

Capítulo 4.

Estándar IEEE 802.16 (WiMAX)

4.1 INTRODUCCIÓN

En el presente Capítulo se hará una descripción de los aspectos contenidos en el estándar 802.16-2004 aplicados a la tecnología WiMAX. En primer lugar se hace una descripción de la forma en la que surge el estándar 802.16, sus primeras versiones y las variantes que ha tenido a lo largo del tiempo relatando las mejoras que se han hecho en cada una de las versiones. Posteriormente se describen las características principales de la tecnología WiMAX y una descripción de las topologías que maneja.

La descripción de la pila de protocolos es el tema central de presente capítulo, se describe de forma general cómo es que se integran las capas MAC y PHY, como se relacionan y posteriormente una descripción más detallada de la capa MAC, la cual incluye sus tres subcapas de las cuales se da un panorama general en cuanto a las funciones y se describen los formatos de la trama de subcapa común MAC. La subcapa de seguridad no se describe a fondo por no ser un tema esencial en el desarrollo del presente trabajo.

La capa física PHY se describe al final del capítulo, en ella se muestra la estructura en diagrama de bloques del transmisor, y se describen de forma breve sus componentes centrándose en la codificación FEC que están integrada por los codificadores *Reed-Solomon* y *Codificador convolucional*. Adicionalmente se describen los formatos de tramas para el acceso múltiple TDD.

4.2 ANTECEDENTES ACERCA DEL ESTÁNDAR

Las tecnologías basadas en redes BWA (*Broadband Wireless Access*) resultan muy atractivas debido a que ofrecen diversas ventajas en comparación con las redes WLAN, como son altas tasas de transmisión, cobertura extensa, la posibilidad de implementar movilidad y *calidad de servicio (QoS)*.

Los antecedentes de estas tecnologías se encuentran en los sistemas LMDS (*Local Multipoint Distribution System*). Su propósito era proporcionar un servicio de comunicación inalámbrica para voz, internet, video bajo demanda, etc. con amplia cobertura.

Posteriormente el IEEE formó un comité para desarrollar el estándar que se denominó **IEEE 802.16**, iniciando trabajos en julio de 1999 y siendo aprobado en abril de 2002. Su nombre oficial "**Air Interface For Fixed Broadband Wireless Access Systems**", que se relacionó directamente a la clasificación de redes MAN (*Metropolitan Area Networks*). Dicho estándar define el acceso fijo inalámbrico para redes WMAN en su variante *IEEE*

802.16-2004 y el IEEE 806.16e, que es una mejora al estándar previo que incorpora movilidad [4].

Dicho estándar establece las características de las capas física (*PHYSICAL Layer*) y MAC (*Media Access Control*) para la tecnología denominada comercialmente como WiMAX. Ambas son parte de las dos capas más bajas (física y enlace de datos) definidas por el modelo OSI.

4.2.1 Evolución del estándar IEEE 802.16

El estándar 802.16-2004 es el resultado de una revisión hecha a los estándares 802.16-2001, 802.16a-2003 y 802.16c-2002; aunque antes de que ésta se publicara una revisión previa denominada 802.16d iniciada en Septiembre de 2003 se llevó a cabo con el objetivo de permitir la compatibilidad del estándar de HiperMAN BWA aprobado por la *ETSI (European Telecommunications Standards Institute)*. Finalmente se publicó la versión 802.16-2004 como resultado de dichos avances.

Sin embargo, en lo sucesivo aparecieron documentos adicionales que describían diversas partes de la tecnología, con modificaciones al estándar original 802.16-2004, por ejemplo, la necesidad de incorporar funciones que permitieran movilidad. Como resultado se publicó el estándar 802.16e, también conocido como 802.16-2005.

La siguiente tabla resume los documentos más importantes publicados para este estándar:

Tabla 5. Principales documentos 802.16 [1]

Fecha y nombre del documento	Descripción
Diciembre 2001: 802.16	10-66 GHz, LOS, 2-5 km; anchos de banda del canal: 20,25,28 MHz.
Enero 2003: 802.16a	2-11 GHz, NLOS
802.16-2004	Revisión y consolidación de los anteriores reemplazándolos, 5-50 km.
7 Diciembre 2005: 802.16e	Movilidad: OFDMA
Otras mejoras: 802.16f, 802.16g, 80.216f, etc.	Aspectos de <i>Handover</i> , información de administración.

4.3 WiMAX (*WORLDWIDE INTEROPERABILITY FOR MICROWAVE ACCESS*)

Como ya se mencionó, WiMAX se desarrolla en base a las especificaciones del grupo de estándares 802.16 los cuales proporcionan las especificaciones técnicas; sin embargo, resulta necesario crear un organismo que verifique aspectos como la interoperabilidad. Es por esta razón que se crea el foro WiMAX (*WiMAX forum*) en junio de 2001.

Se integra por fabricantes de equipo, operadores de redes, académicos y otros actores en el campo de las telecomunicaciones. Su objetivo es facilitar el desarrollo de las redes inalámbricas de banda ancha basadas en el estándar IEEE 802.16 asegurándose de mantener la compatibilidad e interoperabilidad del equipo de banda ancha inalámbrica [4].

4.3.1 Características de WiMAX

WiMAX es una tecnología que poco a poco se ha ido desarrollando y se ha posicionado en algunos países como una opción viable para servicios móviles, algunas de sus características más sobresalientes son:

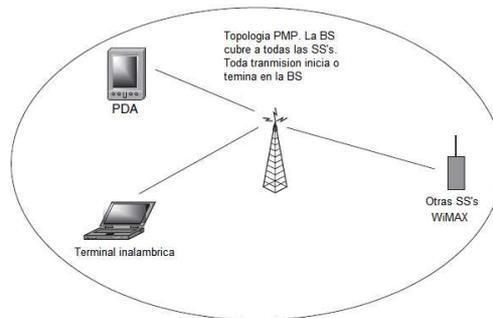
- Opera tanto en bandas licenciadas (2.3GHz y 3.5 GHz) para transmisiones a larga distancia y en bandas no licenciadas entre 5.8 GHz, 8 GHz y 10 GHz, dependiendo las asignaciones del espectro que se tengan en cada región o país.
- Se basa en OFDM¹⁴, puede cubrir distancias muy amplias que abracan campus enteros incluso ciudades pues el rango está en el orden de 50 km, incluso en condiciones de NLOS. Tiene eficiencia espectral de 5 bps/Hz y tasa de transmisión de hasta 128 Mbps.
- Soporta varios tipos de multiplexión, como lo es TDD (*Time Division Duplexing*) y FDD (*Frequency Division Duplexing*).
- Es escalable y puede acoplarse con otras tecnologías como lo es WiFi
- Soporta modulación adaptable. Ofrece niveles de servicio SLA (*Service Level Agreement*) que es un acuerdo en el que los operadores se comprometen a prestar un servicio bajo determinadas condiciones mínimas y ofreciendo *calidad de servicio* (QoS).
- Soporta aplicaciones como video y voz en un mismo canal, admite tecnologías como VoIP, videoconferencias y otras tecnologías de comunicación entre personas, oficinas y dispositivos.
- Utiliza antenas inteligentes que mejoran la eficiencia espectral y que a través de la modulación adaptable se adaptan a las condiciones de la SNR en un determinado instante.
- Es más económica que las redes cableadas como son las basadas en fibra óptica, por lo que ha comenzado a popularizarse en diversas ciudades y países.
- Soporta medidas de encriptación mediante los algoritmos *Triple DES* (128 bits) y *RSA* (1024bits) y autenticación de usuarios.

