERACCESS* serán principalmente

usados como redes de acceso remoto de banda ancha. El espectro puede ser en el rango de 2-40 GHz.

La segunda aplicación a la cual se hace referencia, *HIPERLAN*, provee acceso local con una calidad de servicio controlada para aplicaciones de banda ancha a computadoras portátiles, usando principalmente la banda de 5 GHz.

La tercera aplicación de *BRAN* es llamada *HIPERLINK*, y es principalmente una interconexión red a red que podrán soportar una variedad de protocolos y todos los escenarios posibles de tráfico. Esta aplicación podrá ser usada con velocidades de transmisión arriba de 155 Mbps en partes del espectro de 17 GHz.

2.7.4.2 Puntos comunes IEEE 802.16 Y ETSI BRAN

Las técnicas de transmisión están basadas en un solo proveedor de transmisión. La razón de esto es debido a que los sistemas *LMDS* sufren una pequeña interferencia intersímbolo *ISI* (*Intersymbol Interference*), y de esto no sugirió mucha motivación para utilizar *OFDM* (*Orthogonal Frequency-División Multiplexing*) el cual es bastante atractivo para canales *ISI*. Adicionalmente, la gran sensibilidad de en el oscilador en la fase de ruido y la no linealidad del amplificador de potencia hace que esta técnica sea escasamente deseable para sistemas que operan en ondas milimétricas de frecuencia donde la alta potencia de transmisión y baja fase en ruido hace que se incurra en un alto costo.

Así como en las primeras especificaciones *DVB/DAVIC*, *TDM* y *TDMA* han sido adoptadas para el canal de bajada y canal de subida respectivamente. Esta opción puede ser justificada por la relativa madurez de *TDMA* con respecto a *CDMA* (*Code-Division Multiple Access*) que ha sido adoptado en la tercera generación de los estándares digitales para radio móviles.

El incremento de la capacidad de las células con respecto a *QPSK* puro y la modulación adaptiva y la codificación serán utilizadas. El propósito de la eficiencia de la modulación de ancho de banda, así como los esquemas de codificación que son compatibles con la señal a ruido *SNR* (*Signal-to-noise-ratio*) y el nivel de interferencia que afecta los intereses del usuario. Esto esta en función de la posición del usuario por un lado (en el canal de bajada) y el

nivel de desvanecimiento por otro lado. Los esquemas de modulación candidatos son: $QPSK$, $16-QAM$, y $64-QAM$ para ambos canales de subida UL (*Uplink*) y el de bajada DL (*Downlink*).

Para ambos grupos *IEEE 802.16* y *ETSI BRAN*, su primera prioridad es la definición de las especificaciones del sistema para redes de acceso inalámbrico de banda ancha, operando en frecuencias por arriba de los 11 GHz, pero ahora fijan su atención hacia las bandas de frecuencia con licencia por debajo de los 11 GHz.

En muchos aspectos los accesos inalámbricos de banda ancha a bajas frecuencias es muy similar a los sistemas *LMDS* que esencialmente implementados para aplicaciones de pequeños negocios, frecuencias por debajo de los 11 GHz son por lo general usadas para abonados residenciales donde la aplicación de mayor velocidad requerida es el acceso a Internet. La implicación en este tipo de tráfico será altamente en forma asimétrica, y mucho de este tráfico es de la estación base *BS (Base Station)* hacia los abonados. Esta característica será de gran impacto en la capa física y *DLC (Data Link Control)*. La segunda característica distintiva es que debido a la gran cantidad de tamaños de células, la pequeña directividad de la antena del abonado y la no línea de vista de propagación, las bajas frecuencias son sujeto de un nivel significativo de *ISI*, el cual debe ser compensado.

Una de las soluciones para bajas frecuencias es utilizar las mismas especificaciones técnicas para ondas milimétricas (*LMDS*). Lo único que se necesita agregar en este caso es un ecualizador que sea capaz de manejar multitrayectorias para este tipo de redes. Otra solución consiste en utilizar la tecnología *OFDM* la cual ha sido adoptada por las especificaciones *IEEE 802.11* y *ETSI BRAN* para redes de área local (*LANs*) a 5 GHz. Esta técnica es conocida por ser eficiente en contra del desvanecimiento multitrayectoria (*multipath*) cuando se combina con una apropiada codificación de canal e intervalos. Esto en conjunto con el hecho de que es relativamente fácil diseñar radios de bajo costo para bandas de ondas milimétricas, teniendo a favor el uso de *OFDM* a frecuencias por debajo de los 11 GHz. Ambas opciones pueden ser viables, pero aún así no se tiene una certeza de que camino tomará la estandarización, pero la adopción de *OFDM* en los estándares como *ETSI* y *IEEE*, puso a esta técnica en una gran posición para accesos inalámbricos de banda ancha a frecuencias bajas por debajo de los 11 GHz.

2.7.4.3 IEEE 802.20

En diciembre 2002, la *IEEE Standards Board* aprobó el establecimiento de *IEEE 802.20*, el grupo de trabajo para acceso móvil inalámbrico de banda ancha *MBWA (Mobile Broadband Wireless Access) Working Group*.

La misión de *IEEE 802.20* es desarrollar las especificaciones para una eficiente interface aérea basada en paquetes, para optimizada para el transporte de servicios basados en *IP*. El objetivo es habilitar el desarrollo mundial sostenible, presente en todos lados, interoperando siempre para múltiples vendedores de acceso a redes inalámbricas de banda ancha que permita conocer las necesidades del mercado de usuarios de negocios y de usuarios finales residenciales

La siguiente generación de conectividad móvil detrás de *WiMAX* estará basada en el estándar *802.20*, el cual está siendo desarrollado como una especificación móvil. La capa física (ejemplo, la parte final frontal del radio (*radio front end*) la sección del procesamiento de la señal de la banda base) y la capa de enlace de datos (ejemplo, protocolo de acceso al medio) son diseñadas específicamente para los requerimientos móviles, tales como arreglos de antenas adaptivas. El concepto que sustenta el concepto de adaptivo, ó de antenas ‘inteligentes’, es proveer el procesamiento de la señal que permita señales de múltiples antenas, como en una red celular, para trabajar juntas y producir una señal fuerte con un mínimo de interferencia.

Las especificaciones *802.20* es también el primer estándar *IEEE* que explícitamente plantea la necesidad de clientes móviles en vehículos móviles. Los parámetros de diseño de las especificaciones incluye el soporte para una movilidad vehicular de hasta 250 km/hora. Este criterio será soportado por la industria vehicular, así como también por la industria de trenes de pasajeros a altas velocidades que son utilizados en muchas partes del mundo.

Debido a que el *roaming 802.16e* soportado es generalmente limitado en áreas locales y regionales, *802.20* comparte con *3G* la habilidad de soportar un *roaming* global. Similarmente *802.16*, *802.20* soporta *QoS* para dar una buena calidad para servicios de baja latencia, en contraste con los servicios de datos celulares, los cuales inherentemente tiene una arquitectura de alta latencia.

Ambos estándares 802.16e y 802.20 comparten eficiencia sincronía entre los canales de subida y de bajada, en oposición a la naturaleza asíncrona de las redes celulares 3G las cuales tienen una baja eficiencia en el canal de subida, y relativa hacia sus canales de baja. Alta eficiencia en los canales de subida puede ser benéfica para aquellos usuarios de negocios quienes deben ejecutar sincronizaciones de gran cantidad de datos o transferencia de cargas hacia sistemas centrales corporativos para sus sistemas móviles.

El estándar 802.20 promete una combinación de muchas características deseadas del estándar 802.16e con aquellas de las redes de datos celulares de 3G, mientras reduce las limitaciones de ambas para dichas modalidades. Por lo tanto, las soluciones 802.20 podrá implementar la necesidad de un espectro amplio funcional para negocios móviles e implementación personal de computadoras.

Descripción de la Capa MAC del Protocolo IEEE 802.16

3.1 Introducción

La definición de los servicios y características soportadas por la tecnología de acceso inalámbrico de banda ancha (BWA, *Broadband Wireless Access*) está contemplada en el protocolo IEEE 802.16 mediante las especificaciones correspondientes a las capas de control de acceso al medio (MAC) y física (PHY). Esta es una tecnología, cuya arquitectura punto–multipunto a través de un canal compartido, requiere de un mecanismo eficiente de acceso al medio capaz de soportar distintos niveles de servicio para el transporte de información con retrasos mínimos y un máximo desempeño de distribución de ancho de banda para cada una de las estaciones transmisoras. Esto requiere de técnicas que permitan ofrecer distintas prioridades para cada una de las conexiones establecidas, pero que sea capaz de garantizar, a todas ellas, oportunidades de transmisión exitosas.

El protocolo IEEE 802.16 atiende estas necesidades mediante la descripción del funcionamiento de la capa MAC. El esquema presentado consiste en el envío periódico de mensajes de control desde la Estación Base (BS, *Base Station*) que determinan el tipo de las transmisiones que podrán realizarse durante un intervalo futuro. Este método se lleva a cabo mediante la combinación de TDMA (Acceso Múltiple por División de Tiempo) y DAMA (Acceso Múltiple por Asignación de Demanda). La combinación de ambos mecanismos permite alcanzar tasas de transferencia máxima que fluctúan entre 32 y 130 Mbps dependiendo del ancho del canal y de la técnica de modulación. Para obtener la tasa de transmisión para un canal SC (*Single Carrier*) se utiliza la siguiente expresión:

$$R = \frac{m * BW}{1 + factor\ roll_off}$$

donde: m es el número de bits por símbolo de acuerdo a la modulación empleada (1 para BPSK, 2 para QPSK, 4 para 16-QAM y 6 para 64-QAM), BW es el ancho de banda del canal y el $factor\ roll_off = 0.25$ es un parámetro de exceso de ancho de banda para redes inalámbricas.

Para ayudar a comprender lo que se discuten en este capítulo, se presenta la Tabla 3.1, que contiene los términos técnicos, del estándar 802.16, más utilizados y una breve descripción de su significado.

Tabla 3.1. Términos usados par la descripción del protocolo 802.16.

| Término | Descripción |
|------------------|--|
| <i>Frame</i> | Determina un bloque fijo de datos transmitidos como una sola entidad. |
| <i>Downlink</i> | Canal de bajada, con dirección de la BS a las SSs. |
| <i>Uplink</i> | Canal de subida, con dirección de las SSs a la BS. |
| <i>Slot</i> | Recurso mínimo que puede asignarse a una SS en la capa PHY. |
| <i>Backoff</i> | Número de <i>slots</i> que hay que esperar para realizar una retransmisión de solicitud de ancho de banda. |
| <i>Scheduler</i> | Algoritmo de la BS que asigna los recursos en un canal <i>uplink</i> . |

3.2 Características de la capa MAC

La capa MAC es responsable de controlar y multiplexar varias conexiones sobre el mismo medio físico. Esta capa es una conexión orientada e identifica una conexión lógica unidireccional entre la BS y la SS por un CID (*Connection Identifier*) como se detalla en la sección 3.2.2. Los CIDs para las conexiones de *uplink* y *downlink* son diferentes. El CID se puede ver como un direccionamiento temporal y dinámico de capa 2, asignado por la BS para identificar una conexión unidireccional entre las capas MAC y PHY, y se utiliza para el control del tráfico de los datos. Para asociar ese direccionamiento, la subcapa de convergencia (CS) no debe perder de vista la asociación entre la dirección destino y el respectivo CID.

El estándar IEEE 802.16, fue desarrollado para brindar servicios inalámbricos de banda ancha, entre los que se incluyen voz, datos y video. La capa MAC está basada en el estándar DOCSIS (*Data Over Cable Service Interface Specifications*) [22], y puede soportar ráfagas de tráfico con altas demandas de tasas de datos, mientras proporciona simultáneamente transmisión continua de tráfico de voz y video (sensibles a retardos y latencia). La tarea principal de la capa MAC es proporcionar una interface entre la capa superior y la capa PHY. La capa MAC toma los paquetes de la capa superior y los encapsula en PDUs (*Protocol Data Units*), para transmitirlos sobre el aire. Para los paquetes recibidos de la capa PHY, la capa MAC realiza la operación inversa, es decir; desencapsula los paquetes contenidos en los PDUs y los envía a la capa superior. El diseño de la capa MAC en el estándar IEEE 802.16, incluye una Subcapa de Convergencia, que sirve de interface a una variedad de protocolos de capa superior, como ATM, Ethernet, IP y cualquier otro protocolo que se desarrolle en un futuro. En la Figura 3.1, se muestra el diagrama general de la capa MAC.

La capa MAC está dividida en tres distintos componentes: Una Subcapa de Convergencia (CS), una Subcapa de Parte Común (CPS) y una Subcapa de Seguridad. La subcapa CS es la interface entre la subcapa CPS y la capa superior. Ésta se encarga de recibir los paquetes de la capa superior y es responsable de llevar a cabo todas las operaciones que son dependientes de la naturaleza de los protocolos de capa superior, como supresión de encabezados y mapeo de direcciones.

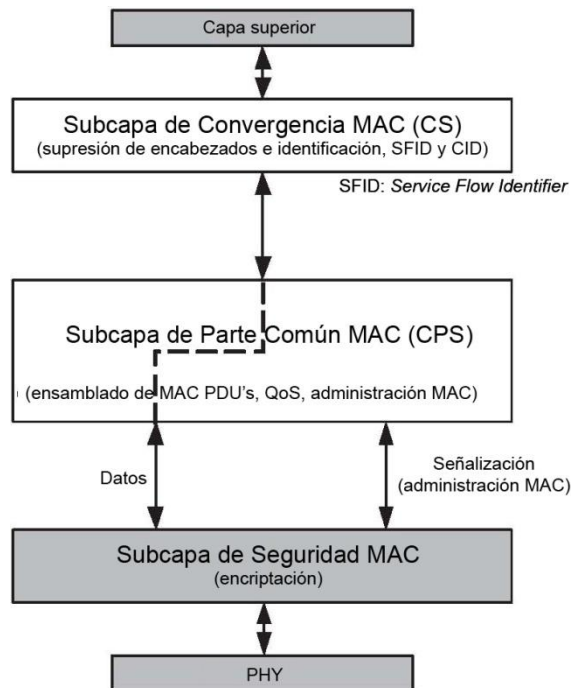


Figura 3.1 Diagrama general de la capa MAC.

La subcapa CS puede ser vista como una capa de adaptación, que enmascara los protocolos de capa superior y sus requerimientos para el resto de las subcapas MAC y la capa PHY. La subcapa CPS realiza todas las operaciones de paquetes que son independientes de la capa superior, como encapsulación, concatenación, fragmentación, empaquetamiento, control de QoS y ARQ (*Automatic Repeat Request*). La subcapa de seguridad es responsable de la encriptación, autorización y un apropiado intercambio de claves de encriptación entre la BS y la SS.

El acceso al medio se puede configurar por TDD, con un único canal de comunicación, como por FDD con varios canales en distintas portadoras. Para el caso de TDMA sobre FDD, 802.16 permite una comunicación *full duplex*, mientras que para TDMA sobre TDD la comunicación es *half-duplex*. En ambos casos el sistema permite reservar un determinado ancho de banda para aplicaciones que necesitan ancho de banda garantizado como VoIP, Video, etc.

Además, la capa MAC soporta concatenación de PDUs de diferentes conexiones, para ser enviados dentro de la misma ráfaga de transmisión. Las transmisiones son divididas en los métodos TDD o FDD. En el canal DL las conexiones generalmente son *multicast*, pero también pueden ser *unicast*. Los

SSs utilizan TDMA en el canal UL, para transmitir hacia la BS en *slots* de tiempo asignados específicamente. Esto significa que las conexiones de las SSs hacia la BS siempre son *unicast*. Por lo tanto el CID juega un papel muy importante en la identificación de los canales UL, así la BS es capaz de identificar a las SSs para enviarles los MAC PDUs en el canal DL.

El estándar IEEE 802.16 es un protocolo de control centralizado, pero puede operar en modo *mesh*. En el primer caso la BS controla las reservaciones de ancho de banda y las solicitudes para las oportunidades de transmisión en el canal UL. En el segundo caso el tráfico puede ser enrutado a través de las SSs utilizando un algoritmo *scheduler* distribuido. En este modo un nodo toma el papel de una BS *mesh*. El Capítulo 9 muestra la descripción del protocolo MAC de las redes WiMAX *mesh*.

En el método de control centralizado, las SSs tienen dos maneras de enviar una solicitud de ancho de banda (BR). La primera es transmitirla en *slots* reservados periódicamente y la segunda es contender con otras SSs. La BS recolecta todas las solicitudes y por lo tanto tiene suficiente información acerca de las BRs. Entonces el *scheduler* de la BS, asigna un número apropiado de *slots* para acomodar dichas solicitudes. Esta información es pasada a las SSs a través del UL-MAP al inicio del *sub-frame downlink*, el cual describe la forma en que el canal UL es repartido entre las SSs para satisfacer sus requerimientos de ancho de banda.

En el periodo de contención (*uplink*), puede ocurrir una colisión cuando dos o más SSs colocan sus BRQs en el mismo *slot* de transmisión. Además, las SSs no pueden “escuchar” al mismo tiempo que transmiten, y por lo tanto deben esperar la confirmación de su BRQ en el siguiente UL-MAP.

Las BRQs que colisionaron en el periodo de contención, son retransmitidas hasta su correcta recepción en la BS. Para mitigar el número de colisiones, la BS hace uso del algoritmo *exponential backoff* (descrito en la siguiente subsección), el cual es similar al empleado en CSMA/CD de Ethernet [23].

Debido a este tipo de contenciones, el protocolo no puede garantizar retardos de acceso. Por lo tanto, el estándar IEEE 802.16 tiene en cuenta las aplicaciones en tiempo real (como VoIP, VoD, etc.), asignándoles reservaciones de ancho de banda no solicitadas y realizando *polling* (poleo o

encuesta), para las aplicaciones que no son en tiempo real (como FTP, *Web*, *e-mail*, etc). El uso del poleo es esencial porque estas aplicaciones deben recibir oportunidades de transmisión en forma periódica. Además, las garantías de QoS se hacen posibles a través de una diferenciación de QoS, proporcionada por los diferentes tipos de flujos de servicio.

La asignación de ancho de banda en el estándar IEEE 802.16 puede ser realizada de dos maneras, ya sea por asignación por conexión GPC (*Grants Per Connections*) o asignación por estación subscriptora GPSS (*Grants Per Service Station*). En el primer caso, cada asignación es asociada con una conexión específica. Por lo tanto, siempre que varias conexiones de una SS son encuestadas (*polling*), o le sean asignadas reservaciones de ancho de banda, múltiples entradas son establecidas en el UL-MAP. La principal desventaja de esta propuesta es que crea demasiados encabezados. En la segunda propuesta, las SSs reciben una sola reservación de ancho de banda para todas sus conexiones. Entonces el *scheduler* de la SS decide como asignar las oportunidades de transmisión para cada conexión. Para ello el *scheduler* de la SS debe respetar los requerimientos de QoS de sus conexiones.

3.3 Algoritmo *Exponential Backoff*

Las BRQs de algunos servicios como BE y rtPS son transmitidas en el modo de contención, el cual es de uso común. Dado que las BRQs se presentan aleatoriamente en un medio de uso compartido, estas son susceptibles a sufrir colisiones.

Un esquema de resolución de colisiones es un factor significativo en el rendimiento de los servicios que utilizan el modo de contención. El algoritmo *Exponential Backoff* es un esquema que determina cuanto tiempo (número de *slots*) debe esperar una SS antes de retransmitir una BRQs que colisionó. Este número de *slots* es calculado como una variable aleatoria uniforme en el rango $[0, (2^{\textit{backoff}} - 1)]$. El exponente *backoff* es primeramente inicializado con un valor mínimo (*minimum backoff exponent*) y es actualizado de acuerdo a un indicador recibido desde el transmisor. El valor *backoff_truncado* (*maximum backoff exponent*) es el máximo valor permitido del exponente. Si ocurre una colisión, el valor del exponente *backoff* es incrementado en una unidad. Una

vez que el valor del exponente *backoff* alcanza el valor *backoff_truncado*, permanece en éste valor a pesar de las posteriores colisiones. Después de cada transmisión exitosa, el valor del exponente *backoff* es restaurado a su valor inicial. A continuación se muestra el pseudo código del algoritmo *Exponential Backoff*.

```

if (intentos_transmisión < 16) then
    backoff := min (intentos_transmisión, backoff_truncado)
    slots := random [0, (2backoff - 1)]
    esperar slots
else
    Error MAC, No. de colisiones excesivas

```

En el diagrama de flujo de la Figura 3.2, se muestra la forma en que el algoritmo *exponential backoff* es utilizado para resolver las colisiones en una transmisión.

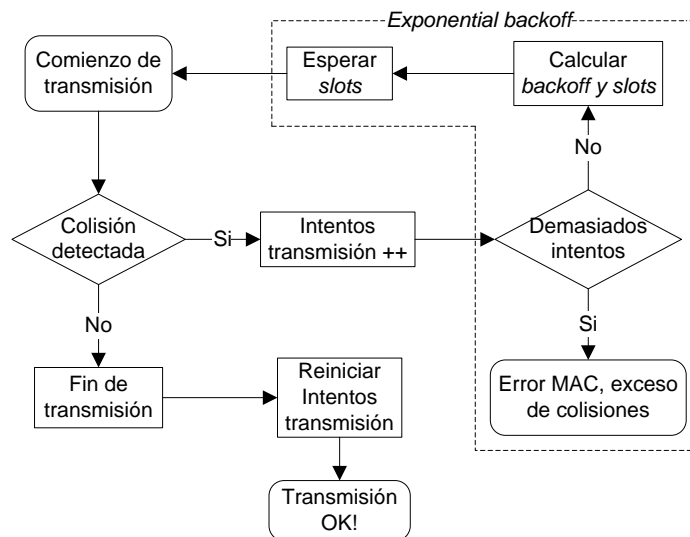


Figura 3.2. Resolución de colisiones por el algoritmo *Exponential Backoff*.

En la Tabla 3.2 se muestran los rangos de números aleatorios que la variable para el número *slots* puede tomar, para diferente número de colisiones.

Tabla 3.2. Rangos de números aleatorios para la variable del número de slots
($backoff_inicial=0$, $backoff_truncado=10$).

| No. de colisiones | Rango de números aleatorios |
|-------------------|-----------------------------|
| 1 | [0, 1] |
| 2 | [0, 3] |
| 3 | [0, 7] |
| 4 | [0, 15] |
| 5 | [0, 31] |
| 6 | [0, 63] |
| 7 | [0, 127] |
| 8 | [0, 255] |
| 9 | [0, 511] |
| 10 | [0, 1023] |
| ⋮ | ⋮ |
| 15 | [0, 1023] |
| 16 | N/A |

3.4 Direccionamiento y tipo de conexiones

Las SS's están identificadas por una dirección única de 48 bits de la capa MAC. Esta dirección permite distinguirlas tomando en cuenta tanto al fabricante como el tipo de equipo, por consiguiente se les considera como direcciones universales.

La dirección MAC se emplea durante los procesos de registro así como en los de autenticación. Durante el registro, esta dirección permite a la BS el establecimiento de todas las conexiones apropiadas que correspondan a una SS en particular. Por otro lado, durante el proceso de autenticación la dirección MAC es requerida para la identificación mutua tanto de la BS como de la SS.

La proporción de servicios de conectividad es posible mediante conexiones realizadas entre la BS y la SS. Dichas conexiones se identifican mediante el

CID, que consta de 16 bits, permitiendo hasta 65 536 conexiones en cada canal ascendente y descendente.

La capa MAC del protocolo IEEE 802.16 está orientada a conexiones y flujos de servicio. Cada conexión es diferenciada por un CID de 16 bits, el cual es asignado a las SSs en el proceso de inicialización, o cuando una aplicación de datos de una SS demanda recursos de transmisión. También incluye una diferenciación de flujos de servicio, los cuales son asociados con un *Service Flow Identifier* (SFID). La capa MAC recibe los paquetes de la capa superior y los clasifica en diferentes conexiones, asignándoles un CID con base en el flujo de servicio al que pertenecen (diferenciado por el SFID). Posteriormente los encapsula dentro de SDUs (*Service Data Units*), que opcionalmente pueden presentar supresión de encabezados. Después, los SDUs son encapsulados dentro de PDUs, que son enviados a la capa PHY, la cual los trasmite sobre el aire. Adicionalmente, en el proceso de encapsulación, los SDUs pueden ser fragmentados y/o empaquetados.

Durante la inicialización de los servicios, la BS proporciona 3 conexiones en ambas direcciones mediante los mensajes de control RNG-REQ (Ranging Request) y REG-RSP (*Registration Response*), cada conexión cuenta con parámetros distintos de QoS y sus características son las citadas a continuación:

- **Conexión Básica (*Basic Connection*):** Empleada para la transmisión de mensajes cortos y urgentes de control MAC.
- **Conexión Primaria (*Primary Connection*):** Soporta el envío de mensajes de control MAC más largos y con mayor tolerancia a la latencia.
- **Conexión Secundaria (*Secondary Connection*):** Permiten la transmisión de mensajes de control con mayor tolerancia a los retrasos y basados en estándares como DHCP (*Dynamic Host Configuration Protocol*), TFTP (*Trivial File Transfer Protocol*), SNMP (*Simple Network Management Protocol*), etc.

3.5 Clasificación de paquetes

Clasificación es el proceso mediante el cual un paquete de capa superior es mapeado en una conexión de transporte particular, para su transmisión entre entidades MAC. El proceso de mapeo asocia el paquete con una conexión de transporte, el cual también crea una asociación con sus características de flujo de servicio. Este proceso facilita la entrega de paquetes con las apropiadas restricciones de QoS.

Un clasificador es un conjunto de criterios de correspondencia aplicados a cada paquete que entra a la red. El clasificador está compuesto de los criterios de correspondencia⁵, un clasificador de prioridades y una referencia a un CID. Si un paquete coincide con un criterio de correspondencia especificado, este es entregado a la conexión definida por el CID. Las características del flujo de servicio de la conexión proporcionan QoS para ese paquete. El clasificador de prioridades es usado para ordenar los paquetes que fueron mapeados. Un clasificador *downlink* es aplicado por la BS, y un clasificador *uplink* es aplicado en la SS. La figura ilustra el clasificador de paquetes.

Si un paquete falla al ser mapeado por el clasificador hacia una conexión, éste es descartado por la subcapa CS.

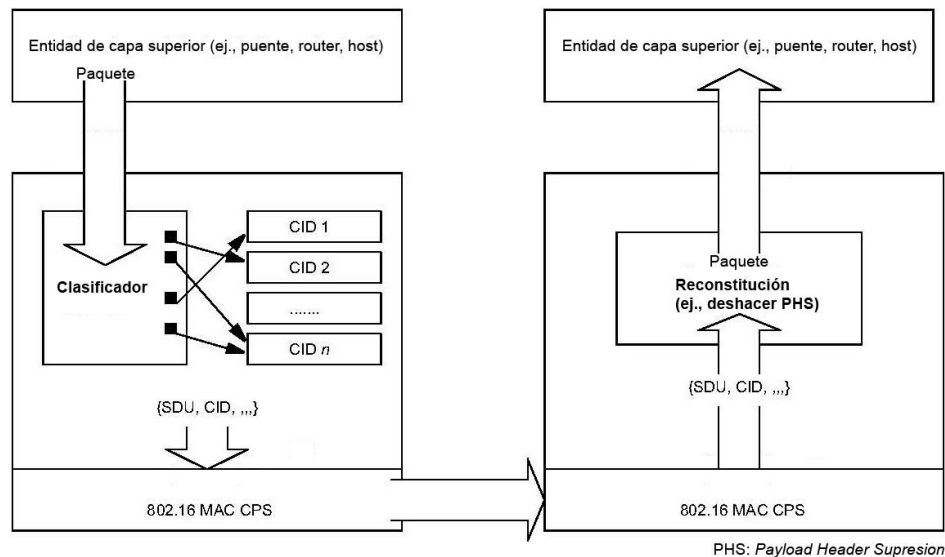


Figura 3.3. Clasificador de paquetes.

⁵ Por ejemplo, el tipo de servicio del paquete IP, la dirección origen y destino, o los puertos de origen y destino.

3.6 Formato MAC SDU

Una vez que los paquetes de la capa superior son clasificados y asociados con una conexión MAC, son encapsulados en el formato MAC SDU, como se muestra en la Figura 3.4. El campo PHSI (*Payload Header Suppression Index* – 1 *byte*), debe estar presente sólo si se definió una regla de supresión de encabezados asociada con la conexión.

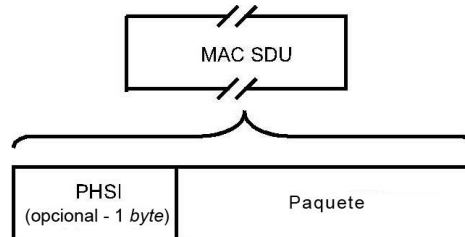


Figura 3.4. Formato MAC SDU.

3.7 Supresión de encabezados

En la supresión de encabezados, una porción repetitiva de los encabezados de capa superior contenidos en el *Payload*, es suprimida en el MAC SDU por la entidad emisora y restaurada posteriormente por la entidad receptora. La implementación de una capacidad de supresión de encabezados es opcional. En el canal UL, la entidad emisora es la SS y la entidad receptora es la BS. Inversamente, en el canal DL la entidad emisora es la BS y la entidad receptora es la SS. Si la supresión de encabezados está habilitada en una conexión MAC, a cada MAC SDU le es asignado un prefijo con un PHSI, el cual hace referencia a un *Payload Header Suppression Field* (PHSF) del cual fue suprimida la porción repetitiva de datos.

La entidad emisora usa un clasificador para mapear los paquetes en un flujo de servicio. El clasificador únicamente mapea los paquetes con sus reglas de supresión de encabezados correspondientes. La entidad receptora usa el CID y el PHSI, para restaurar la supresión de encabezados de acuerdo al PHSF.

⁶ Término utilizado para referirse a la carga útil o datos de un paquete.

3.8 Construcción y transmisión de MAC PDU

De acuerdo con el tamaño de la carga útil, múltiples SDUs pueden ser enviados en sólo un MAC PDU, o un SDU se puede fragmentar para ser transportado por múltiples MAC PDUs. Cuando un SDU se fragmenta, la posición de cada fragmento del SDU es etiquetada por un número de secuencia. El número de secuencia permite a la capa MAC, en el receptor, ensamblar los fragmentos el SDU en el orden correcto.

Para utilizar eficientemente los recursos de capa PHY, múltiples MAC PDUs son destinados al mismo receptor para ser concatenados y transportados en una sola oportunidad de transmisión o región de datos, según lo mostrado en la Figura 3.5.

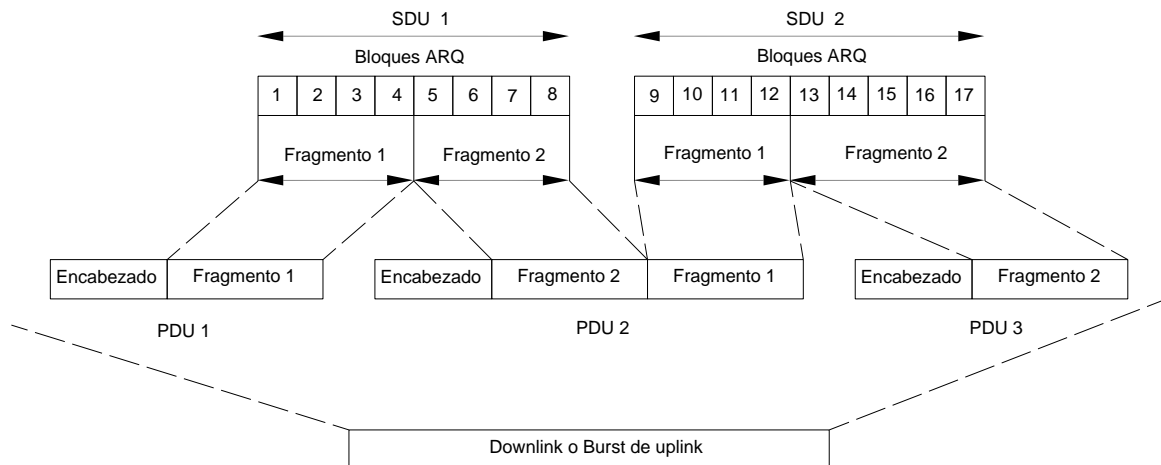


Figura 3.5. Fragmentación y concatenación de SDUs en MAC PDUs.