¹⁴ Se describió en la sección 3.4.2

4.3.2 Topologías WiMAX

El estándar IEEE 802.16 define dos posibles topologías de red:

PMP (Point-to-Multipoint): el tráfico solo entre la BS y los SS's, es una topología centralizada, en donde la BS es el centro del sistema. La Figura 4.3 muestra esta topología:



4.1 Red PMP WiMAX

Mesh (malla): en esta topología, el tráfico puede ser ruteado hacia otra SS, mientras que las BS pueden hacerlo solo entre SS's. Sus elementos se denominan nodos. Cada estación puede crear su propia comunicación, con cualquier otra estación en la red, es decir, no se restringe solo a establecer comunicación con la SS. Su ventaja es que el alcance de la BS puede ser más grande dependiendo del número de saltos a la SS más lejana. Cada nodo recibe un identificador de 16 bits o *Node ID*. La Figura 4.4 muestra la topología mesh.

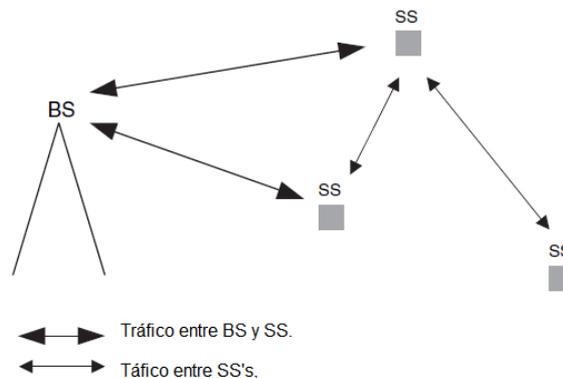


Figura 4.2. Topología mesh

4.3.3 Equipo WiMAX

Radios WiMAX [17]: es la parte central para la red WiMAX; contiene tanto el transmisor como el receptor y genera oscilaciones en la frecuencia conocida como la frecuencia portadora (frecuencia de operación). La mayoría de las veces el radio está separado de la antena; los CPE de los SS están integrados por radio y antena, la cuál se coloca al aire

libre para proteger al radio de las condiciones ambientales como humedad o calor, lo que podrían reducir su vida útil. Al colocar fuera la antena se aumenta su eficiencia y desempeño en la conexión inalámbrica. Se muestran a continuación dos tipos de CPE WiMAX:



Figura 4.3. CPE indoor y outdoor

Antenas

Omnidireccionales: radian en todas direcciones, es decir, cubren un radio de 360° y son utilizadas para enlaces punto multipunto; Adecuadas para situaciones en las que los SS están muy cerca de la BS (aproximadamente en radio de 100m).

Antenas Sectoriales: estas antenas enfocan su haz en una sola dirección, con lo cual se ahorra potencia y se aumenta el radio de cobertura. Se usan varias de ellas para obtener una cobertura de 360° dependiendo del ancho de haz de cada una de ellas.

Antena de panel: pueden incluir el radio dentro de ellas y son alimentados mediante Power over Ethernet (PoE). Son ventajosas pues no necesitan una ubicación externa para el radio.

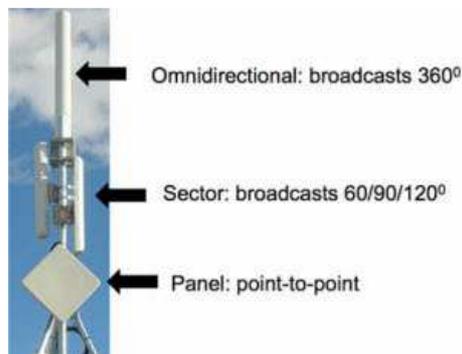


Figura 4.4. Antenas WiMAX

4.3.4 Pila de protocolos

El estándar de redes IEEE 802.16 BWA especifica la **interfaz aérea de un sistema BWA** soportando servicio multimedia. La capa de Control de Acceso al Medio (MAC) soporta una estructura PMP primitiva con una topología *mesh* opcional. Está estructurada para soportar diferentes capas físicas (PHY), especificadas en el mismo estándar. Solo dos de ellas se usan en WiMAX.

La Figura 4.1 ilustra de forma general la ubicación de dichas capas y su distribución: la subcapa de convergencia de transmisión

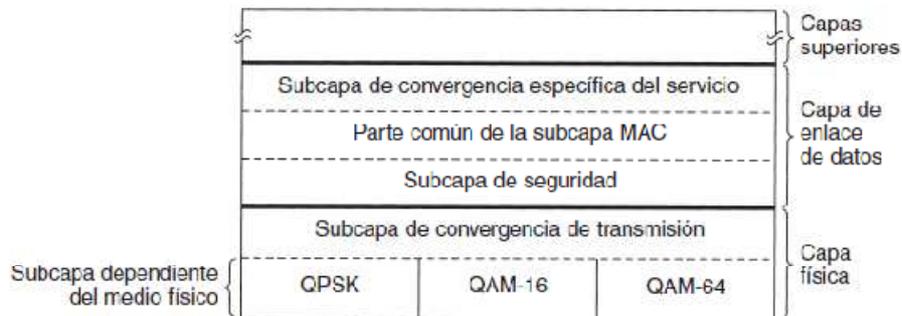


Figura 4.5. Pila de protocolos del estándar 802.16

La arquitectura de capas definida en WiMAX 802.16 se muestra en la Figura 4.6. Las especificaciones de dicho estándar están comprendidas en la descripción de las dos capas más bajas del modelo OSI; la subcapa MAC ocupa la mayor parte de la capa de enlace de datos, junto con la capa LLC. A su vez, se observa que la capa MAC está dividida en tres subcapas: la subcapa de convergencia CS (*Convergence Sublayer*), la subcapa común CPS (*Common Part Sublayer*) y la subcapa de seguridad.

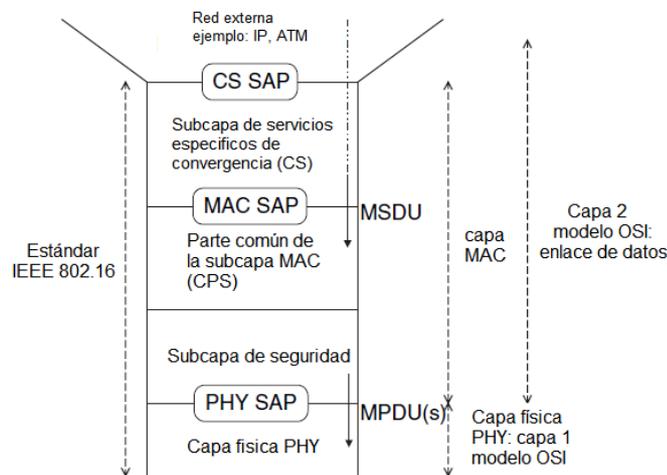


Figura 4.6. Arquitectura de capas

El dialogo que establece las capas o entidades se lleva a cabo de la siguiente forma: cuando la capa MAC de un equipo envía una PDU (*Packet Data Unit*) conocida en esta capa como MPDU a otro equipo, dicha MPDU es recibida como una PSDU (*Physical Layer Service Data Unit*) por la capa física PHY. Entre cada subcapa existe un **Service Access**

Point (SAP) los cuales permiten acceder a los servicios proporcionados por cada una de las capas diferenciándolos de los servicios que proporciona la red.