Las regiones de datos del *uplink* y *downlink* de una SS son un conjunto de *slots* adyacentes reservados para sus oportunidades de transmisión. Para las conexiones que no usan ARQ, cada fragmento del SDU se transmite en secuencia. Para las conexiones que usan ARQ, el SDU primero se fragmenta en bloques ARQ de longitud fija, y se les asigna un número secuencial de bloque (BSN) de ARQ. La longitud de los bloques de ARQ es especificada por la BS para cada CID, usando el parámetro ARQ-BLOCK-SIZE. Si la longitud del SDU no es un múltiplo de ARQ-BLOCK-SIZE, el último bloque ARQ se rellena. Después de que se fragmenta en bloques ARQ, el SDU se ensambla en MAC PDUs según lo mostrado en la Figura 3.5.

Para las conexiones que tienen habilitado el ARQ, el encabezado de fragmentación y empaquetado contiene el BSN del primer bloque de ARQ y del siguiente. La retroalimentación ARQ del receptor viene en forma de ACK (*acknowledgment*), indicando la recepción apropiada de los bloques de ARQ. Esta retroalimentación se envía como un MAC PDU independiente o como *piggyback* en la carga útil de una MAC PDU normal. En el estándar 802.16, la retroalimentación de ARQ puede estar en la forma de ACK selectivo o de ACK acumulativo. Un ACK selectivo, para un BSN dado, indica que el bloque de ARQ se ha recibido sin errores. Por otra parte, un ACK acumulativo, para un BSN dado, indica que todos los bloques con números de serie menores o iguales al BSN se han recibido sin error.

3.9 Formatos MAC PDU

Después de encapsular los paquetes en MAC SDUs, estos son encapsulados nuevamente en MAC PDUs. El MAC PDU debe tener el formato que se ilustra en la Figura 3.6. Cada PDU debe comenzar con un encabezado MAC genérico de longitud fija (6 *bytes*). El encabezado del MAC PDU puede estar seguido de un *Payload*. Si éste está presente, puede contener cero o más SDUs o fragmentos de éstos, y en su caso, puede contener también los subencabezados correspondientes.

La información del *Payload* puede variar en longitud, así que un MAC PDU puede representar un número variable de bytes. Ésta técnica permite a la capa MAC hacer un túnel para varios tipos de tráfico de capa superior, sin necesidad de conocer el formato o patrones de bits de sus mensajes. El MAC PDU también puede contener un CRC (*Cyclic Redundancy Check*), pero su implementación es responsabilidad de las capas PHY SCa, OFDM y OFDMA según sea el caso.

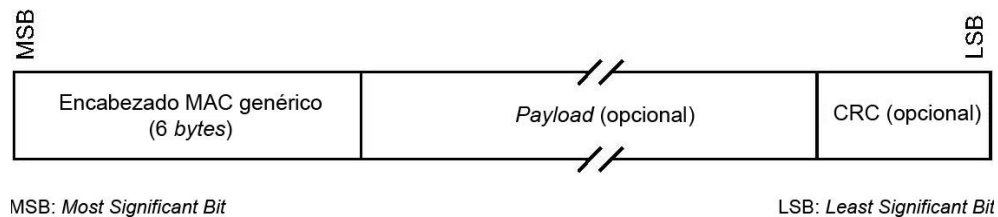


Figura 3.6. Formato MAC PDU.

3.9.1 Encabezados MAC genérico (*Generic MAC Header - GMH*)

Existe un encabezado DL MAC definido, que es un encabezado MAC genérico, el cual encabeza todos los MAC PDU que contienen mensajes MAC administrativos o de datos CS. Y existen dos formatos de encabezado UL MAC; el primero es el encabezado MAC genérico, que, al igual que el encabezado de DL MAC, precede los MAC PDU (administrativos o CS), donde HT vale 0. El segundo tipo, es el encabezado sin payload donde HT vale 1, en este formato, el encabezado MAC no es seguido por ningún payload de MAC PDU ni CRC. En la Figura 3.7 se muestra el formato de encabezado MAC genérico, y los campos del encabezado MAC genérico se describen en la Tabla 3.3

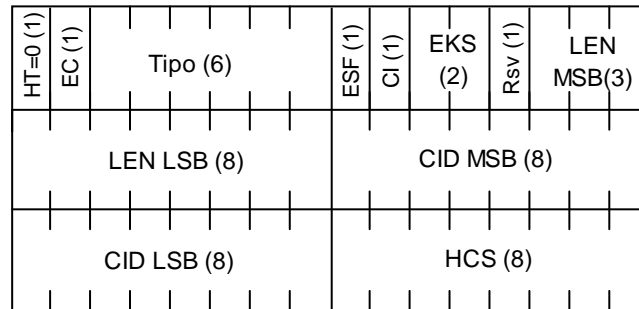


Figura 3.7 Formato de encabezado MAC genérico.

Tabla 3.3. Campos del GMH.

| Campo | Longitud (bits) | Descripción |
|-------|-----------------|---|
| CI | 1 | Indicador de CRC. 1 - se incluye CRC, agregándolo la <i>payload</i> después de la codificación, si la hay 0 - si no se incluye CRC |
| CID | 16 | Identificador de la conexión. |
| EC | 1 | Control de Codificación. 0 - la <i>payload</i> no está codificada 1 - la <i>payload</i> está codificada |
| EKS | 2 | Secuencia de llave de codificación. El índice de la llave de codificación del tráfico y el vector de inicialización utilizados para codificar la <i>payload</i> . Este campo solamente es útil si el campo EC=1. |

| | | |
|------|----|---|
| HCS | 8 | Secuencia de verificación de encabezado. Es un campo de 8 bits que se utiliza para detectar errores en el encabezado. |
| HT | 1 | Tipo de encabezado. Debe valer cero. |
| LEN | 11 | Longitud. Es la longitud en bytes de la MAC PDU, incluyendo el encabezado MAC y el CRC si existe. |
| Tipo | 6 | Indica los subencabezados y tipos de <i>payload</i> especiales, que están en el mensaje <i>payload</i> . |
| ESF | 1 | Campo extendido de subencabezado. Aplica en UL y DL. Todos los subencabezados no están codificados. 0 no hay existe. 1 entonces existe y va enseguida del GMH, y antes de otros subencabezados |

La definición del campo Tipo de la Figura 3.7 y Tabla 3.3 se muestra en la Tabla 3.4.

Tabla 3.4. Codificaciones de Tipo.

| bit Tipo | Valor |
|-----------------------------------|---|
| # 5 bit más significativo (MSB) | Subencabezado de Malla (Mesh). 1 - existe, 0 - no existe |
| # 4 | <i>Payload</i> de retroalimentación ARQ. 1 - existe, 0 - no existe |
| # 3 | Tipo Extendido. Indica si el encabezado que existe, de empaquetamiento o fragmentación es extendido. 1 - extendido 0 - no extendido. Aplica en conexiones donde ARQ está deshabilitado. |
| # 2 | Subencabezado de fragmentación. 1 - existe, 0 - no existe |
| # 1 | Subencabezado de empaquetamiento 1 - existe, 0 - no existe |
| # 0 bit menos significativo (LSB) | DL: subencabezado de asignación de retroalimentación rápida (<i>fast-feedback</i>) UL: subencabezado de Administración de asignaciones. 1 - existe, 0 - no existe |

Encabezado MAC sin payload

Este formato de encabezado aplica solamente a UL. El encabezado no es seguido por ningún payload de MAC PDU ni CRC. Existen tres tipos de encabezados de señalización MAC: el tipo I (para señalización), el tipo II (para solicitudes) y el tipo III (para retroalimentación).

a) Encabezado tipo I

En este tipo de encabezado no hay *payload* enseguida del encabezado MAC, su formato se muestra a continuación en la Figura 3.8, y en la Tabla 3.5 se muestra la codificación del campo Tipo (de 3 bits):

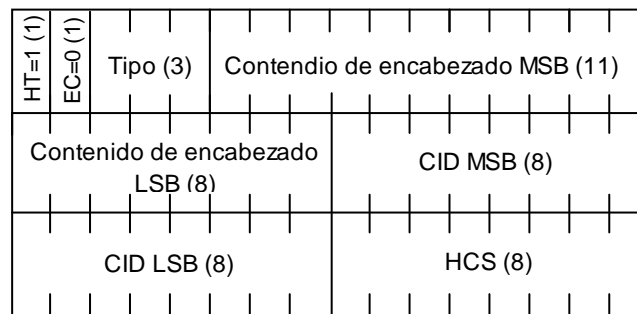


Figura 3.8. Encabezado de señalización MAC Tipo I.

Tabla 3.5 Codificaciones para el campo Tipo del encabezado de señalización MAC Tipo I.

| Campo Tipo (3 bits) | Tipo de encabezado MAC |
|---------------------|-----------------------------------|
| 000 | <i>BR incremental</i> |
| 001 | <i>BR aggregate</i> |
| 010 | <i>PHY channel report</i> |
| 011 | <i>BR with UL Tx Power Report</i> |
| 100 | <i>BR request and CINR report</i> |
| 101 | <i>BR with UL sleep control</i> |
| 110 | <i>SN Report</i> |
| 111 | <i>CQICH allocation request</i> |

Como puede observarse en la Tabla 3.5, existen varios encabezados de señalización MAC Tipo I. La Tabla 3.6 presenta una breve descripción de estos mensajes.

Tabla 3.6. Tipos de encabezado de señalización MAC Tipo I.

| Encabezado | Descripción |
|--|---|
| <i>BR incremental/aggregate</i> : Solicitud de ancho de banda | Se describe más detalladamente en el siguiente párrafo |
| <i>BR with UL Tx Power Report</i> : Solicitud de ancho de banda y Reporte de Potencia de transmisión en UL | La solicitud de ancho de banda es de tipo incremental En <i>UL Tx Power</i> se reporta el nivel en dBm de la potencia de transmisión UL de la ráfaga que lleva este encabezado |
| <i>BR request and CINR report</i> : Solicitud de ancho de banda y Reporte de CINR | Solicita ancho de banda CINR – indica el CINR medido por la MS desde la BS, en dB DCD* = 1 si la cuenta de cambios DCD de la MS no coincide con la recibida en el mensaje DL-MAP, si coincide es =0 |
| <i>CQICH allocation request</i> : Solicitud de ubicación del CQICH | Se indica el tipo de retroalimentación a utilizar Indica si la solicitud se hace durante el <i>handover</i> de cambio rápido de BS (FBSS) El periodo preferido (dado en unidades de <i>frame</i>) |
| <i>PHY channel report</i> : Reporte de canal Físico (PHY) | El soporte de este encabezado debe negociarse entre la BS y el MS Contiene el nivel de la potencia de transmisión UL |
| <i>BR with UL sleep control</i> : Solicitud de ancho de banda y control “sleep” UL | Solicitar ancho de banda Activar el modo para ahorrar energía |
| <i>SN Report</i> : Reporte de Número de secuencia. | Es enviado por la MS para reportar el LSB del siguiente # de secuencia ARQ* o el número de secuencia del MAC SDU virtual de la conexión activa, con retroalimentación SN habilitada. |

*DCD – Descriptor del canal DL (*DownLink Channel Descriptor*)

ARQ – Solicitud de repetición automática (*Automatic Repeat Request*)

b) Encabezado de Solicitud de ancho de banda (BR)

El PDU para solicitar ancho de banda sólo consiste de la solicitud y no debe contener *payload*. Si un SS recibe un encabezado de solicitud de ancho de banda en DL, debe descartar ese PDU. La Figura 3.9 muestra el formato del encabezado de BR.

El encabezado de la solicitud de ancho de banda debe tener las siguientes características:

- Es un encabezado de tipo señalización MAC
- El CID debe indicar la conexión UL para la que se solicita ancho de banda
- El campo BR debe indicar el tamaño en bytes del ancho de banda solicitado
- Los tipos permitidos para solicitud de ancho de banda se encuentran definidos en la Tabla 3.7.

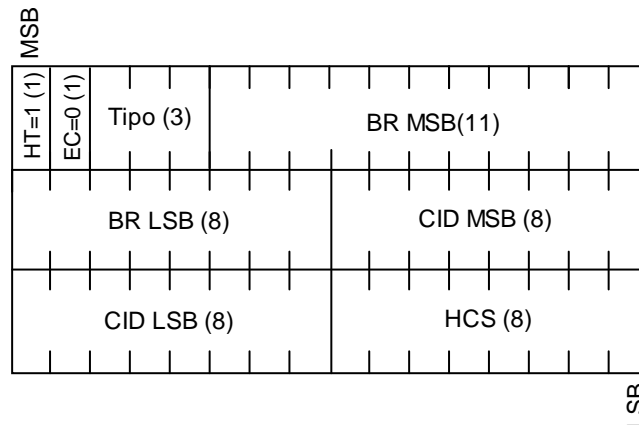


Figura 3.9. Formato de encabezado de solicitud de ancho de banda.

Tabla 3.7 Campos del encabezado de solicitud de ancho de banda.

| Campo | Longitud (bits) | Descripción |
|-------|-----------------|--|
| BR | 19 | Solicitud de ancho de banda. Número de bytes de ancho de banda UL solicitado por la SS. El ancho de banda solicitado es para el CID. Esta solicitud no debe incluir ningún overhead de PHY |
| CID | 16 | Identificador de la conexión |
| EC | 1 | Siempre con valor 0 |
| HCS | 8 | Secuencia de verificación de encabezado. Mismo uso que en la tabla 3. |
| HT | 1 | Tipo de encabezado = 1 |
| Tipo | 3 | Indica el tipo de encabezado de solicitud de ancho de banda |

c) Encabezado tipo II

En este tipo de encabezado es específico para UL, y no hay payload enseguida del encabezado MAC, su formato se muestra en la en la Figura 3.10, y en la Tabla 3.8 se muestran la codificación del campo Tipo (de 1 bit):

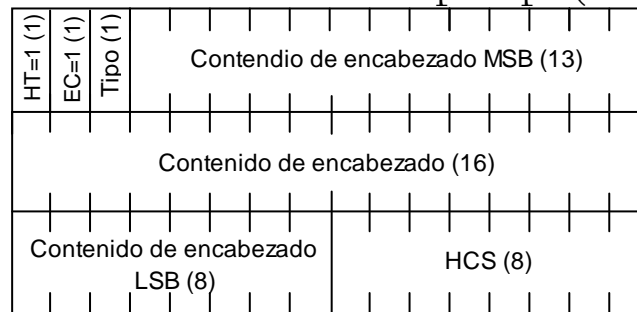


Figura 3.10 Encabezado de señalización MAC Tipo II.

Tabla 3.8. Codificación del campo Tipo del encabezado de señalización MAC Tipo II.

| Encabezado | Tipo encabezado MAC (con HT/EC=0b11) |
|------------|--|
| 0 | Encabezado de retroalimentación, que incluye otro campo tipo de 4 bits para definir sus codificaciones |
| 1 | Reservado |

Como puede observarse en la Tabla 3.8, existen un sólo tipo de encabezado de señalización MAC Tipo II, el de Retroalimentación, que a su vez tiene varios formatos.

El encabezado de retroalimentación es enviado por la MS ya sea como respuesta de Poleo de retroalimentación o al subencabezado de la solicitud de retroalimentación o como una retroalimentación no solicitada. El PDU de retroalimentación debe consistir solamente del encabezado de retroalimentación y no contener payload. El encabezado de retroalimentación existe con el campo CID y sin el campo CID. También existe el encabezado de retroalimentación para Canal MIMO, se puede utilizar para proporcionar una retroalimentación de canal simple o compuesto. Este encabezado también tiene los formatos con CID y sin CID.

3.9.2 Mensajes de control MAC (MAC Management Messages)

Los mensajes de administración o control (MAC Management Message) son insertados en el Payload del PDU y comienzan con un campo Tipo que especifica el tipo de mensaje como se señala en la Figura 3.11. Seguido al campo Tipo va el cuerpo del mensaje de control (Payload). La Tabla 3.9 presenta los mensajes de control usados por el protocolo IEEE 802.16.

| | | |
|-----------------------------------|---|---------|
| Encabezado MAC genérico (6 bytes) | Subencabezado MAC de control (MAC Management Message) | |
| | Tipo de Mensaje de Control | Payload |

Figura 3.11. Formato para los mensajes de control.

Tabla 3.9 Mensaje de Control MAC.

| Tipo | Nombre del Mensaje | Descripción | Conexión |
|------|--------------------|--|--------------------------|
| 0 | UCD | Descriptor de Canal Ascendente (Uplink Channel Descriptor) | Broadcast |
| 1 | DCD | Descriptor de Canal Descendente (Downlink Channel Descriptor) | Broadcast |
| 2 | DL-MAP | Definición de Acceso Descendente (Downlink Access Definition) | Broadcast |
| 3 | UL-MAP | Definición de Acceso Ascendente (Uplink Access Definition) | Broadcast |
| 4 | RNG-REQ | Solicitud de Ranging (Ranging Request) | Initial Ranging o Básica |
| 5 | RNG-RSP | Respuesta de Ranging (Ranging Response) | Initial Ranging o Básica |
| 6 | REG-REQ | Solicitud de Registro (Registration Request) | Control Primario |
| 7 | REG-RSP | Respuesta de Registro (Registration Response) | Control Primario |
| 8 | Reservado | | |
| 9 | PKM-REQ | Solicitud de Control de Llave de Privacidad (Privacy Key Management Request) | Control Primario |
| 10 | PKM-RSP | Respuesta de Control de Llave de Privacidad (Privacy Key Management Response) | Control Primario |
| 11 | DSA-REQ | Solicitud de Agregación Dinámica de Servicio (Dynamic Service Addition Request) | Control Primario |
| 12 | DSA-RSP | Respuesta de Agregación Dinámica de Servicio (Dynamic Service Addition Response) | Control Primario |

| | | | |
|----------|------------|--|------------------|
| 13 | DSA-ACK | Notificación de Agregación Dinámica de Servicio (Dynamic Service Addition Acknowledge) | Control Primario |
| 14 | DSC-REQ | Solicitud de Cambio Dinámico de Servicio (Dynamic Service Change Request) | Control Primario |
| 15 | DSC-RSP | Respuesta de Cambio Dinámico de Servicio (Dynamic Service Change Response) | Control Primario |
| 16 | DSC-ACK | Notificación de Cambio Dinámico de Servicio (Dynamic Service Change Acknowledge) | Control Primario |
| 17 | DSD-REQ | Solicitud de Eliminación Dinámica de Servicio (Dynamic Service Deletion Request) | Control Primario |
| 18 | DSD-RSP | Respuesta de Eliminación Dinámica de Servicio (Dynamic Service Deletion Response) | Control Primario |
| 19 | Reservado | | |
| 20 | Reservado | | |
| 21 | MCA-REQ | Solicitud de Asignación Multicast (Multicast Assignment Request) | Básica |
| 22 | MCA-RSP | Respuesta de Asignación Multicast (Multicast Assignment Response) | Básica |
| 22 | MCA-RSP | Respuesta de Asignación Multicast (Multicast Assignment Response) | |
| 23 | DBPC-REQ | Solicitud de Cambio de Configuración de Transmisión Descendente (Downlink Burst Profile Change Request) | |
| 24 | DBPC-RSP | Respuesta de Cambio de Configuración de Transmisión Descendente (Downlink Burst Profile Change Response) | |
| 25 | RES-CMD | Comando de reinicio (Reset Command) | |
| 26 | SBC-REQ | Solicitud de Capacidad Básica en Estación Suscriptora (SS Basic Capability Request) | |
| 27 | SBC-RSP | Respuesta de Capacidad Básica en Estación Suscriptora (SS Basic Capability Response) | |
| 28 | CLK-CMP | Comparación de Reloj de Red en Estación Suscriptora (SS Network Clock Comparison) | Broadcast |
| 29 | DREG-CMD | Comando de Término o Renovación de Registro (De/Re-register Command) | Básica |
| 30 | DSX-RVD | Mensaje Recibido DSx (DSx Received Message) | Control Primario |
| 31 | TFTP-CPLT | Mensaje de Configuración Completada de Archivo TFTP (Config File TFTP Complete Message) | Control Primario |
| 32 | TFTP-RSP | Respuesta de Configuración Completada de Archivo TFTP (Config File TFTP Complete Response) | Control Primario |
| 33 – 255 | Reservados | | |

Entre todos los tipos de mensajes de control los siguientes dos muestran relevancia:

Mensaje *Downlink Map* (DL-MAP): Define el acceso a la información para el enlace de bajada. Especifica cuando se realizarán las transiciones de la capa física dentro del subframe *downlink*.

Mensaje *Uplink MAP* (UL-MAP): Asigna el acceso al enlace de subida. Define el lugar de transmisión para cada SS, así como también el lugar para los periodos de contienda utilizados para las operaciones de mantenimiento inicial y las solicitudes de ancho de banda.

A continuación se presenta una descripción del contenido de los mensajes de control más usados por el estándar 802.16.

Mensaje Descriptor del Canal Descendente (DCD)

Este mensaje es enviado periódicamente por la BS, el mensaje DCD especifica las características del canal físico de transmisión descendente mediante los siguientes parámetros:

- Contador de Cambio de Configuración (*Configuration Change Count*): Incrementado en uno (módulo 256) cada vez que cambia alguno de los valores del canal. Permite a la BS ignorar el resto del mensaje cuando el valor de este campo es igual al anterior.
- Identificador del Canal Descendente (*Downlink Channel ID*): Funciona como identificador del canal para operaciones específicas tales como Ranging.

Los parámetros que describen físicamente al canal se especifican en el formato TLV (Tipo/Longitud/Valor), preceden a las codificaciones particulares del Perfil de Transmisión Descendente (Downlink Burst Profile), e incluyen los siguientes:

- Número de Canal de RF (*RF Channel number*): Desde 0 hasta el número máximo de canales soportados por el sistema.
- Tasa de Símbolo (*Symbol Rate*): De 16 a 40 Mbaud.

- Número de configuraciones activas (*Number of active PHY burst profiles*): De 1 a 13.
- Inicio de la región activa en la trama (*Start active region in frame*): De 0 a 65535 símbolos.
- Fin de la región activa en la trama (*End Active Region in Frame*): De 0 a 65535 símbolos. El Perfil de Transmisión Descendente está compuesto por elementos TLV que definen las características físicas empleadas en un Código de Uso de Intervalo Descendente DIUC (*Downlink Interval Usage Code*). Cada uno de estos intervalos están asignados por el mensaje DL-MAP.

Mensaje de Mapa del Canal Descendente (DL-MAP)

Este mensaje define los parámetros para el acceso a la información en el canal descendente. Para este mensaje se Incluye la siguiente información:

- Sincronización física (*PHY Synchronization*): Depende de la especificación de la capa física.
- Contador DCD (*DCD Count*): Indica el valor del contador de cambios del DCD, que describe el Perfil de Transmisión Descendente.
- Identificador de la estación base (*Base Station ID*): Consta de 48 bits, de los cuales 24 constituyen un identificador de operación que al combinarse con el Identificador de Canal Descendente del mensaje DCD permite atender situaciones como borde de sector o borde de celda.
- Número de Elementos (*Number of Elements*): Indica la cantidad de Elementos de Información, IE (*Information Elements*) que están incluidos en el mensaje.

Mensaje Descriptor del Canal Ascendente (UCD)

Transmitido periódicamente por la BS, el mensaje UCD indica las características de un canal ascendente en particular. Debe transmitirse uno para cada canal asociado al descendente. Este mensaje Incluye la información que se presenta a continuación:

- Contador de Cambio de Configuración (*Configuration Change Count*): El valor de este campo se incrementa en uno módulo 256 cada vez que ha ocurrido un cambio en la configuración del canal. Permite a las SS's ignorar el resto del mensaje en caso de que este campo no haya cambiado de valor.
- Tamaño de ranuras (*Mini-slot Size*): Indica el número de ranuras físicas que equivalen a una ranura en el canal ascendente.
- Identificador del Canal Ascendente (*Uplink Channel ID*): Este parámetro especifica el canal ascendente al que se refiere el mensaje UCD.
- Inicio de Backoff en Ranging (*Ranging Backoff Start*). Tamaño de la ventana inicial para la resolución de colisiones mediante el algoritmo exponencial Backoff durante un periodo de Ranging. Se expresa en potencia de 2 y varía entre 0 y 15.
- Fin de Backoff en Ranging (*Ranging Backoff End*). Tamaño de la ventana límite para la resolución de colisiones mediante el algoritmo exponencial Backoff durante un periodo de Ranging. Se expresa en potencia de 2 y varía entre 0 y 15.
- Inicio de Backoff en Solicitud (*Request Backoff Start*). Tamaño de la ventana inicial para la resolución de colisiones mediante el algoritmo exponencial Backoff durante un periodo de contención de solicitud de asignación de ancho de banda. Se expresa en potencia de 2 y varía entre 0 y 15.
- Inicio de Backoff en Ranging (*Ranging Backoff Start*). Tamaño de la ventana límite para la resolución de colisiones mediante el algoritmo exponencial Backoff durante un periodo de Ranging. Se expresa en potencia de 2 y varía entre 0 y 15.

En la Tabla 3.10 se incluyen los parámetros específicos que describen al canal de acuerdo con una codificación TLV (Tipo-Longitud-Valor).

Tabla 3.10 Codificaciones TLV Parámetros descriptores para el canal Descendente.

| Nombre | Tipo | Longitud (bytes) | Valor |
|--|------|------------------|--|
| Perfil de Transmisión Ascendente | 1 | | Puede aparecer varias veces |
| Tasa de Símbolo | 2 | 2 | En incrementos de 10 kBaud |
| Frecuencia | 3 | 4 | Frecuencia central del enlace ascendente en kHz |
| Espacio de Transición en SS | 7 | 1 | Tiempo transcurrido en Ranuras Físicas entre el final de una transmisión de la SS y el inicio de una subsiguiente en la BS. Se considera al determinar la longitud de la transmisión |
| Factor de roll-off | 8 | 1 | 0 = 0.15, 1 = 0.25, 2 = 0.35 |
| Regla de Ajuste de Potencia | 9 | 1 | Se considera al realizarse una transición de un perfil de transmisión a otro. 0 = Conservar la potencia máxima 1 = Conservar la potencia media |
| Tiempo máximo de espera para Reservaciones en Contención | 10 | 1 | Cantidad de UL-MAPs para esperar antes de reintentar una solicitud de reservación de ancho de banda |

En el caso de los sistemas que emplean la banda de 10 a 66 GHz, los códigos TLV de los mensajes UCD es el que se presenta en la Tabla 3.11.

Tabla 3.11 Codificaciones TLV Parámetros descriptores para el canal Descendente (Banda 10-66 GHz).

| Nombre | Tipo | Longitud (bytes) | Valor |
|--|------|------------------|--|
| Tipo de Modulación | 1 | 1 | 1 = QPSK, 2 = 16-QAM 3 = 64-QAM |
| Longitud de preámbulo | 4 | 1 | Símbolos en el preámbulo del UL-MAP en Ranuras Físicas |
| Tipo de codificación FEC | 5 | 1 | 1 = Reed – Solomon 2 = Reed – Solomon + Código Convolutacional de Bloque (BCC) (24,16) 3 = Reed – Solomon + Código de Chequeo de Paridad (9,8) 4 = Turbocódigo de Bloque (opcional) 5 – 255 = Reservados |
| Bytes de información RS (K) | 6 | 1 | K = 6 – 255 |
| Bytes de paridad RS (R) | 7 | 1 | R = 0 – 32 (Capacidad de corrección T = 0 – 16) |
| Tipo de codificación BCC | 8 | 1 | 1 = (24,16) 2 – 255 = Reservados |
| Tipo de codificación BTC de fila | 9 | 1 | 1 = (64,57) Hamming extendido 2 = (32,26) Hamming extendido 3 – 255 = Reservados |
| Tipo de codificación BTC de columna | 10 | 1 | 1 = (64,57) Hamming extendido 2 = (32,26) Hamming extendido 3 – 255 = Reservados |
| Tipo de <i>interleaving</i> BTC | 14 | 1 | 1 = Sin interleaving 2 = Interleaving de bloque 3 – 255 = Reservado |
| <i>Scrambler seed</i> | 15 | 2 | Valor de 15 bits (más significativos en el campo de 16) |
| Longitud de la última palabra codificada | 17 | 1 | 1 = Fija 2 = Reducida |

Mensaje Mapa del Canal Ascendente (UL-MAP)

Este mensaje revela información relativa al acceso al canal ascendente. En él se incluye lo siguiente:

- Identificador del Canal Ascendente (*Uplink Channel ID*): Referencia al canal ascendente que describe el mensaje.
- Contador UCD (*UCD Count*): Corresponde al valor del campo Contador de Cambio de Configuración del mensaje UCD para especificar el perfil de configuración del canal ascendente que aplica para este mapa.
- Número de elementos (*Number of Elements*): Cantidad de Elementos de Información IE (*Information Elements*) incluidos en el mensaje.
- Tiempo de Inicio de Asignación (*Alloc Start Time*): Instante del comienzo efectivo de la asignación del canal ascendente especificado por el MAP en unidades de minislots.
- Elementos de Información de Mapa (Map Information Elements). Son los campos que definen la asignación del ancho de banda para el canal ascendente. En cada UL-MAP debe estar incluido al menos un IE, el correspondiente a la indicación del fin de asignación de ancho de banda. El orden de los IE es estrictamente cronológico. Cada uno de ellos consta de la siguiente información:
 - CID. Identificador de conexión.
 - UIUC. Código de Uso del Intervalo Ascendente (*Uplink Interval Usage Code*).
 - Desplazamiento (*Offset*). Indicador del inicio del intervalo en minislots.

El CID indica que la asignación del IE se ha hecho hacia una dirección Unicast, Multicast o Broadcast. Cuando el IE se refiere exclusivamente a una asignación de ancho de banda, el CID puede referirse a una SS en particular, o bien a un CID de transporte correspondiente a alguna de las conexiones establecidas por la SS. La Tabla 3.12 muestra los posibles IE's que pueden incluirse en un Mapa.

Tabla 3.12. IEs de los mensajes del Mapa de control.

| Nombre del IE | UIUC | Tipo de conexión | Descripción |
|--------------------------------------|---------|------------------|---|
| Reservado | 0 | N/A | Reservado para uso futuro |
| Solicitud | 1 | Cualquiera | Offset inicial de la región de solicitud |
| Mantenimiento Inicial | 2 | <i>Broadcast</i> | Offset inicial de la región de mantenimiento (empleado en el <i>Ranging</i> inicial) |
| Mantenimiento de Estación | 3 | <i>Unicast</i> | Offset inicial de la región de mantenimiento (empleado en el <i>Ranging</i> periódico) |
| Reservación de Flujo de Datos Tipo 1 | 4 | <i>Unicast</i> | Offset inicial de la reservación de flujo de datos Tipo 1 |
| Reservación de Flujo de Datos Tipo 2 | 5 | <i>Unicast</i> | Offset inicial de la reservación de flujo de datos Tipo 2 |
| Reservación de Flujo de Datos Tipo 3 | 6 | <i>Unicast</i> | Offset inicial de la reservación de flujo de datos Tipo 3 |
| Reservación de Flujo de Datos Tipo 4 | 7 | <i>Unicast</i> | Offset inicial de la reservación de flujo de datos Tipo 4 |
| Reservación de Flujo de Datos Tipo 5 | 8 | <i>Unicast</i> | Offset inicial de la reservación de flujo de datos Tipo 5 |
| Reservación de Flujo de Datos Tipo 6 | 9 | <i>Unicast</i> | Offset inicial de la reservación de flujo de datos Tipo 6 |
| IE nulo | 10 | Ninguna | Offset final de la reservación anterior. Empleado para acotar la longitud de la última asignación |
| Vacío | 11 | Ninguna | Empleado para incluir espacios en la transmisión |
| Reservado | 12 – 15 | N/A | Reservados |

Mensaje de Solicitud de Ranging (RNG-REQ) y Respuesta de Ranging (RNG-RSP)

El mensaje de Solicitud de *Ranging* es transmitido por la SS durante la inicialización de la conexión, o bien periódicamente cuando lo indica la BS, con la finalidad de realizar modificaciones en la potencia de transmisión y en los perfiles de transmisión descendentes.

Al recibir el mensaje RNG-REQ, la BS contesta con RNG-RSP, el cual incluye información de ajuste de sincronía, potencia y frecuencia, así como del estado del proceso de *Ranging*. También puede incluir los CID Básico y Primario así como la dirección MAC de la SS durante el *Ranging* Inicial.