A continuación, se describirán con mayor detalle ambas capas del estándar.

4.4 CAPA DE CONTROL DE ACCESO AL MEDIO MAC

Como se observó en la Figura 4.4, la capa MAC está compuesta por tres subcapas, la subcapa de convergencia CS, la capa común MAC y la subcapa de seguridad. Esta última no se describirá con mucho detalle pues sus aportes no son relevantes para el presente trabajo.

4.4.1 Subcapa de convergencia (CS)

Esta capa usa los servicios que la capa MAC CPS (*Capa MAC común*) a través del Punto de acceso de servicio MAC (SAP). Sus funciones son:

- Aceptar las PDU entrantes provenientes de capas superiores, las cuales pueden provenir de ATM o paquetes IP; generalmente son **paquetes IPv4**.
- Clasificar y mapear la MSDU que llega a ella en un apropiado identificador de conexión CID (*Connection Identifier*), el cual es una función básica para la aplicación del mecanismo QoS del estándar 802.16.
- Procesar, en caso de que sea necesario, las PDU's de capas superiores con base en su clasificación.
- Supresión de encabezados, lo cual consiste en suprimir partes repetitivas de los encabezados antes de enviarlos y restaurarlos en el receptor.
- Entregar las CS PDU's en el MAC SAP adecuado y recibir las PDU's en el sentido opuesto.

Dicha capa provee todo el mapeo (transformación) de los datos provenientes de la red externa en las MAC SDU que se recibirán en la parte común de la capa MAC. Estas incluyen clasificar los las SDU's externas y asociarlas con el correspondiente SFID MAC (*MAC Service Flow Identifier*) y el identificador de conexión CID.

Una **conexión** se lleva a cabo en el nivel MAC entre una BS y una SS, o de forma inversa. Es unidireccional y tiene el propósito de transmitir tráfico de *Service Flow* (flujo de servicio) para un único tipo de servicio (voz, datos, video...), *es decir*, permite la comunicación entre MACs equivalentes en la BS y SS. Se identifica mediante 16 bits codificados denominados Identificador de conexión (*CID*). También pueden ser considerados CID's los identificadores de conexiones comunes como IP.

El **flujo de servicio o Service Flow (SF)** es un servicio de transporte MAC que provee de transporte unidireccional de paquetes en *Up/Downlink*. Se identifica con 32 bits denominados *SFID (Service Flow Identifier)*, y se caracteriza por tener un conjunto de parámetros de QoS para los paquetes (*PDU's*) que se intercambian en la conexión. Dichos parámetros contienen especificaciones acerca de cómo los SS pueden solicitar reservaciones de ancho de banda y del comportamiento esperado de la reservación en el canal *Uplink* de la BS.

Hay tres tipos de SFID:

- **Admitted SF:** los recursos primero son admitidos y una vez que la negociación entre puntos finales ha terminado, se activan los recursos.
- **Active SF:** este tipo ya tiene asignados recursos desde la BS para su conjunto de servicios activos de QoS.
- **Provisioned Service Flow :** en este tipo los dos parámetros anteriores son nulos. Es un estado inicial.

*Solamente se puede mapear un CID en un SFID cuando la conexión ha **admitido o tiene activo** un determinado SFID, es decir, un SFID coincide con cero (*Provisioned SF*) o con un CID (*Admitted or Active SF*); un CID coincide con un SFID el cual define parámetros de QoS asociados con la conexión.*

La Figura 4.7 ilustra la relación SGFID y CID.

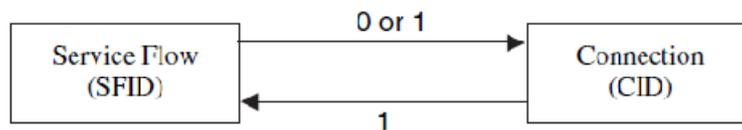


Figura 4.7. Correspondencia CID y SFID

Los mecanismos para llevar a cabo el mapeo entre CID y SFID existen tanto en el *Uplink* (en este caso están en la SS) como en el *Downlink* (están en la BS). Los criterios de coincidencias se denominan clasificadores. Si el paquete coincide con de los clasificadores, se entrega a al SAP para asignarse a una conexión, y por consecuencia, a un CID. Las características de SF de la conexión determinará el QoS a aplicar para ese paquete.

Como conclusión, la subcapa MAC *Convergence Sublayer (CS)* clasifica cada aplicación, es decir, una clase de QoS le es asignada. Este proceso es importante debido a que cada BS da servicio a un número relativamente grande de SS los cuales transmiten diferentes aplicaciones. Dicha clasificación permite una correcta adaptación de los enlaces pues otorga la posibilidad de destinar los recursos necesarios para cada una de ellas; como consecuencia, QoS es más fácil de implementar.

4.4.2 Parte común de la subcapa MAC (MAC CPS)

La subcapa denominada Parte común MAC (MAC CPS) reside en el medio de la capa MAC. Representa la parte medular del protocolo MAC y efectúa las siguientes funciones:

- Asignación de ancho de banda (*BW Allocation*): permite que se tenga una alta eficiencia en el uso de las aplicaciones multimedia.
- Establecimiento de la conexión.
- Mantener la conexión entre dos sitios.

La subcapa CPS recibe mensajes de datos desde varios CS's a través del *MAC SAP*, clasificado para conexiones *MAC* locales. La calidad de servicio *QoS* se toma en cuenta para la transmisión y la asignación (programación) de los datos a través de la capa física. Incluye muchos procedimientos específicos para distintos tipos como construcción de trama, ancho de banda con acceso múltiple, peticiones y respuestas de asignación de ancho de banda, *QoS*, entre otros.

4.4.2.1 Direcciones MAC

Cada *SS* cuenta con una dirección MAC estándar de 48 bits. Define a los *SS* para cualquier proveedor o tipo de equipo. Se usa en el proceso inicial de descubrimiento, en el que se llevan a cabo las conexiones para una *SS*. Es también usado como una parte de proceso de autenticación. Una *BS* cuenta con un *BS Identifier (BSID)* de 48 bits el cual es diferente a la dirección MAC de la base. Incluye un indicador de 24 bits del operador y puede usarse en el *DCD (Downlink Channel Descriptor)*.

4.4.2.2 Formato de trama

Se le conoce como trama MAC a la MAC PDU. Tiene el formato general mostrado en la Figura 4.9; inicia con un encabezado de longitud fija, prosigue con el cuerpo del mensaje (parte en la que se encapsula la *PDU CS*) y puede contener un *CRC (Cyclic Redundancy Check*¹⁵) o suma de verificación de redundancia cíclica.