Mensaje de Solicitud de Registro (REG-REQ) y Respuesta de Registro (REQ-RSP)

El mensaje REG-REQ es enviado por la SS durante la inicialización del servicio con la finalidad de informar a la BS sobre sus capacidades particulares como el número de CID's que puede soportar (al menos tres, correspondientes a las conexiones Básica, Primaria y Secundaria), así como la Secuencia Numérica de la Llave HMAC (*Hashed Message Authentication Code*). No está incluida la información sobre el soporte de parámetros físicos o la asignación de ancho de banda.

En respuesta, la BS transmitirá el mensaje REG-RSP que indica si la autenticación del mensaje fue exitosa o no, el CID para la Conexión Secundaria con la SS, la versión MAC empleada, el código HMAC, así como una enumeración de las capacidades de la SS. Lo anterior sirve para confirmar el soporte de la BS para las capacidades que ha informado la SS.

3.10 Concatenación

Múltiples MAC PDUs pueden ser concatenados dentro de la misma ráfaga de transmisión, ya sean de la misma conexión e incluso de diferentes conexiones y tanto para el canal UL como para el canal DL. Cada MAC PDU es identificado por un CID único, de esta manera; la capa MAC de la entidad receptora es capaz de entregar el MAC SDU a su correcta instancia de la subcapa MAC CPS (después de desencapsularlo y/o reensamblarlo de uno o más MAC PDUs). Tanto los mensajes de administración MAC, datos de usuario y *BW-Requests* pueden ser concatenados dentro de la misma ráfaga de transmisión. En la Figura 3.12 se ilustra este concepto para ráfagas de transmisión en el canal UL.

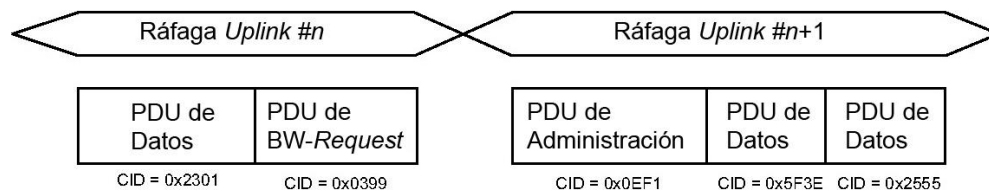


Figura 3.12. Concatenación de múltiples MAC PDUs en el canal UL.

3.11 Fragmentación

Fragmentación es el proceso mediante el cual un MAC SDU, es segmentado y encapsulado dentro de varios MAC PDUs. Este proceso es realizado para permitir el uso eficiente del ancho de banda disponible, relativo a los requerimientos de QoS del flujo de servicio de la conexión.

La autoridad encargada de fragmentar el tráfico en una conexión es definida cuando la conexión es creada en la capa MAC. La fragmentación debe ser iniciada por la BS para las conexiones en el canal DL y por la SS para las conexiones en el canal UL.

3.12 Empaquetamiento

Si el empaquetamiento está habilitado en una conexión, la capa MAC puede empaquetar múltiples MAC SDUs (de la misma conexión) en un MAC PDU. Este proceso se puede realizar tanto para MAC SDUs de longitud fija, como para MAC SDUs de longitud variable.

3.13 Formato del Subframe UL y DL

Para el sistema TDD, las ráfagas deben ser colocadas en regiones de datos dentro de los *subframes uplink* y *downlink* según sea el caso. Dichas regiones tienen que ser mapeadas en estos *subframes* para que las SSs puedan localizar y dimensionar las regiones de datos que les corresponden. En las cuales deben colocar sus ráfagas de transmisión (en el caso del *subframes uplink*) u obtener sus ráfagas de datos (en el caso del *subframes downlink*).

Lo anterior se realiza al inicio de cada *frame* mediante el DL-MAP y el UL-MAP, los cuales contienen apuntes a las regiones de datos que le corresponden a cada SS (IEs). Las regiones de datos son dimensionadas de forma diferente para los *subframes uplink* y *downlink* (según lo especifica el estándar IEEE 802.16). Por lo tanto el tamaño de los IEs también es diferente, mientras en el UL-MAP tienen un tamaño de 32 *bits*, en el DL-MAP tienen un tamaño de 60 *bits*. Además, los IEs que definen las regiones de *ranging* tienen un tamaño de 7 *bytes*, como se muestra en la Figura 3.13.

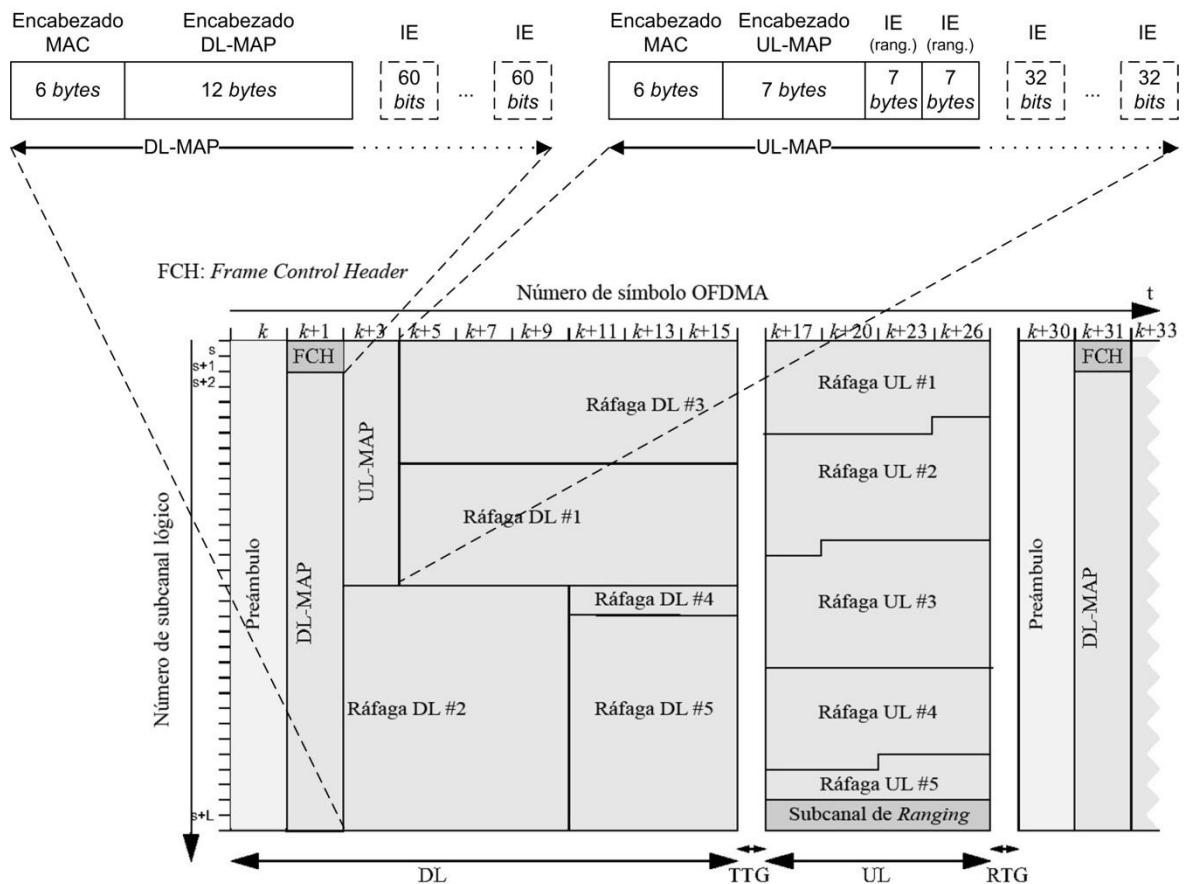


Figura 3.13. Formato del UL-MAP y DL-MAP.

3.14 QoS

El estándar IEEE 802.16 especifica que la QoS se debe proporcionar para el tráfico en ambos canales (*uplink* y *downlink*), considerando los diferentes protocolos de capa superior entre la SS y la BS.

El principal mecanismo para proporcionar QoS, es asociar los paquetes que atraviesan la capa MAC en flujos de servicio identificados por un SFID. La SS y la BS proveen ésta QoS de acuerdo con un conjunto de parámetros de QoS, que son definidos en el flujo de servicio.

El principal propósito de las características de QoS, es definir un orden de transmisión y programación de paquetes en la interface de aire. Sin embargo, estas características necesitan trabajar en conjunción con mecanismos más allá de la interface de aire, con el propósito de proporcionar QoS punto a punto.

3.14.1 Flujos de servicio

Un flujo de servicio es un transporte unidireccional de paquetes en capa MAC, ya sea en el canal *uplink* (para los paquetes transmitidos por la SS), o en el canal *downlink* (para los paquetes transmitidos por la BS). También, puede existir sin estar activado para transportar tráfico. Los flujos de servicio están caracterizados por un conjunto de parámetros de QoS, tales como latencia, *jitter* y *throughput* garantizado. Con el propósito de estandarizar la operación entre la SS y la BS, éstos atributos incluyen detalles de cómo las SS solicitan asignaciones de ancho de banda en el canal *uplink* y el comportamiento esperado del *scheduler uplink* en la BS.

Una característica importante de un flujo de servicio, es que tienen un identificador de 32 *bits* (SFID), que es asignado a cada flujo de servicio existente. El SFID sirve como el principal identificador para los flujos de servicio en la red. Un flujo de servicio tiene al menos un SFID y una dirección asociada (*uplink* o *downlink*). Los flujos de servicio también están caracterizados por estar mapeados con una conexión, es decir; tienen asociado un CID de 16 *bits*, sólo cuando el flujo de servicio fue admitido por el mecanismo de Control de Admisión (CA) y está activo.

Los flujos de servicio tienen básicamente tres estados:

- 1) Provisionado: En este estado, el flujo de servicio es conocido como de abastecimiento, es decir; existe pero todavía no es admitido por el mecanismo de CA y por lo tanto no está activo.
- 2) Admitido: El flujo de servicio tiene recursos de transmisión reservados por la BS, es decir; ya fue admitido por el mecanismo de CA pero todavía no está activo.
- 3) Activo: En este estado, el flujo de servicio tiene recursos de transmisión comprometidos con la BS, por ejemplo, se envían continuamente mapas conteniendo asignaciones no solicitadas de ancho de banda (UGS). En este estado, el flujo de servicio proporciona el transporte de datos a través de la capa MAC.

3.14.2 Modelo de objetos

Los objetos principales del modelo son representados por sus nombres dentro de rectángulos, como se muestra en la Figura 3.14 . Cada objeto tiene un número de atributos y el nombre del atributo que identifican de manera única al objeto está subrayado. Los atributos opcionales son denotados entre corchetes. La relación entre el número de objetos es marcada al final de cada línea de asociación entre los objetos. Por ejemplo, un flujo de servicio puede estar asociado con 0 a N (muchos) PDUs, pero un PDU está asociado con exactamente un flujo de servicio. El flujo de servicio es el concepto central de la capa MAC. Un flujo de servicio puede estar definido en una dirección *uplink* o en una dirección *downlink*, pero no en ambas. Los flujos de servicios admitidos y activos, son mapeados por un CID de 16 *bits*.

Los paquetes de datos provenientes de las aplicaciones de los usuarios son presentados en la capa MAC mediante la subcapa CS. La capa MAC clasifica los paquetes de acuerdo a su flujo de servicio y les proporciona un servicio de transporte en su interface, basándose en el SFID. El flujo de servicio incluye el CID, que identifica la conexión a través de la cual los datos serán transmitidos en capa PHY.

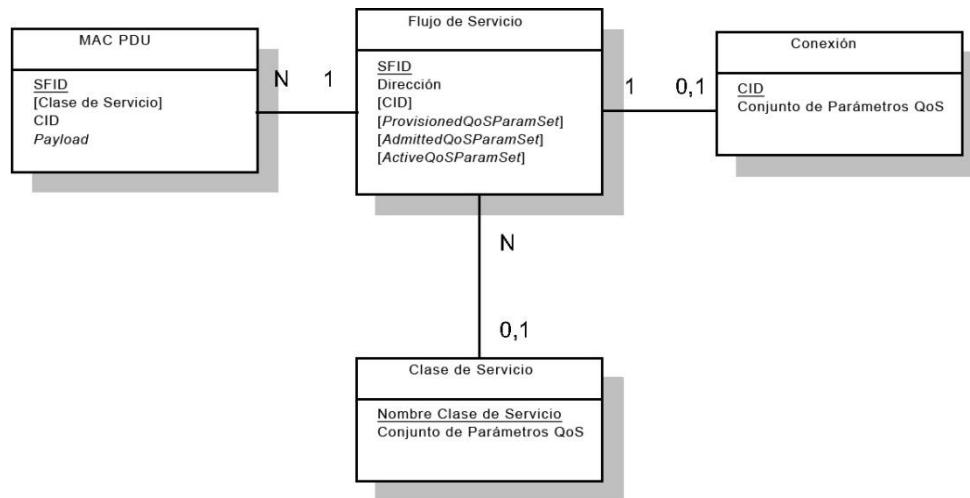


Figura 3.14. Modelo de objetos de QoS.

Básicamente los flujos de servicio sirven para el transporte de datos en capa MAC, mientras que las conexiones realizan éste transporte en capa PHY. Ambos trasportes atendiendo a un conjunto de parámetros de QoS. Estos parámetros, están sincronizados en capa MAC y en capa PHY, mediante la asociación y el mapeo del SFID con el CID.

La clase de servicio es un objeto opcional que puede ser implementado en la BS. La clase de servicio es definida en la BS, para tener un conjunto particular de parámetros de QoS. Dicho conjunto es referenciado por un nombre, y es en realidad un subconjunto de los parámetros de QoS de uno o varios flujos de servicio. Los parámetros de QoS de los flujos de servicio, pueden contener una referencia hacia el nombre de la clase de servicio, para seleccionar todos sus parámetros de QoS.

3.14.3 Clases de servicio

Las clases de servicio tienen el propósito de permitir a los operadores de red (si así lo desean), mover las configuraciones de los flujos de servicio desde servidor que las provee, hacia la BS. Los operadores proveen a las SSs con el nombre de la clase de servicio. La implementación de este nombre es configurada en la BS. Esto permite a los operadores de red, modificar la implementación de un servicio dado, en base a las circunstancias locales sin cambiar las configuraciones en la SSs. Por ejemplo para proporcionar el mismo servicio, algunos parámetros de los *schedulers* podrían necesitar ser

modificados ligeramente para dos BSs diferentes. Como otro ejemplo, los perfiles de servicio, podrían ser cambiados dependiendo de la hora del día.

También, las clases de servicio permiten a los protocolos de capa superior, crear un flujo de servicio en base al nombre de una clase de servicio. Por ejemplo, la señalización en la telefonía, puede instanciar directamente en la SS, cualquier flujo de servicio disponible de la clase “G711” (correspondiente a un codificador de voz G.711).

El protocolo IEEE 802.16 define cuatro formas de reservar recursos para los flujos de servicio, los cuales se describen a continuación.

a) UGS: Unsolicited Grant Service

Diseñado para soportar flujos de servicio en tiempo real, que transportan paquetes de datos de tamaño fijo en periodos constantes, tales como enlaces T1/E1 y VoIP sin supresión de silencios. Este servicio ofrece asignaciones de tamaño fijo en tiempo real y en periodos constantes, eliminando la necesidad de realizar solicitudes de ancho de banda por parte de la SS, garantizando que las reservaciones estarán disponibles durante el tiempo de vida del flujo de servicio. La BS provee éstas reservaciones en base a la máxima tasa de tráfico sostenida del flujo de servicio. El tamaño de las asignaciones debe ser suficiente para soportar la longitud del tamaño de los paquetes de datos (considerando los encabezados de capa MAC). Con el propósito de que éste servicio funcione correctamente, la SS tienen prohibido usar los periodos de contención para realizar solicitudes de ancho de banda.

Los parámetros necesarios de éste servicio son: 1) la máxima tasa de tráfico sostenida, 2) la latencia máxima, 3) el *jitter* tolerado y 4) una política de solicitud/transmisión. Si está presente el parámetro de la mínima tasa de tráfico reservada, debe tener el mismo valor que el parámetro de la máxima tasa de tráfico sostenida.

b) rtPS: real time Polling Service

Este servicio está diseñado para soportar flujos de servicio en tiempo real, que transportan paquetes de datos de tamaño variable, tales como video MPEG. El servicio ofrece oportunidades periódicas de solicitar reservaciones de ancho de banda, conociendo las necesidades de los flujos de servicio en

tiempo real y permite a la SS especificar el tamaño de las reservaciones deseadas. Éste servicio requiere que la SS continuamente realice solicitudes de ancho de banda, provocando más gasto de recursos en las solicitudes y sus encabezados, pero soporta tamaños variables de reservaciones para un óptimo y eficiente transporte de datos. La BS proporciona periódicamente oportunidades *unicast* para transmitir las solicitudes de ancho de banda. Con el propósito de que éste servicio funcione correctamente, la política de solicitud/transmisión debe ser tal, que la SS tiene prohibido usar cualquier periodo de contención para realizar solicitudes de ancho de banda para su conexión.

Los parámetros necesarios de éste servicio son: 1) la mínima tasa de tráfico reservada, 2) la máxima tasa de tráfico sostenida, 3) la máxima latencia y 4) una política de solicitud/transmisión.

c) ertPS: Extended real time Polling Service

Este es una versión extendida del servicio rtPS (es decir, *extended* rtPS). Está diseñado en base al servicio UGS y al servicio rtPS. La BS proporciona asignaciones *unicast* no solicitadas, de la misma manera que UGS, así evita la latencia en las solicitudes de ancho de banda. Sin embargo, mientras en UGS las reservaciones son de tamaño fijo, en ertPS son dinámicamente de tamaño variable. La BS proporciona reservaciones periódicas que pueden ser usadas para solicitar ancho de banda o para transferencia de datos. De manera predeterminada, el tamaño de las reservaciones corresponde al valor actual de la máxima tasa de tráfico sostenida, pero la SS puede solicitar que se cambie dicho tamaño enviando un mensaje a la BS. La BS no cambiará el tamaño de las reservaciones hasta que reciba otro mensaje de la SS, solicitando que se cambie dicho tamaño. Cuando el tamaño de las reservaciones es cero, la BS debe proporcionar reservaciones sólo para realizar solicitudes de ancho de banda. En caso de que no existan oportunidades *unicast* de solicitar ancho de banda, la SS puede usar el periodo de contención para realizar sus solicitudes.

Los parámetros necesarios de éste servicio son: 1) la máxima tasa de tráfico sostenida, 2) la mínima tasa de tráfico reservada, 3) la latencia máxima y 4) una política de solicitud/transmisión.

d) **nrtPS: non real time Polling Service**

Este tipo de servicio encuesta regularmente a la SS, para asegurarse que sus flujos de servicio reciban oportunidades de transmitir solicitudes de ancho de banda, incluso durante periodos de congestión de la red. La BS básicamente encuesta a las conexiones con servicio nrtPS, en intervalos del orden de un segundo o menos. La BS proporciona oportunidades *unicast* para realizar solicitudes de ancho de banda. Con el propósito de que éste servicio funcione correctamente, la política de solicitud/transmisión debe ser tal, que la SS esta permitida para usar los periodos de contención para enviar solicitudes de ancho de banda. Así, la SS puede utilizar las oportunidades *unicast* y los periodos de contención, para enviar sus solicitudes de ancho de banda.

Los parámetros necesarios de éste servicio son: 1) la mínima tasa de tráfico reservada, 2) la máxima tasa de tráfico sostenida, 3) la prioridad del tráfico y 4) una política de solicitud/transmisión.

e) **BE: Best Effort**

Este servicio intenta proporcionar un servicio de transporte de datos lo más eficientemente que se pueda, es decir; con el mejor esfuerzo posible. Con el propósito de que éste servicio funcione correctamente, la política de solicitud/transmisión es tal, que la SS tiene permitido usar cualquier oportunidad de transmitir una solicitud de ancho de banda en el periodo de contención. Como resultado de esto, la SS puede utilizar oportunidades *unicast* y los periodos de contención, para enviar sus solicitudes de ancho de banda. Los parámetros necesarios de éste tipo de servicio son: 1) la máxima tasa de tráfico sostenida, 2) la prioridad del tráfico y 3) una política de solicitud/transmisión.

3.15 Adquisición del canal

El protocolo MAC incluye un procedimiento de inicialización diseñado para eliminar la necesidad de una configuración manual. Después del proceso instalación, una SS comienza a explorar su lista de frecuencias de trabajo con el fin de encontrar un canal en operación. Cada UCD cuenta con un parámetro de identificación (ID) que permite distinguir a los canales

ascendentes entre sí. Al recibir el UCD, la estación suscriptora almacenará la información correspondiente y verificará la disponibilidad del canal. En caso de no poder usarlo, la SS buscará otro canal de acuerdo con los UCD que reciba. Al agotar los canales ascendentes, se reiniciará el proceso de la búsqueda de canal descendente. También puede estar programada para registrarse con una estación base específica utilizando el BS ID que es enviado periódicamente por cada BS. Esta función es muy útil en lugares con una infraestructura muy densa. En estos lugares una estación suscriptora puede escuchar a una estación secundaria debido a una atenuación de la señal primaria. También puede suceder que la SS alcance a captar un lóbulo lateral de la antena de la Estación Base más cercana.

Después de decidir el canal o los canales que se utilizarán para intentar establecer comunicación, la SS tratará de sincronizarse con el enlace descendente. Para ello tratará de detectar de manera periódica los preámbulos de cada trama. Después de que la SS ha sincronizado correctamente la capa física, comenzará a procesar la información proveniente de los mensajes periódicos UCD y DCD. La SS deberá ser capaz de recibir correctamente los mensajes UCD y UL-MAP periódicamente para que la conectividad a través del canal ascendente que esté usando se considere normal, de lo contrario se eliminarán los parámetros correspondientes al canal y se reiniciará el proceso de obtención de los parámetros. Gracias a la información obtenida a través de esos mensajes, la SS podrá conocer los esquemas de modulación y de corrección de errores utilizados en la señal portadora.

3.15.1 Ranging inicial

El proceso de *Ranging* consiste en la sincronización de la SS con la BS en el canal ascendente con el fin de que las transmisiones de la estación suscriptora estén alineadas al inicio de un minislot. Inmediatamente después de saber qué parámetros deberá usar para las transmisiones iniciales de *ranging*, la SS explorará los mensajes UL-MAP presentes en cada trama buscando oportunidades para hacer su *ranging* inicial. La estación suscriptora utiliza un algoritmo exponencial backoff para determinar el slot de *ranging* que deberá utilizar para enviar el mensaje de petición de *ranging*. Durante un intervalo de Mantenimiento Inicial, la SS enviará un mensaje de RNG-REQ considerando los retrasos de la capa física. La potencia con la que se envíe este mensaje será mínima y se incrementará en mensajes sucesivos en caso de que no se obtenga

respuesta de la estación base. Cuando la BS reciba el mensaje RNG-REQ exitosamente, contestará enviando la respuesta RNG-RSP, incluyendo los CID de las conexiones básica y primaria de la SS correspondiente, así como cualquier otra información para el ajuste de potencia y sincronización en la SS. A partir de entonces, los ajustes que tenga que realizar la SS se llevarán a cabo en la región de Mantenimiento de Estación mediante mensajes RNG-REQ. El proceso se repite hasta que la BS notifique que el *Ranging* se ha completado exitosamente.

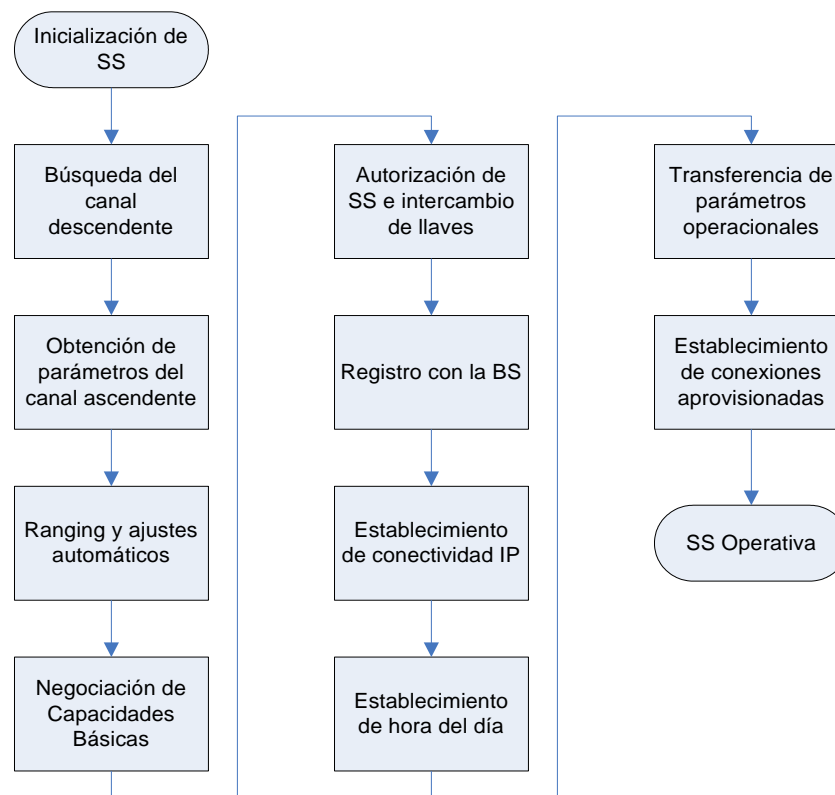


Figura 3.15. Diagrama de inicialización y registro de un nodo con la estación Base.

3.15.2 Negociación de las capacidades básicas de la SS

Hasta este punto, todas las transmisiones se han hecho utilizando el perfil de ráfagas más robusto y menos eficiente. Con el fin aprovechar mejor la capacidad del sistema, la SS informará a la estación base de sus características particulares en la capa física mediante un mensaje SBC-REQ. Esta información contempla:

- Número de CIDs ascendentes que soporta la SS. Deben ser al menos tres, correspondientes a las Conexiones Básica, Primaria y Secundaria.

- Cantidad de parámetros considerados en las capacidades físicas de la SS.
- Demoduladores y moduladores en la Estación Suscriptora. Puede considerarse QPSK, 16-QAM o 64-QAM.
- Tipo de Código FEC usado en las transmisiones ascendente y descendente.
- Número máximo de transacciones PKM (Control de Llaves de Privacidad), MCA (Asignación a grupos *Multicast*) y DSA, DSC o DSD (Adición, Modificación o Eliminación Dinámica de Servicio) concurrentes en espera.
- Propiedades de la asignación de ancho de banda como soporte a asignaciones por Conexión o por Estación Suscriptora, o comunicaciones *half* o *full dúplex*.
- Versión del protocolo IP.
- Soporte a CRC en mensajes MAC.
- Soporte a Consultas para grupos *Multicast*.

La BS, en respuesta, puede aceptar o denegar el uso de alguna de las capacidades reportadas por la SS.

3.15.3 Autenticación y registro de la SS

Los procesos involucrados en la autenticación e intercambio de llaves son:

- Autenticación de la identidad de la SS por parte de la Estación Base.
- La Estación Base proporciona la Llave de Autorización (AK) con la que se obtiene la Llave de Cifrado de Llave (KEK) y las llaves de autenticación de mensajes.
- La Estación Base asigna las identidades y propiedades de asociaciones de seguridad primarias y estáticas para las cuales la Estación Suscriptora está autorizada a obtener información.

Cada SS contiene tanto un certificado digital X.509 instalado en el momento de fabricación como un certificado del fabricante. Estos certificados establecen un enlace entre la dirección MAC de 48 bits de la SS y su llave

pública RSA. Los certificados son enviados a la Estación Base por la estación suscriptora en los mensajes de petición de autorización y de Información de autenticación. La red tiene la capacidad de verificar la identidad de la estación suscriptora revisando los certificados y puede subsecuentemente revisar el nivel de autorización de la estación suscriptora. Si la estación suscriptora está autorizada para agregarse a la red, la estación base responderá a su petición con una contestación de autorización conteniendo la llave de autorización (AK) encriptada con la llave pública SS, una secuencia numérica de 4 bits para identificar cada generación de AKs, la duración de la llave, las identidades (SAID, identificador de Asociación de Seguridad) de las SA (Asociaciones de Seguridad) primarias o estáticas para las cuales la SS está autorizada para obtener información.

3.15.4 Registro con la SS

Después de haber concluido la etapa de autenticación exitosamente, la SS se registrará en la red. El objetivo de la etapa de registro es establecer la conexión de control secundario y determinar las capacidades relacionadas con el establecimiento de la conexión y la operación MAC. Para conseguirlo, la SS envía un mensaje REG-REQ y recibe un REG-RSP que incluye el CID de Control Secundario. Adicionalmente, puede informarse la versión del protocolo IP empleado en caso de que lo haya solicitado la SS. La versión empleada por defecto es IPv4. La estación base espera un mensaje TFTP-CPLT (Configuración de Archivo TFTP Completada) para considerar finalizado el proceso de registro.

3.15.5 Conectividad IP

Después del proceso de registro, la Estación Suscriptora adquiere la dirección IP que le asigna la estación Base mediante el protocolo DHCP a través de un canal secundario.

3.15.6 Establecimiento de la hora del día

Después de configurar la dirección IP, el SS establece la hora del día a través del protocolo de tiempo de Internet. La configuración de la fecha y la hora sólo son necesarias para el registro de eventos para fines operativos del

sistema. No es necesario proteger el intercambio de esta información, y la resolución empleada es de un segundo. Se emplea la Conexión de Control Secundario y el protocolo UDP.

3.15.7 Transferencia de parámetros de configuración.

El servidor DHCP también proporciona la dirección del servidor TFTP al cual la SS puede solicitarle un archivo de configuración. Este archivo proporciona una interfaz estándar para la información de configuración proporcionada por un vendedor específico.

3.15.8 Establecimiento de conexión

El protocolo 802.16 utiliza el concepto de flujos de servicio para definir el transporte unidireccional de paquetes ya sea de manera ascendente o descendente. Los flujos de servicio están caracterizados por un conjunto de parámetros de QoS tales como el jitter y la latencia. Con el fin de utilizar los recursos de la red de una manera eficiente, tales como ancho de banda y memoria, el 802.16 adopta un modelo de activación en 2 fases en el cual los recursos asignados a un flujo de servicios particular pueden no estar comprometido sino hasta que se activa el flujo. Cada servicio activo o admitido es mapeado a una conexión MAC con una identificación CID única.

En general, los flujos de servicio en IEEE 802.16 son preaprovisionados y el establecimiento del flujo de servicio es iniciado por la BS durante la inicialización de la SS. Sin embargo, el flujo de servicio puede establecerse dinámicamente ya sea por la BS o por la SS. La SS típicamente inicia el flujo de servicio únicamente si hay una conexión señalizada dinámicamente, por ejemplo una conexión virtual conmutada (SVC) de una red ATM. El establecimiento de un flujo de servicio se hace a través de un protocolo de handshaking de 3 vías, en el cual la petición para el establecimiento de un flujo de servicio es contestada y a su vez la contestación es confirmada.

Adicionalmente al establecimiento dinámico de servicio, el IEEE 802.16 también soporta cambios dinámicos en el servicio, en los cuales los parámetros del flujo de servicio son renegociados, los cambios en el flujo de servicio también siguen un protocolo de 3 vías similar al anterior.

3.16 Mecanismos de solicitud y asignación de ancho de banda

Existen numerosos métodos a través de los cuales las SSs pueden enviar un mensaje de solicitud de ancho de banda a la BS. Dichos métodos permiten establecer distintos niveles de prioridad y asignación del medio para los distintos usuarios en la red [2].

3.16.1 Peticiones (*Requests*)

Cuando un usuario requiere transmitir información, es necesario que se le asigne un determinado ancho de banda en el canal UL. Para ello, las SSs necesitan hacer una petición a la BS solicitando les sea asignado el recurso necesario.

Las peticiones de ancho de banda pueden ser incrementales o agregadas. Cuando la BS recibe una solicitud incremental de ancho de banda, debe adicionar la cantidad requerida de ancho de banda a las necesidades actuales de la conexión. Cuando la BS recibe una petición de ancho de banda adicional, debe reemplazar las necesidades actuales de ancho de banda de la conexión por la cantidad solicitada de ancho de banda.

El campo Tipo en el encabezado de solicitud de ancho de banda indica si la petición es de tipo incremental o adicional. Puesto que las peticiones de ancho de banda que utilizan *piggyback* no tienen un campo Tipo, dichas peticiones son de tipo incremental. La naturaleza autocorrectiva del protocolo de solicitud/concesión requiere que las SSs periódicamente deban utilizar peticiones de ancho de banda de tipo adicional. El intervalo entre las solicitudes de tipo adicional depende de los parámetros QoS asignados al usuario y de la calidad del enlace. Debido a la posibilidad de colisiones, las peticiones de ancho de banda transmitidas por medio de peticiones de IE de broadcast o *multicast* deben ser peticiones adicionales [2].