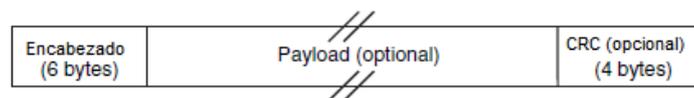


Figura 4.9. Forma genérica de la trama MAC 802.16

¹⁵ Se describió de forma breve en el capítulo anterior.

El *payload* o carga útil puede variar en longitud, de tal forma que el campo longitud también es un número variable; lo anterior permite a la capa *MAC* encapsular varios tipos de tráfico de capas superiores haciendo su formato transparente a esta subcapa en la capa *MAC*.

Formato del encabezado

Se definen dos formatos en el estándar, el campo *Type* en el encabezado *MAC* es que determina cual de los siguientes se usará:

- **Generic MAC Header (GMH):** es decir, encabezado genérico de la capa *MAC*; indica que la trama contiene mensajes de administración o bien mensajes de la capa *CS* (información de usuario o datos de administración de capas superiores). Sólo se usa en el *Downlink*.
- **Encabezado MAC sin payload:** hay dos tipos, el Tipo 1 y 2. El encabezado no está seguido de *MPDU* o *CRC* y fue introducido en la mejora 802.16e del estándar. Ejemplo de este tipo de mensaje son los que se utilizan como peticiones de reservación de ancho de banda.

En el presente trabajo se hará enfoque en las tramas que presenten el GMH, por lo tanto se considerará que la información agregada a la trama en esta subcapa considera *Header* y la suma de verificación *CRC*.

El formato de las tramas que contienen en el GMH se presenta a continuación en la Figura 4.10:

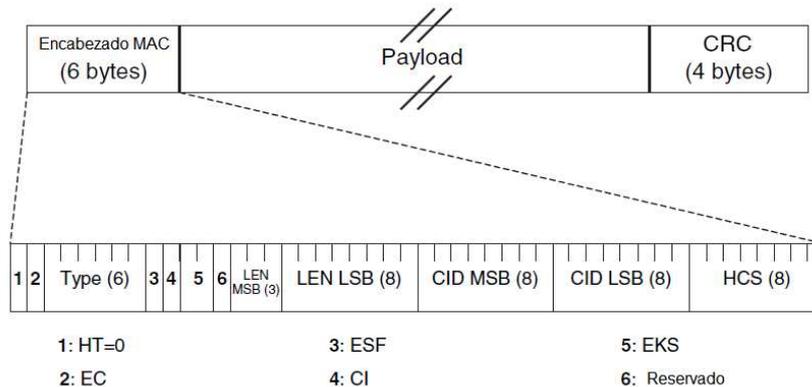


Figura 4.10. Estructura de la trama y formato de encabezado MAC

Se presenta a continuación una muy breve descripción de los campos presentes en el encabezado, por comodidad no se hará la traducción de los nombres de dichos campos:

HT (Header Type) (1 bit): indica el tipo de encabezado, como se mencionó existen el tipo genérico MGH y el que no tiene *payload* y CRC.

EC (Encryption Control)(1bit): indica si el *payload* ha sido encriptado.

Type (6 bits): indica la presencia de sub-encabezados, y tipos especiales de *payload*.

ESF (Extended Subheader Field) (1 bit): indica si este tipo de encabezado está presente después del GMH, en *Up/Downlink*.

CI (CRC Indicator) (1 bit): indica la presencia o ausencia del CRC.

EKS (Encryption Key Sequence) (5 bits): es el índice de la clave de encriptación de tráfico y vector de inicialización usado en la encriptación del *payload*.

LEN (Length) (11 bits): longitud en bytes de la MAC PDU incluyendo *Mac Header* y CRC.

CID (Connection ID) (16 bits): contiene el identificador de conexión mencionado en la sección anterior.

HCS (Header Check Sequence) (8 bits): secuencia usada para detectar errores en el encabezado.

Como conclusión, el encabezado y la suma de verificación CRC en la capa MAC común agregan información adicional a la MSDU proveniente de capas superiores; tomando en cuenta únicamente las tramas de información se tiene que:

$$adicional_{MAC} = 10 \text{ [bytes]} \quad (12)$$

Funciones de la subcapa MAC

En algunos sistemas de redes inalámbricas, se lleva a cabo la **fragmentación** de una MAC SDU en varias MAC PDU; o bien de forma inversa, empaquetar muchas MSDU's en varias MPDU's. La función de concatenación es el hecho de transmitir muchas PDU's en una única oportunidad de transmisión. Es posible en *el Up y Downlink*. Dado que cada MPDU se identifica con un único CID, la entidad MAC receptora puede presentar las MSDU's en la correcta MAC SAP; como consecuencia es posible enviar MPDU's con diferentes CID's en la misma conexión física.

4.4.3 Subcapa de seguridad

Ésta subcapa provee de autenticación, intercambio de claves secretas, encriptación y control de integridad a lo largo de la red BWA. Sus funciones son:

- **Encriptación de datos:** mediante algoritmo como WEP, y calidad DES3 de 168 bits [16] y AES. Usa el protocolo *CCMP (Chaining Message Authentication Code Protocol)* para llevar a cabo este proceso.
- **Autenticación:** se usan protocolos como el *PKM (Private Key Management)* usado para proveer la distribución segura de claves entre la SS y la BS y para garantizar acceso condicional a la red.

4.5 CAPA FÍSICA (PHYSICAL LAYER)

Dado que WiMAX es un sistema BWA, los datos se transmiten a altas velocidades en la interfaz aérea a través de ondas electromagnéticas en la frecuencia de operación.

La capa física (*Physical Layer*) establece la conexión física entre dos sitios, y frecuentemente en ambas direcciones (*Uplink y Downlink*). También decide que tipo de modulación se utilizara para transmitir las secuencias de bits, la potencia de trasmisión, y otras características físicas.

Como ya se mencionó, WiMAX puede operar dentro de la banda de 2 a 66 GHz, la cual puede dividirse en dos partes:

- El primer rango comprendido entre 2 y 11 GHz, que esta destinado para transmisiones NLOS (*Non Line of Sight*). Esta especificación se hizo en el estándar 802.16a, y es el único que aun está presente.
- El segundo rango comprendido entre 11 y 66 GHz, que esta destinado a transmisiones LOS. No es usado para WiMAX.

En el estándar 802.16 se han definido cinco interfaces físicas:

Tabla 7. Interfaces físicas (PHY) en el estándar 802.16 [4]

Denominación	Banda de frecuencia [GHz]	Sección en el estándar 802.16	Técnica de duplexión
Wireless MAN-SC PHY (conocida como SC)	10-66 GHz, LOS	8.1	TDD y FDD
Wireless MAN-SCa PHY (conocida como SCa)	Después de 11GHz, NLOS	8.2	TDD y FDD
WirelessMAN-OFDM (conocido como OFDM)	Después de los 11 GHz, licenciado.	8.3	TDD y FDD
WirelessMAN-OFDMA	Después de los 11 GHz, licenciado.	8.4	TDD y FDD
WirelessHUMAN	Después de los 11 GHz, no licenciado.	8.5 (junto con 8.2, 8.3 u 8.4)	TDD

Existe la especificación para frecuencias en el rango de 10 a 66 GHz mediante Wireless MAN-SC PHY y por debajo de 11 GHz, hay tres interfaces físicas:

- **WirelessMAN-OFDM** conocido como transmisión OFDM.
- **WirelessMAN-OFDMA** usando *OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access)* y *OFDM*, con la cual se reescribió la variante 802.16e.
- **WirelessMAN-SC**: que usa modulaciones en portadora simple *SC (Single Carrier)*.