3.16.2 Concesiones (*Grants*)

Una de las funciones principales de la BS es la concesión del derecho de transmisión a una SS o a un determinado grupo de SSs. Dichas concesiones son realizadas después de que la BS recibe una solicitud del recurso por parte del usuario o grupo antes mencionado.

Para una SS, las peticiones de ancho de banda se realizan con base en solicitudes individuales para cada una de las conexiones (CID) de la estación suscriptora, mientras que la respuesta/concesión a estas peticiones es realizada con base en una SS en particular, no a los CIDs de las conexiones individuales. Es decir, el ancho de banda se asigna al usuario y éste es responsable de distribuir el recurso entre sus conexiones de acuerdo a sus mecanismos de asignación.

En caso de que la respuesta a la petición no cubra completamente las necesidades de ancho de banda, la SS puede decidir llamar al algoritmo *exponential backoff* y solicitar nuevamente el recurso deseado, o en su defecto, descartar la SDU.

Una SS puede hacer uso de los IEs de solicitud enviados por la BS que son del tipo broadcast, dirigidos a un grupo *multicast* del cual sea miembro, o dirigido específicamente a su CID Básico para realizar una solicitud de ancho de banda. En cualquiera de los casos anteriores, se utiliza el perfil de transmisión indicado en el IE de solicitud enviado por la BS, incluso si la BS es capaz de aceptar un perfil de transmisión más eficiente por parte de la SS. Para poder hacer uso de un perfil de transmisión más eficiente, la SS debe transmitir en un intervalo definido por un IE de concesión de transmisión dirigido específicamente a su CID Básico. Es por esto, que la consulta en *unicast* a una SS normalmente se realiza enviando un IE de concesión de transmisión dirigido a su CID Básico. Asimismo, se pueden hacer solicitudes de ancho de banda para cualquiera de las conexiones de una SS dentro de los IE de concesiones de transmisión enviados a su CID básico [7].

3.16.3 Consulta (*Polling*)

Polling es el proceso por el cual la BS asigna un cierto ancho de banda a las SSs con el fin de permitirles realizar solicitudes de ancho de banda. Estas asignaciones de ancho de banda pueden hacerse a SSs individuales o a grupos

de SSs. Las asignaciones de ancho de banda a grupos de conexiones y/o SSs definen en realidad lo que se conoce como IEs de contención, los cuales se utilizan para realizar solicitudes de ancho de banda por parte de las SSs. Dichas asignaciones no tienen la forma de un mensaje explícito, pero están incluidas como una serie de IEs dentro del UL-MAP

El proceso de *polling* es realizado con base en las SSs y no con base en las conexiones individuales de éstas. Las estaciones suscriptoras siempre solicitan el ancho de banda con base en sus CIDs individuales, mientras que la asignación del recurso por parte de la BS es realizada con base en la SS que solicitó [2].

3.16.4 Unicast

Cuando la BS realiza el proceso de *polling* hacia una SS de manera individual, no le envía un mensaje específico para realizar dicha consulta, sino que a la SS se le asigna, en el UL-MAP, un ancho de banda suficiente para que pueda responder con una solicitud de ancho de banda. Si la SS no requiere ancho de banda en ese momento, la asignación se rellena con el valor hexadecimal 0xFF como lo establece el estándar [2]. Las SSs que tienen una conexión activa del tipo UGS o ancho de banda suficiente, no pueden ser consultadas individualmente a menos que habiliten el bit PM (*Poll me bit*) en el encabezado de algún paquete que se haya transmitido sobre la conexión UGS. Este mecanismo ahorra ancho de banda en comparación con el proceso de *polling* individual de las SSs. La consulta en *unicast*, entonces, sería realizada con base en las SSs asignando un IE de concesión de transmisión dirigido a los CID Básicos de las SSs [2].

3.16.5 Piggyback

El mecanismo de petición por *Piggyback* se realiza mediante la transmisión de dicha solicitud dentro de una trama MAC genérica, evitando que la SS transmita un mensaje explícito de solicitud de ancho de banda utilizando la zona de contención, lo cual lo hace altamente eficiente. Esta solicitud es identificada mediante un sub-encabezado dentro de la trama MAC enviada, llamado *Grant Management Subheader*. Es decir, la petición de ancho de banda es

realizada dentro de una trama de datos que utiliza el ancho de banda previamente asignado a la SS.

El método de solicitud por *Piggyback* es una forma simple y muy útil de anexar una solicitud de ancho de banda en el UL dentro de un paquete enviado a la BS. Así mismo, debe mencionarse que el método de *Piggyback* puede ser utilizado solamente por los *Service Flows* activos que no sean del tipo UGS. Por último, debe mencionarse que el estándar establece como opcional el soporte de *Piggyback* [7]. En la Tabla 3.1 se resumen los mecanismos de solicitud de ancho de banda de acuerdo a los distintos tipos de Scheduling

Tabla 3.13. Tipos de scheduling en WiMAX.

| Tipos de Scheduling | Solicitud Piggyback | Consulta |
|---------------------|---------------------|--|
| UGS | No permitido | El PM bit es utilizado para solicitar una consulta <i>unicast</i> de ancho de banda para las conexiones del mismo usuario que no son de tipo UGS |
| rtPS | Permitido | Solo se permiten consultas de tipo <i>unicast</i> |
| nrtPS | Permitido | Se puede restringir a un <i>Service Flow</i> vía las políticas de transmisión/consulta. En cualquier otro caso, todas las formas de consulta son permitidas. |
| BE | Permitido | Todas las formas de consulta son permitidas |

Descripción de la Capa Física del Protocolo IEEE 802.16

El estándar IEEE 802.16, define cuatro especificaciones de capa PHY, cualquiera de las cuales puede ser usada con la capa MAC para desarrollar un sistema inalámbrico de banda ancha. A continuación se describen brevemente dichas especificaciones:

- *WirelessMAN SC*, describe una capa PHY de una sola portadora para frecuencias entre 10 y 66 GHz, y requiere una condición de línea de vista (LOS). Esta capa PHY es parte de las especificaciones originales del estándar.
- *WirelessMAN SCa*, especifica una capa PHY de una sola portadora para frecuencias por debajo de los 11 GHz, que soporta una condición sin línea de vista (NLOS). Diseñada para operaciones punto a multi-punto.
- *WirelessMAN OFDM*, describe una capa PHY basada en OFDM de 256 puntos para la FFT (*Fast Fourier Transform*). Para operaciones punto a multi-punto en condiciones NLOS, a frecuencias por debajo de los 11 GHz. Esta capa física, finalizada en el estándar IEEE 802.16-2004, ha sido aceptada por el foro WiMAX para operaciones fijas y es a menudo referida como *fixed* WiMAX.
- *WirelessMAN OFDMA*, una FFT de 2048 puntos basada en OFDMA es empleada para operaciones en condiciones NLOS y a frecuencias por debajo de los 11 GHz. En la versión móvil del estándar (IEEE 802.16e-2005), esta capa física ha sido modificada para usar S-OFDMA (*Scalable OFDMA*), donde el tamaño de la FFT es variable y puede tomar cualquiera de los siguientes valores: 128, 512, 1024 o hasta 2048. El tamaño variable de la FFT permite una operación/implementación óptima del sistema, sobre un amplio rango de anchos de banda por

canal y condiciones de radio. Esta capa PHY ha sido aceptada por el foro WiMAX para operaciones móviles y portátiles, y se conoce como *mobile WiMAX*.

Para el desarrollo de la propuesta de éste trabajo de tesis, se consideró la especificación *WirelessMAN OFDMA*. Con el objetivo de comprender de mejor manera dicha propuesta, es necesario revisar varios conceptos de la capa PHY, los cuales se describen a continuación.

4.1 Descripción de los símbolos OFDMA

Como se ya mencionó, las reservaciones de ancho de banda para usuarios móviles, se realizan por medio de regiones de datos (ráfagas, Figura 3.13). Estas regiones abarcan de un número de símbolos OFDMA en el dominio del tiempo, y un número de subcanales lógicos en el dominio de la frecuencia. Los símbolos OFDMA pueden describirse tanto en el dominio del tiempo, como en el dominio de la frecuencia.

4.1.1 Descripción de los símbolos OFDMA en el dominio del tiempo

Para la creación de los símbolos OFDMA, se emplea la IFFT (*Inverse Fast Fourier Transform*), la cual crea la forma de onda en el dominio del tiempo. Ésta duración en tiempo es referida como la parte útil del símbolo (T_b), como se muestra en la Figura 4.1. Para mitigar la interferencia inter-símbolo y los efectos debidos a la multi-trayectoria, una copia de la última parte útil del símbolo ($T_g=(1/N)T_b$), es repetida al inicio. Ésta es llamada *Cyclic Prefix (CP)* o tiempo de guarda. Los valores de N se eligen dependiendo de las condiciones del canal. Para un canal donde los efectos de la multi-trayectoria son significativos, un valor grande de N es necesario. Esto incrementa la redundancia y disminuye la parte útil del símbolo. Para un canal donde los efectos de la multi-trayectoria no son significativos, se requiere un valor de N pequeño, lo que disminuye la redundancia y aumenta la parte útil del símbolo. El estándar IEEE 802.16 define los valores de $N = 4, 8, 16$ o 32 para la versión

fija, mientras que para la versión móvil sólo se especifica un valor de $N = 8$. Así, la duración total del símbolo está dado por $T_s = T_b + T_g$.

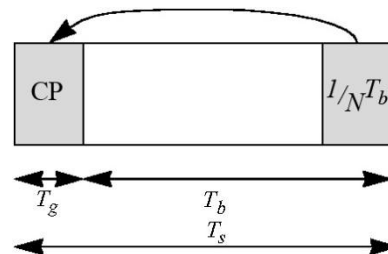


Figura 4.1. Estructura del símbolo OFDMA en el dominio del tiempo.

Por lo tanto, y mientras el tiempo de guarda sea al menos tan grande como el retardo de propagación del canal, al transmitir una serie de símbolos OFDMA, cada símbolo puede ser recuperado correctamente en el receptor, como se muestra en la Figura 4.2.

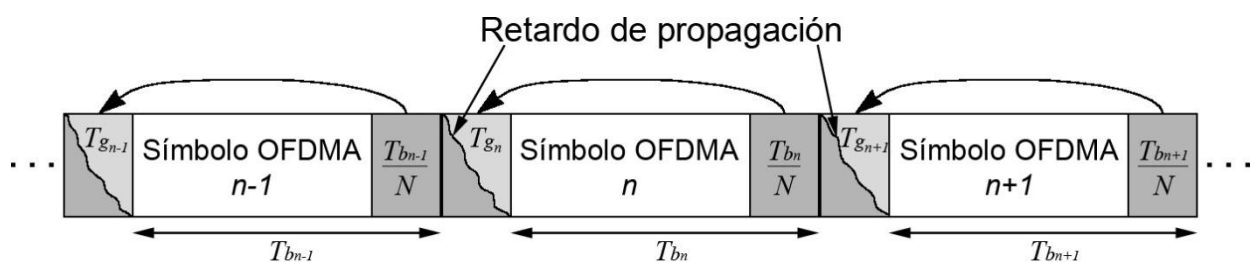


Figura 4.2. Mitigación de la interferencia inter-símbolo y multi-trayectoria en OFDMA.

4.1.2 Descripción de los símbolos OFDMA en el dominio de la frecuencia

Un símbolo OFDMA está constituido por un número de subcanales lógicos, cada uno de los cuales está compuesto a su vez por un grupo de subportadoras de datos, las cuales no necesariamente deben ser consecutivas como se muestra en la Figura 4.3. El número total de subportadoras es determinado por el tamaño de la FFT (128, 256, 512, 1024 o 2048). Existen básicamente cuatro tipos diferentes de subportadoras:

- Subportadoras de datos.
- Subportadoras piloto (para varios propósitos de estimación y sincronización).
- Subportadoras nulas (de no transmisión, para las bandas de guarda)

- Subportadora de la frecuencia central – DC (para simplificar conversiones D/A y A/D).

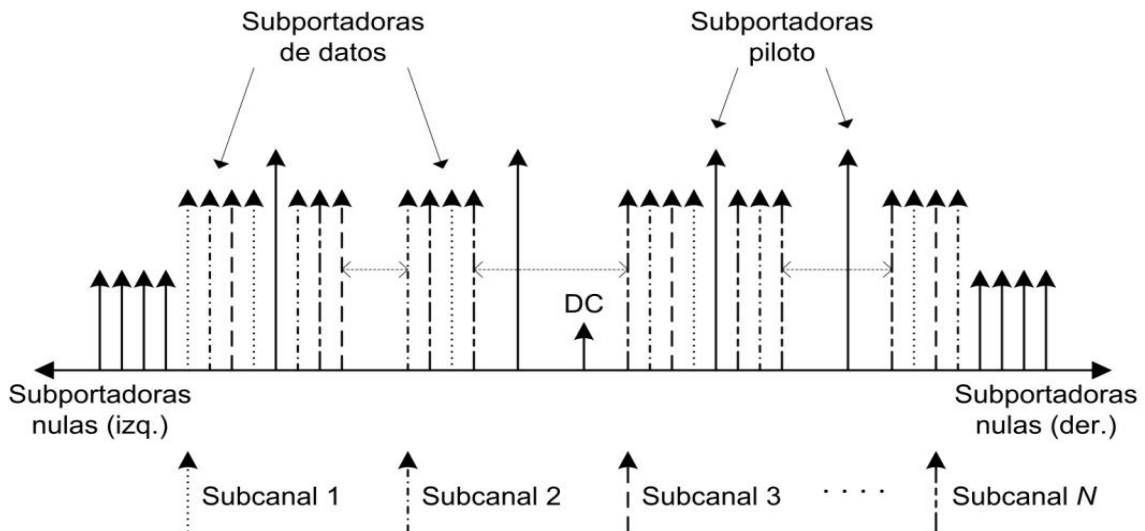


Figura 4.3. Estructura del símbolo OFDMA en el dominio de la frecuencia.

4.1.3 Slots OFDMA y regiones de datos

Un slot OFDMA en capa PHY (también llamado *QuantumSymbol*), requiere un dimensionamiento en tiempo (T_s) y un subcanal lógico. La región de datos es una asignación en dos dimensiones de un grupo de subcanales contiguos por un grupo de slots OFDMA contiguos. Ésta asignación en dos dimensiones, puede ser visualizada como un rectángulo, tal como se muestra en la Figura 4.4.

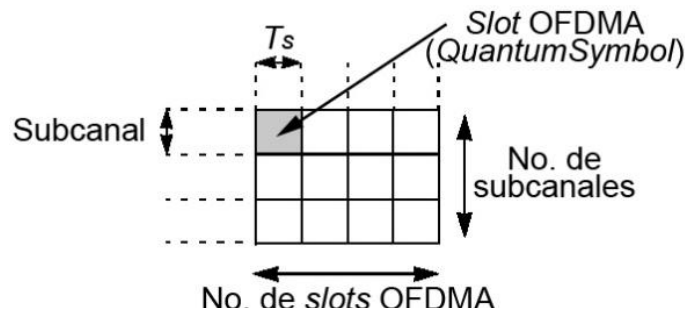


Figura 4.4. Región de datos en OFDMA.

En OFDMA las asignaciones de ancho de banda se realizan por medio de regiones de datos. Sin embargo, el tamaño de estas últimas no se mide en slots OFDMA, sino en *QuantumMaps*. El *QuantumMap* es la mínima unidad de

reservación de datos posible en OFDMA. En el canal *downlink*, un *QuantumMap* abarca un subcanal y dos *QuantumSymbols*, como se muestra en la Figura 4.5. Los *slots* OFDMA son mapeados en las regiones de datos *downlink*, de tal manera que el *slot* indexado con el menor número ocupa el subcanal de menor índice en el símbolo OFDMA de menor índice. El mapeo continúa incrementando el índice del símbolo OFDMA. Cuando se alcanza el límite de la región de datos en el dominio del tiempo, el mapeo continúa con el símbolo OFDMA de menor índice en el siguiente subcanal. De acuerdo a las especificaciones del estándar IEEE 802.16, las regiones de datos en el canal *downlink*, deben tener una forma rectangular o cuadrada.