WiMAX considera solamente OFDM y OFDMA como capas físicas, y para el presente trabajo se hará énfasis en la capa **OFDM (WirelessMAN-OFDM)**. Se muestra en la Figura 4.11.

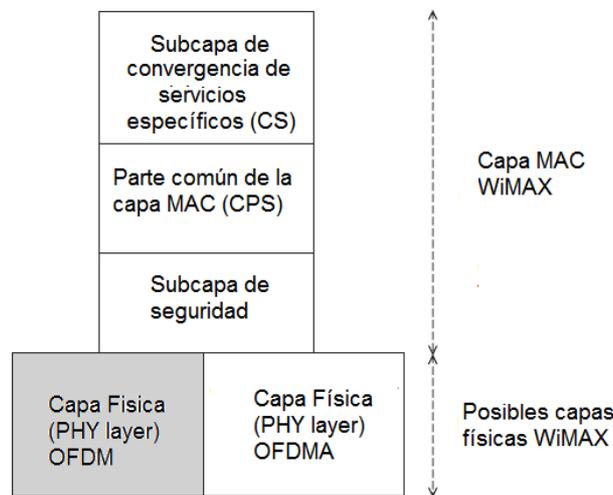


Figura 4.11. Posibles capas físicas para WiMAX

4.5.1 Modulación adaptable

WiMAX implementa una ventaja importante, muy similar a la aplicada en tecnologías celulares como son GSM/EDGE, UMTS y en WLAN's con WiFi: el uso de más de un tipo de modulación, lo cuál se conoce como modulación adaptable.

Consiste en usar diversos tipos de modulación dependiendo de la calidad del enlace entre la BS y el SS; cuando la calidad del enlace es buena (alta *SNR*) se usa un tipo de modulación de alto nivel como lo es 16-QAM o 64-QAM; en cambio, cuando la calidad del enlace es mala, se usan modulaciones más robustas como BPSK. También puede variar la tasa de codificación. La Figura 4.12 ilustra de forma esquemática el concepto:

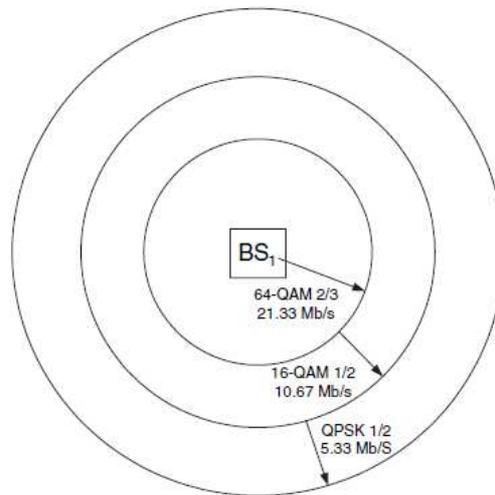


Figura 4.12. La calidad del enlace determina el nivel de modulación a usar

4.5.2 Dominio de la frecuencia

OFDM es una técnica que permite transmitir un determinado número de portadoras ortogonales entre sí en el mismo canal temporal. El número de portadoras (denominadas N) constituyen una señal OFDM en la que cada símbolo es transmitido en una de las N portadoras. Para WiMAX en la capa física OFDM, el estándar IEEE 802.16 establece que se usan 256 portadoras.

Sin embargo, no todas las portadoras llevan datos, existen cuatro tipos: 192 portadoras de datos útiles, 8 portadoras piloto (para estimación de canal y sincronización), 55 portadoras nulas (*Null*) que son bandas de guarda, y la portadora de DC (*Direct Current*) que esta colocada en la frecuencia central de RF de la estación transmisora, es nula y no modulada. En total se tienen 256 portadoras. La Figura 4.13 muestra un esquema de la clasificación anterior.

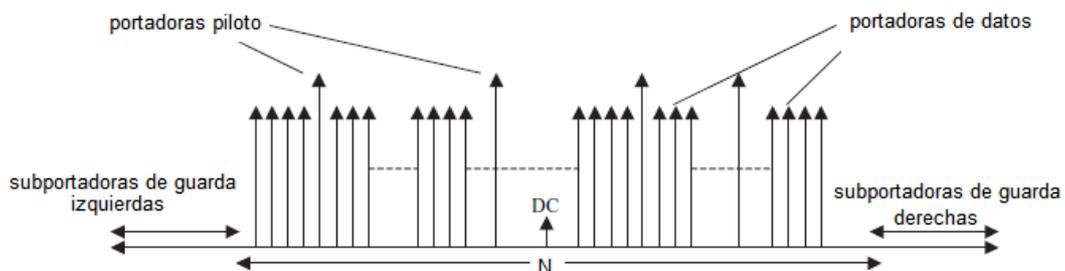


Figura 4.13. Tipos de subportadoras OFDM

4.5.3 Cadena de transmisión

El diagrama de bloques que ilustra el transmisor y receptor OFDM para WiMAX se ilustra en la Figura 4.14:

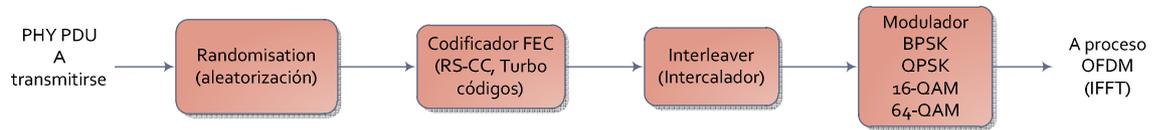


Figura 4.14. Cadena de transmisión OFDM

Los tres últimos procesos se han descrito con anterioridad, excepto el tema de modulación; para mayor información consúltese el Apéndice B. Modulación. El bloque denominado **Randomisation (aleatorización de datos)** introduce protección a la información evitando largas secuencias de ceros o unos consecutivos. Para ello busca uniformar la densidad de potencia transmitida generando secuencias de datos que tengan un balance de unos y ceros. Se lleva a cabo en cada secuencia de datos UL y DL; si la cadena no es suficientemente grande para ocupar el espacio, se rellena con unos (*padding*) al final del bloque de transmisión.