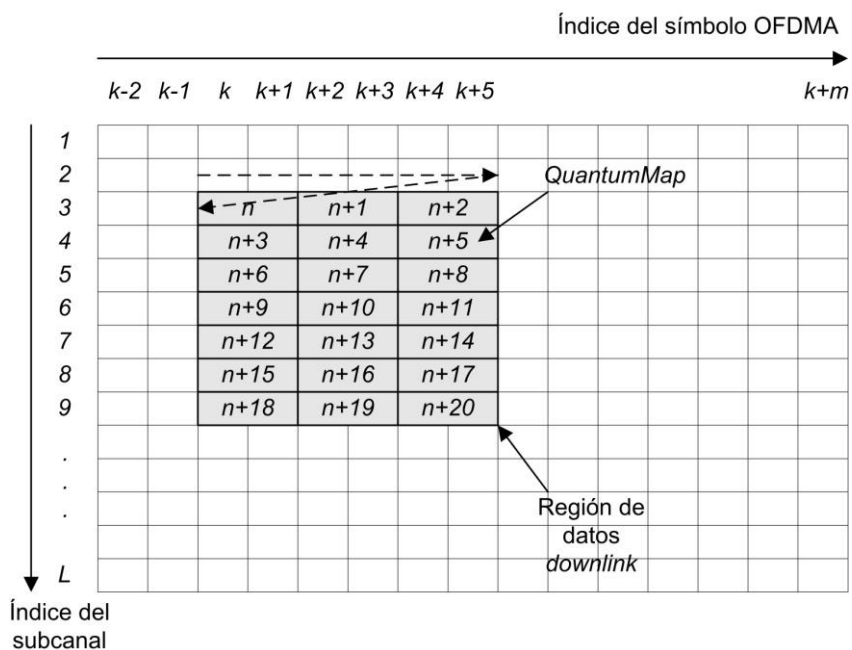


Figura4.5. *QuantumMaps* y mapeo de slots en una región de datos *downlink*.

En el canal *uplink*, un *QuantumMap* abarca un subcanal y tres *QuantumSymbols*, como se ilustra en la Figura 4.6. Los *slots* OFDMA son mapeados en las regiones de datos *uplink*, de la misma forma como se realiza en las regiones de datos *downlink*. Sin embargo, el estándar IEEE 802.16 especifica que las regiones de datos en el canal *uplink*, no necesariamente deben tener la forma de un rectángulo o cuadrado.

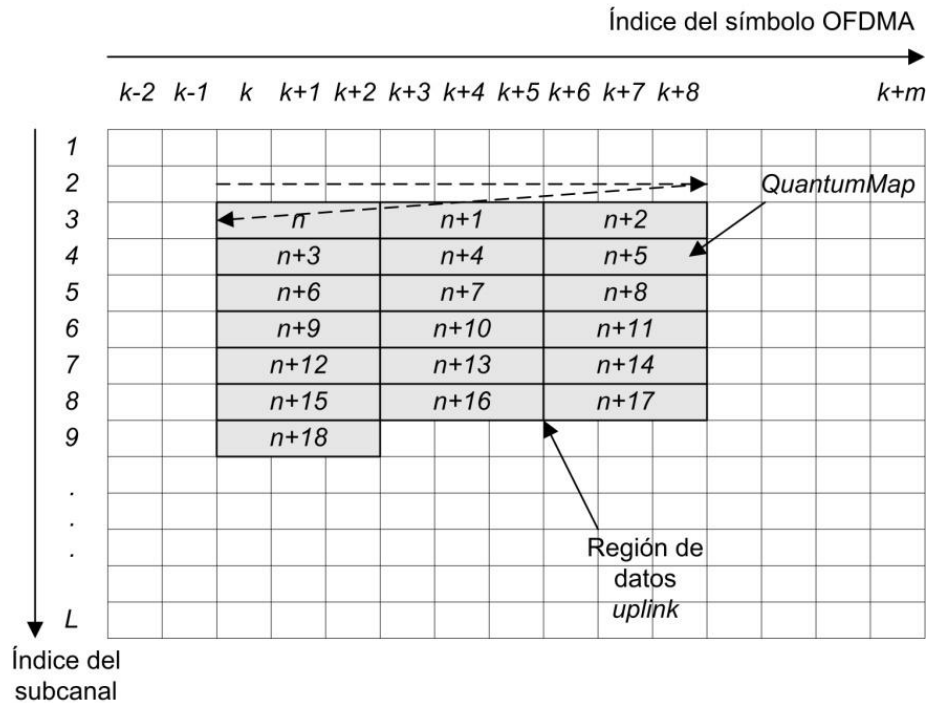


Figura 4.6. QuantumMaps y mapeo de slots en una región de datos uplink.

Transmisión de datos en capa PHY

La capa PHY es un medio que tiene variaciones rápidas y constantemente sufre de gran interferencia. Es por ello que el estándar IEEE 802.16, prevé estas situaciones y define una serie de procesos que se deben llevar a cabo, antes de transmitir los datos en la interfase de aire. Estos procesos especifican una codificación del canal para prevenir y detectar los errores de transmisión en el sistema inalámbrico. También tienen el objetivo de mantener un buen rendimiento del canal, con el propósito de obtener altas tasas de transferencia de datos.

Ésta codificación del canal está compuesta de cuatro etapas del lado del transmisor: *Randomizer* (aleatorización), codificación FEC (*Forward Error Correction*), *Interleaver* (entrelazado) y Modulación. El receptor decodifica las señales recibidas, mediante la operación inversa de cada una de las etapas antes mencionadas: Demodulación, *De-interleaver* (des-entrelazado),

decodificación FEC y *De-randomizer* (des-aleatorización), como se muestra en la figura 4.1.3.1.

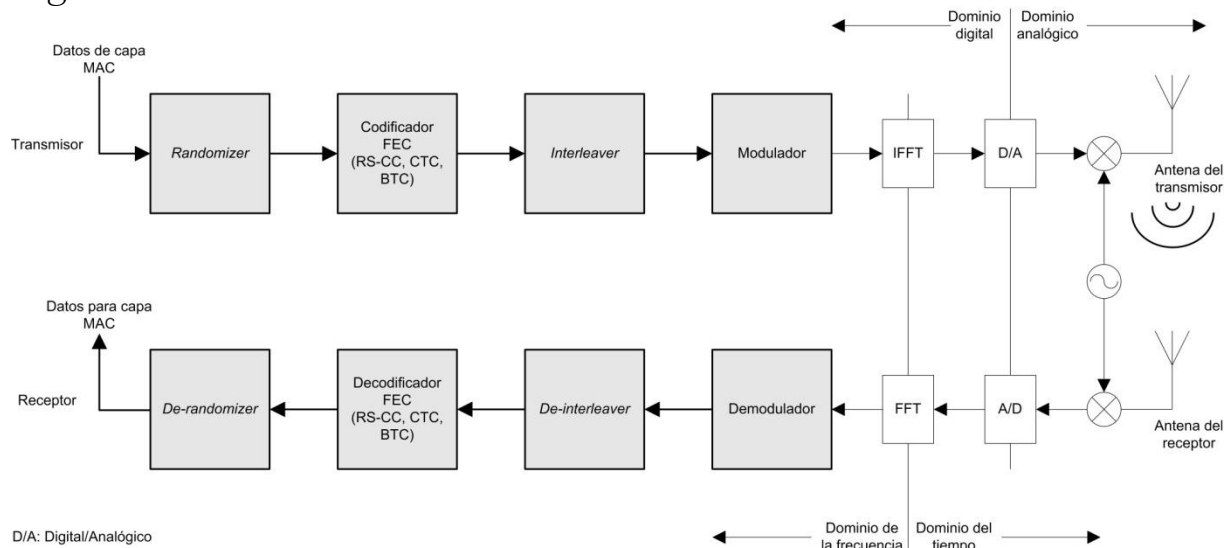


Figura 4.1.3.1 Etapas de codificación en la transmisión de datos en capa PHY basada en OFDMA.

Debido a que la explicación de estas etapas queda más allá de los objetivos de este trabajo de tesis, sólo se describirán brevemente.

Randomizer

El *Randomizer* introduce protección a los datos a través de incertidumbre teórica en la información, evitando largas secuencias de unos o ceros consecutivos. Ésta aleatorización es llevada a cabo tanto en el canal *uplink* como en el canal *downlink*. Si la cantidad de datos a transmitir es menor que la cantidad de los recursos asignados, un relleno de “unos” es agregado al final del bloque de transmisión.

Codificador FEC

El codificador FEC proteger la información contra errores en los datos transmitidos sobre el canal inalámbrico. Éste consiste en agregar redundancia a la información, para detectar y corregir los posibles errores. Para ello, se deben aplicar códigos convolucionales de Reed-Solomon (RS-CC), los cuales son obligatorios para los canales *uplink* y *downlink* según lo define el estándar IEEE 802.16. También pueden ser aplicados opcionalmente códigos turbo convolucionales (CTC) y códigos de turbo bloques (BTC).

Interleaver

El *Interleaver* es usado para proteger la información contra largas secuencias de errores consecutivos, los cuales son muy difíciles de corregir, es decir; está diseñado para aislar los errores de ráfaga y convertirlos en errores aleatorios. Dado que estas largas secuencias de errores afectan una gran cantidad de *bits* en una fila, pueden causar grandes pérdidas en los datos transmitidos. Para ello, un entrelazado es utilizado con el propósito de diversificar los errores y facilitar su corrección.

Modulación

Una vez que la información es codificada, debe ser modulada utilizando una de las siguientes constelaciones: BPSK, QPSK, 16QAM o 64QAM; para poder transmitirla por la interfase de aire. Estas constelaciones pueden modular 1, 2, 4 y 6 *bits* por símbolo respectivamente.

Una constelación es una representación geométrica de señales en un espacio de n dimensiones, en dónde se visualizan todos los símbolos de salida posibles que puede generar un modulador. En términos simples, la secuencia de *bits* son convertidos a una secuencia de símbolos representados por valores complejos. En la figura 4.1.3.2, se muestra la representación geométrica de las constelaciones BPSK, QPSK, 16QAM y 64QAM respectivamente.

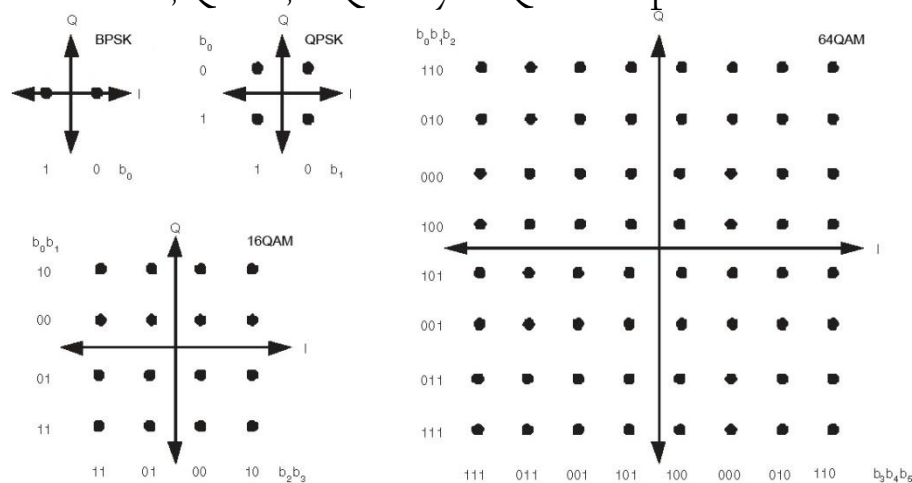


Figura 4.1.3.2 Constelaciones de modulación BPSK, QPSK, 16QAM y 64QAM.

Referencias

- [1] Timo Halonen, Javier Romero, Juan Melero “GSM, GPRS and EDGE Performance: Evolution Towards 3G/UMTS”, Wiley, 2003.
- [2] Francis Swarts, Michiel P Lotter, “CDMA Techniques for Third Generation Mobile Systems”, Kluwer Academic Publishers, Springer 1999.
- [3] IEEE 802.16.2-2001, “IEEE Recommended Practice for Local and Metropolitan Area Networks – Coexistence of Fixed Broadband Wireless Access Systems”. IEEE 802.16 Task Force, April 2001.
- [4] IEEE 802.16a “IEEE Standard for Local and metropolitan area networks – Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems— Amendment 2: Medium Access Control Modifications and Additional Physical Layer Specifications for 2–11 GHz”. IEEE 802.16 Task Force, 2003.
- [5] IEEE 802.16-2004 “IEEE Recommended Practice for Local and metropolitan area networks Coexistence of Fixed Broadband Wireless Access Systems”. October 2004.
- [6] IEEE 802.16c “Standard for Local and metropolitan area networks Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems— Amendment 1: Detailed System Profiles for 10–66 GHz”. IEEE 802.16 Task Force, 2003.
- [7] IEEE 802.16e, “IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks - Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems, Amendment 2: Physical and Medium Access Control Layers for Combined Fixed and Mobile Operation in Licensed Bands and Corrigendum 1”, IEEE 802.16 Task Force, December 2005.
- [8] R.Lloyd Evans, “Wide Area Network Performance and Optimization”, Addison Wesley, ISBN 0-201-4270-0, pp. 120, 1996.
- [9] W.Stallings, “Local and Metropolitan Area Networks”, Prentice Hall International Editions, 5th edition, ISBN 0-13-253733-8, pp. 426-460, 1997.
- [10] P. Tzerefos, “On the Performance and Scalability of digital upstream DOCSIS 1.0 conformant CATV channels”, Department of Computers Science, The University Of Schiffield, Ph. D. Thesis, Oct. 1999.
- [11] M. Reiser and H. Kobayashi, “Queuing Network with Multiple Closed Chains: Theory and Computational Algorithms”, IBM Journal of Research and Development, pp. 285-294, 1975.

- [12] M. Reiser, "A Queuing Analysis of Computer Communication Networks with Window Flow Control", *IEEE Trans. on Communs.*, pp. 1199-1209, Aug. 1979.
- [13] M. Reiser, "Mean Value Analysis an Convolution Method for Queue-Dependent Servers in Closed Queuing Networks", *Performance Evaluation 2*, pp.9-18, 1981.
- [14] R. Kumar, "A tutorial on Some New Methods for Performance Evaluation of Queuing Networks ", *IEEE J. Selected Areas in Communs.*, ISSN 0733-8716, pp. 970-980, Aug. 1995.
- [15] R. Kumar and S. P. Meyn, "Stability of Queuing Networks and Scheduling Policies", *IEEE Trans. on AutomaticControl*, pp. 251-260, Feb. 1995.
- [16] W.E. Leland et al., "On the Self Similar Nature of Ethernet Traffic", *Proc. Of Sigcomm '93*, ISSN 1063-6692, Association for Computer Machinery, Ithaca, N. Y., 1993.
- [17] W. Stalings, "Self similarity upsets data traffic assumptions", *IEEE Spectrum*, pp. 28-29. Jan. 1997.
- [18] Law, M. McComas, "Simulation software for comunnications networks: the state of the art", *IEEE Communs. Mag.*, Vol. 32, No. 3, pp.44-50, Mar. 1994.
- [19] O. Allen, "Introduction to Computer Performance Analysis with Mathematica", *AP Professional*, ISBN 0-12-051070-7, PP 9-39, 1994.
- [20] H. Sari, "Trends and Challenges in Broadband Wireless Access", *Pacific Broadband Communications*, pp. 210-214, , IEEE 2000.
- [21] W. Honcharenko, Jan P. Kruys, "Broadband Wireless Access"

Sitios web

<http://www.ieee.org/portal/site>

<http://www.opnet.com>

<http://www.intel.com/technology/itj/archive/2004.htm>

<http://www.intel.com/netcomms/bbw/>

<http://www.intel.com/technology/magazine/standards/st08031.pdf>

<http://www.intel.com/cd/ids/developer/asmo-na/eng/strategy/trends/95510.htm>

<http://www.intel.com/cd/ids/developer/asmo-a/eng/dc/pca/optimization/94553.htm?page=5802.16>

http://www.intel.com/standards/case/case_802_11.htm

<http://grouper.ieee.org/groups/802/16/index.html>

http://www.intel.com/standards/case/case_wimax.htm

<http://grouper.ieee.org/groups/802/>

<http://grouper.ieee.org/groups/802/11/>

<http://grouper.ieee.org/groups/802/16/pubs/P80216e.html>

<http://grouper.ieee.org/groups/802/20/>

<http://www.wimaxforum.org/home>

<http://www.intel.com/cd/ids/developer/asmo-na/eng/strategy/trends/95510.htm?page=3>