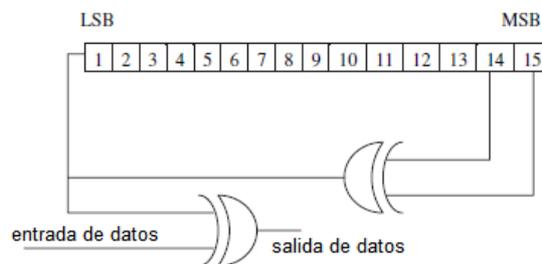


Figura 4.15 Generador de secuencias pseudoaleatorias para WiMAX OFDM

Códigos Reed-Solomon (RS) y Códigos convolucionales (CC)

En WiMAX el bloque denominado FEC (*Forward Error Correction*) está compuesto de dos tipos de codificadores, los códigos convolucionales CC de los cuales ya se hizo una descripción en el Capítulo anterior y los códigos **Reed-Solomon (RS)**. La Figura 4.12 ilustra el proceso en diagrama de bloques:

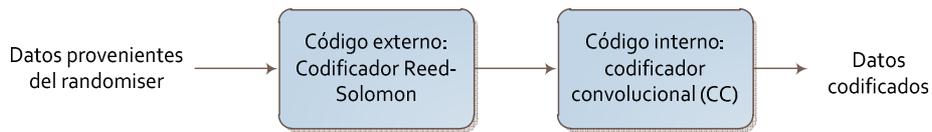


Figura 4.16. Codificador FEC para OFDM-PHY

Éstos últimos (RS) son códigos que permiten corregir errores mediante la adición de bits de redundancia a la secuencia digital. Se lleva a cabo mediante el sobremuestreo de un polinomio que ha sido construido a partir de la secuencia original, es decir, se evalúa el polinomio con una gran cantidad de valores, los cuales son almacenados. Al ser evaluado el polinomio en más valores de los necesarios, el receptor puede reconstruir el original en presencia de numerosos errores.

Los parámetros que especifican a un código RS son:

$$RS(N, K, T)$$

$$N = 2^t - 1 \quad (13)$$

Dónde

N= número total de bits codificados

K: bits de información

T= número máximo de bits que puede corregir

t=número de bits por símbolo

El código RS toma un número K de bits de la secuencia y agrega $N - K$ bits de redundancia a la información, por tanto la palabra codificada final será de tamaño N. El código RS puede corregir hasta un número de bits en error igual a:

$$T = \frac{N-K}{2} \quad (14)$$

Por ejemplo, el código RS (32,24,4) indica que por cada K= 24 bits de información, el codificador RS en la salida tiene N= 32 bits codificados, por tanto, los bits de redundancia agregados a la palabra son N-K= 8; y $T = 8/2=4$, es decir puede corregir hasta 4 bits en error.

Una vez que los datos codificados abandonan el bloque RS, entran al bloque de codificación convolucional, el cual también agrega bits de redundancia a la información entrante.

La siguiente tabla resume de forma puntual los tipos de modulación y codificación establecidos por el estándar 802.16-2004 para WiMAX.

Tabla 8. Parámetros de codificación WiMAX [2]

Modulación	Tamaño del bloque no codificado [bytes]	Tamaño del bloque codificado [bytes]	Tasa de codificación total	Código RS	Tasa de CC
BPSK	12	24	1/2	(12,12,0)	1/2
QPSK	24	48	1/2	(32,24,4)	2/3
QPSK	36	48	3/4	(40,36,2)	5/6
16-QAM	48	96	1/2	(64,48,8)	2/3
16-QAM	72	96	3/4	(80,72,4)	5/6
64-QAM	96	144	2/3	(108,96,6)	3/4
64-QAM	108	144	3/4	(120,108,6)	5/6

La tasa de codificación total es una tasa que permite calcular en un paso la cantidad de información a la salida de todo el codificador FEC, es decir, **ya incluye la codificación CC y la codificación RS.**

Por ejemplo, para la modulación QPSK con tasa de CC 5/6:

1. Haciendo el calculo considerando de forma separada las tasa de CC y la aplicación del código RS:

Dado que se usa un código RS (40,36,2), por cada 36 bits entrantes se obtienen 40 bits codificados mediante RS. Al entrar éstos en el CC, se le aplica la tasa de CC que es de 5/6:

$$datos\ codificados\ FEC = datosCC = datosRS * \frac{1}{tasa\ de\ CC} = 40 * \frac{6}{5} = 48 \quad (15)$$

2. Aplicando la tasa de codificación total, la cual otorga directamente el resultado total a la salida del codificador FEC (incluyendo RS y CC):

$$datos\ codif\ FEC = bloque\ no\ codificado * \frac{1}{OCR} = 36 * \frac{4}{3} = 48 \quad (16)$$

Obteniendo así el mismo resultado.

4.5.4 Técnicas de acceso múltiple

De acuerdo con el SF (*Service Flow*), parámetro que se describió en el capítulo anterior, serán las características de ancho de banda que la BS asigne a casa SS. El acceso múltiple permite a varios usuarios recibir servicios de la misma BS, y se lleva a cabo mediante ráfagas de bits dinámicas, en la cuales se indica la forma en la que los recursos se asignan en la red.

FDD (Frequency Division Duplexing)

En esta técnica los canales DL y UL están alojados en frecuencias diferentes. Se usa un *frame* de duración fija para las transmisiones en dichas direcciones; lo cual facilita el uso de diferentes esquemas de modulación; así como mantener una comunicación simultanea *full-dúplex* para los SS, es decir, que puedan escuchar continuamente el DL y transmitiendo y opcionalmente *Half-Duplex* cuando puede escuchar siempre que no esté transmitiendo.

TDD (Time Division Duplexing)

En este caso UL y DL están alojados en la misma frecuencia pero asignados en tiempos distintos. Un frame TDD tiene una duración fija y se divide en un número de slots físicos que ayudan a dividir de forma sencilla en ancho de banda. Estos slots tienen una duración de 4 símbolos modulados.

Para el presente trabajo, se hará énfasis en considerar el **modo TDD**, para el estándar IEEE802.16-2004 en la capa física OFDM PHY, conocida más comúnmente como WiMAX fijo. El *frame* TDD es adaptable en cuanto a que el ancho de banda destinado al UL y DL puede cambiar. Su estructura general se muestra en las figuras 4.17 y 4.18:

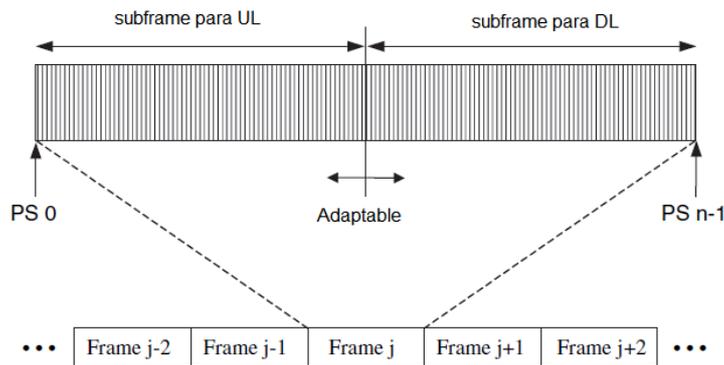


Figura 4.17. Frame TDD

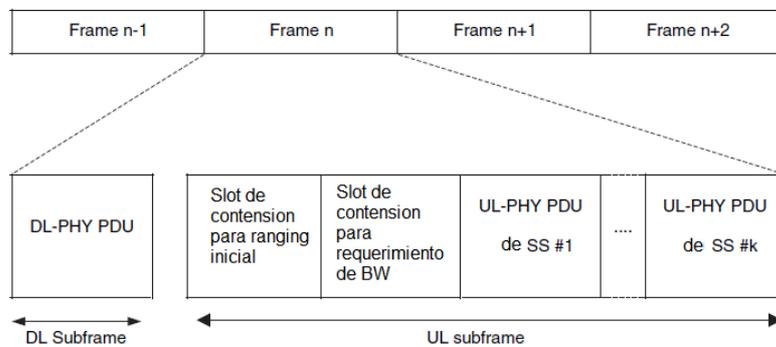


Figura 4.18. Estructura general de la trama TDD para OFDM PHY

4.5.4.1 Subframe Downlink en OFDM PHY

Consiste en una sola PHY PDU en la dirección *Downlink*, la cual puede ser compartida por varias SS. Inicia con un **preámbulo largo**, el cual utilizan las SS para sincronización. Es seguido por un campo denominado **Frame Control Header (FCH)**, el cual contiene el DLFP (*Down Link Frame Prefix*) que es un prefijo en el que se especifica el perfil de servicio y la longitud de al menos uno de los de las secuencias DL que lo suceden; tiene la duración de un símbolo OFDM y se codifica usando BPSK con CC ½.

Posteriormente están alojadas las **ráfagas o bursts de datos** provenientes de cada SS, los cuales se transmiten en orden decreciente de acuerdo a su robustez (tipo de modulación empujado) de acuerdo con sus perfiles de servicio. El primero de ellos puede contener adicionalmente a las MAC PDU provenientes de la capa MAC los **DL-MAP Y UL-MAP**.

Estos campos son indicadores que contiene la información acerca de cómo esta siendo usados los canales DL y UL respectivamente, es decir, de cómo se están asignando los recursos entre los SS.

También se transmiten inmediatamente después de estos indicadores los mensajes **DCD (Downlink Channel Descriptor)** y **UCD (Uplink Channel Descriptor)**. La Figura 4.19 muestra los campos para este frame:

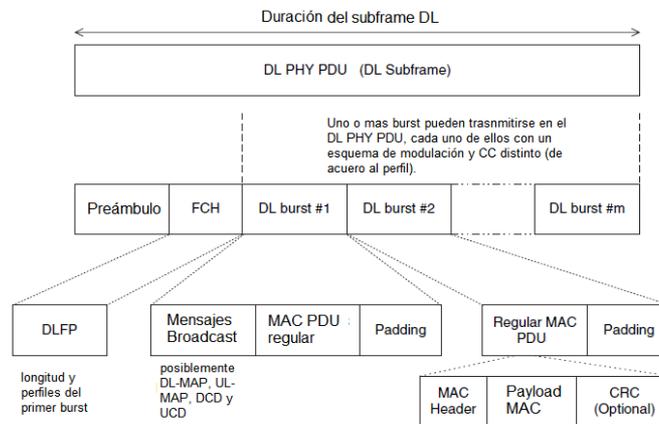


Figura 4.19. Estructura del subframe DL OFDM PHY

4.4.4.2 Subframe Uplink Para OFDM PHY

Contiene tres partes globales, las cuales se ilustran en la Figura 4.20 y se describen a continuación:

- **Slots de contención para el *ranging* inicial (IE):** la BS especifica un intervalo en cual nuevas estaciones pueden unirse a la red. Los paquetes en este intervalo usan el mensaje RNG-REQ o petición de *ranging*. En este intervalo pueden ocurrir colisiones.
- **Slots de contención para solicitud de BW:** intervalo en el cual se alojan las peticiones de ancho de banda para la BS.
- **Una o más PHY PDU's:** cada una de ellas transmitidas en ráfagas. Proviene de cada una de las estaciones SS con destino en la BS. De igual forma, cada una de ellas tiene un perfil definido, por tanto se transmiten usando diferentes modulaciones y esquemas de codificación dependiendo del que cada SS tenga asignado en un momento dado.

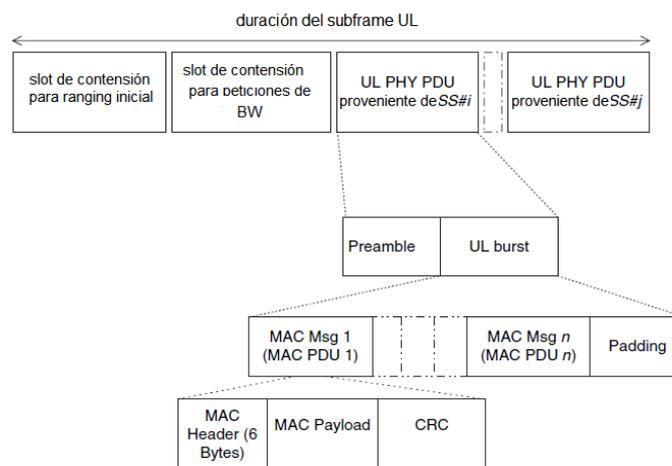


Figura 4.20. Estructura del subframe UL

4.6 CÁLCULO DE LA EFICIENCIA VOLUMÉTRICA

En esta sección se presentara un ejercicio que permite calcular la eficiencia volumétrica para una cierta cadena de datos que llega a una red WiMAX. Para ello es necesario tomar en cuenta a los protocolos de capas superiores como son TCP e IP, los cuales se describieron en el Capítulo 2; posteriormente

Problema: calcular la eficiencia volumétrica para un stream de datos originado en la capa de aplicación TCP, de longitud 3600 bytes que entrará a una red WiMAX. Tome en cuenta el modelo de referencia TCP/IP, considerando fragmentación en la capa de aplicación solamente y con MTU=1500 bytes. Usar modulación QPSK con CC 2/3.

Datos:

Payload TCP = 3600 bytes

MTU=1500 bytes

Calcular eficiencia volumétrica en capa de aplicación: Para la capa de aplicación se considerará el protocolo TCP para el procesamiento de los datos. Dado que la MTU =1500 bytes es menor que el tamaño del *stream* de datos en esta capa es necesario fragmentar dicho *stream* en paquetes más pequeños; a los cuales se les agregara el encabezado TCP.

Se sabe que: $Enc_{TCP} = 20$ [bytes]

Por tanto:

$$num_{fragmentos} = \frac{payload_{TCP}}{MTU_{TCP}} = \frac{3600 \text{ bytes}}{1500 - 20 \text{ bytes}} = \frac{3600}{1480} = 2.4324 \quad (17)$$

Lo anterior nos dice que habrá dos fragmentos del tamaño de la MTU y un fragmento más pequeño:

Fragmento 1: bytes 0 a 1480 (datos) + 20 bytes (encabezado) = 1500 bytes (MTU_{TCP})

Fragmento 2: bytes 1481 a 2960 (datos) + 20 bytes (encabezado) = 1500 bytes (MTU_{TCP})

Fragmento 3: bytes 2961 a 3600 (datos) + 20 bytes (encabezado) = 660 bytes

Por tanto, se transmitirá a la capa IP un total de:

$$payload_{IP} = 1500 + 1500 + 660 = 3660 \text{ bytes} \quad (18)$$

La eficiencia volumétrica en TCP esta dada por:

$$EfVol_{TCP} = \frac{payload_{TCP}}{payload_{IP}} = \frac{3600 \text{ bytes}}{3660 \text{ bytes}} = 0.9836 \approx 98.4\% \quad (19)$$

Como se puede ver, la eficiencia volumétrica en TCP es muy alta, pues los 20 bytes que se agregan a una cadena de 1500 bytes son una parte proporcional muy pequeña.

1. Cálculo de eficiencia volumétrica en capa de red

Para la capa de red, se utilizara el protocolo IP.

De (2) sabemos que $Enc_{IP} = 20$ [bytes]

Por tanto, para cada fragmento llegado de TCP, se agregara un encabezado IP para encapsularlo en la capa de red.

Fragmento 1 IP= 1520 bytes

Fragmento 2 IP= 1520 bytes

Fragmento 3 IP= 680 bytes

Por tanto, la cantidad de información total que se enviara a la capa MAC será:

$$\text{payload MAC} = 1520 + 1520 + 680 = 3720 \text{ bytes}$$

Y la eficiencia volumétrica para la capa de red IP será:

$$EfVol_{IP} = \frac{\text{payload TCP}}{\text{payload MAC}} = \frac{3600 \text{ bytes}}{3720 \text{ bytes}} = 0.9677 \approx 96.8\% \quad (21)$$

De igual forma que en el punto anterior, la eficiencia volumétrica sigue siendo muy alta. Es menor pues ya se han agregado más encabezados, lo cual lleva a un consumo mayor de los recursos respecto de los datos útiles.

Cálculo de eficiencia volumétrica en capa de acceso al medio MAC

WiMAX, como se analizó en este Capítulo, agrega a la información un encabezado y una suma de verificación al final de los datos útiles; el encabezado (6 bytes) y la suma de verificación (4 bytes):

$$\text{adicional}_{MAC} = 10 \text{ [bytes]}$$

De igual forma que en los pasos anteriores, a cada uno de los fragmentos previos se les agregaran 10 bytes de información adicional:

Fragmento 1 IP= 1520 bytes + 10 bytes= 1530 bytes

Fragmento 2 IP= 1520 bytes + 10 bytes= 1530 bytes

Fragmento 3 IP= 680 bytes + 10 bytes= 690 bytes

Por tanto, la cantidad de información total que se enviara a la capa física PHY será:

$$\text{payload MAC} = 1530 + 1530 + 690 = 3750 \text{ bytes}$$

Y la eficiencia volumétrica para la capa de MAC será:

$$EfVol_{MAC} = \frac{\text{payload TCP}}{\text{payload MAC}} = \frac{3600 \text{ bytes}}{3750 \text{ bytes}} = 0.96 \approx 96\% \quad (22)$$

De igual forma que en el punto anterior, la eficiencia volumétrica sigue siendo muy alta, pues los datos de *Overhead* no son comparables al tamaño de la cadena de datos, por tanto, dicha información no le afecta de forma directa al desempeño del sistema.

Veamos que sucede ahora en la capa física.

2. Cálculo de eficiencia volumétrica en capa física PHY

Como se mencionó el presente Capítulo, la capa física de WiMAX presenta dos tipos de codificación, las cuales agregan la información de redundancia a la cadena original para permitir la corrección de errores.

Para **QPSK CC 2/3** y de acuerdo con los datos proporcionados por la Tabla 8, se usa un código RS (32,24,4). Dado que por cada 24 bits de la cadena que llega a la capa PHY (no codificados), a la salida del bloque RS se obtiene 32 bits, que son la información codificada.

El *payload* para la capa PHY es de 3750 bytes, por tanto, al pasar primero por el codificador RS, se obtiene:

$$bloques_{24bytes} = \frac{payload\ PHY}{24\ bytes} = \frac{3750\ bytes}{24\ bytes} = 156.25 \approx 157 \quad (23)$$

Es decir, se obtienen 157 bloques de 24 bytes provenientes de la cadena *payload* PHY. Como por cada uno de esos grupos de 24 bytes a la salida del codificador RS se obtengan 32, el total de bytes a la salida del codificador RS es:

$$bytes\ RS = 157 * 32\ bytes = 5024\ bytes \quad (24)$$

Posterior al codificador RS, la información pasa al codificador convolucional, el cuál tiene una tasa de codificación 2/3; lo que significa que por cada 2 bytes de información a la entrada del codificador, se obtendrán 3 bytes a la salida.

Por tanto:

$$bytes\ CC = bytes\ RS * \frac{1}{tasa\ CC} = 5024\ bytes * \frac{3}{2} = 7\ 536\ bytes$$

Por tanto los bytes en la capa física que se enviarán a través del medio físico son:

$$bytes\ PHY = 7\ 536\ bytes$$

Este mismo cálculo como se vio, anteriormente, se puede realizar usando la tasa total de codificación.

Finalmente, la eficiencia volumétrica para la capa física es:

$$EfVol_{PHY} = \frac{payload\ TCP}{bytes\ PHY} = \frac{3600\ bytes}{7536\ bytes} = 0.4778 \approx 47.8\% \quad (25)$$

Se observa que para la capa PHY la eficiencia volumétrica disminuye de forma drástica, lo cual se debe a que se está usando un perfil de servicio poco eficiente, es decir, una tasa de

codificación relativamente (2/3) y el código RS también agrega gran cantidad de información adicional.

Usando tasas de codificación más altas como 5/6 la eficiencia volumétrica también disminuye pues aun se le esta agregando gran cantidad de información adicional a la información original, sin embargo, lo hace de forma menos drástica.

4.7 CONCLUSIONES

La tecnología WiMAX es una tecnología de banda ancha inalámbrica que ofrece características atractivas, lo cual podría resultar útil en múltiples aplicaciones como los servicios de datos a gran escala y por su factibilidad de ofrecer QoS, para aplicaciones multimedia complejas como voz y video, además de que reduciría costos frente a redes cableadas.

La capa MAC para WiMAX es la capa más importante para esta tecnología, pues es a través de ella que se llevan a cabo la definición de los *Service Flow (SF)*, los cuales permiten la aplicación de QoS que es una de las ventajas más claras que ofrece dicha tecnología. Así mismo, esta capa agrega carga adicional a las *MSDU's* provenientes de capas superiores. Tomando en cuenta solamente las tramas MAC genéricas (datos), contando encabezado y *CRC*, la cantidad de información adicional es:

$$\mathbf{adicional}_{MAC} = 10 \text{ [bytes]}$$

Los datos proporcionados por la tabla 8 se usaran como base en los cálculos a realizarse para comportar la eficiencia volumétrica. La cantidad de información adicional depende del perfil del servicio a usar, ya que intervienen la tasa de codificación convolucional a usar y el código RS; para ello se utilizará la tasa total de codificación.

$$\begin{aligned} & \text{bits codificados}_{PHY WiMax} \\ &= \text{ceiling} \left[\frac{\text{tamañoPSDU}}{\text{bits no codificados}} \right] * \frac{1}{\text{tasa total de codificacion}} \quad (26) \end{aligned}$$

La función *ceiling* representa una función matemática que redondea el resultado de la división al entero inmediato superior, lo cual permitiría hacer un cómputo de los símbolos no codificados ya contando bits de *padding*.