



Universidad Nacional Autónoma de México
Facultad de Ingeniería

Análisis y Diseño de un Modelo Analítico para el
Estudio del Comportamiento Dinámico de Redes
WiMAX

Tesis que para obtener el título de

Ingeniero en Telecomunicaciones

presenta

Jorge Vicente Campos Rojas

Ingeniero en Telecomunicaciones

presenta

Anabel Sánchez Acosta

Director de Tesis

Dr. Víctor Rangel Licea



Ciudad Universitaria, México D.F.

Abril de 2006.

A mis padres:

*Lidia Acosta Martel y Carlos V. Sánchez Fernández,
por creer en mí y brindarme su apoyo y cariño en todo este tiempo.*

A mis hermanas:

*Angélica y Ariana así como también a todos mis amigos
que han estado a mi lado en los afortunados y no tan afortunados momentos de mi vida.*

Muchas gracias.

Ana

A mis padres:

*Jorge y María, por su ejemplo, amor y consejo,
y con quienes he compartido todos mis éxitos y fracasos.*

A mis hermanas:

Valeria y Claudia, por su amor y apoyo incondicional.

A Diana:

Por brindarle alegría y felicidad a mi vida.

A mis amigos:

Por estar conmigo en cada momento.

Jorge Vicente

Capitulo 1	Introduccion
	1.1. Definicion del problema
	1.2. Modelado de redes de acceso inalambrico de banda ancha (BWA)
	1.3. Propuesta de redes BWA
	1.4. Objetivos y contribuciones
	1.5. Estructura de la tesis
Capitulo 2	Estado del arte de las redes de tercera generacion y de las redes BWA
	2.1. Introduccion
	2.2. Evolucion de los sistemas de telefonía móvil
	2.3. Redes de tercera generacion
	2.4. Redes inalambricas de banda ancha
	2.5. Otras tecnologías
	2.6. Conclusiones
Capitulo 3	Descripcion del estandar IEEE 802.16 WiMAX
	3.1. Introduccion
	3.2. Operacion del protocolo IEEE 802.16
	3.3. Conclusiones
Capitulo 4	Modelo analitico para el estandar BWA IEEE 802.16
	4.1. Introduccion
	4.2. General Packet Radio Service (GPRS)
	4.3. Analisis del modelo matematico para IEEE 802.16
	4.4. Resultados
	4.5. Conclusiones
Capitulo 5	Comparacion de resultados
	5.1. Introduccion
	5.2. Modelo de simulacion para IEEE 802.16 en OPNET
	5.3. Simulacion en OPNET
	5.4. Comparacion de resultados
	5.5. Conclusiones
Capitulo 6	Conclusiones
	6.1. Discusiones finales
	6.2. Trabajo futuro
	6.3. Contribuciones
	6.4. Conclusiones finales
Referencias	
Apendice A	Acronimos y abreviaturas
Apendice B	Codigo para la evaluación del throughput del sistema
Apendice C	Comparación modelo analitico y simulacion

Indice de tablas

- Tabla 2.1. Características de AMPS
- Tabla 2.2. Características de tecnologías 2G.
- Tabla 2.3. Tecnologías de radio-transmisión
- Tabla 2.4. Comparación entre las versiones del estándar IEEE 802.11.
- Tabla 2.5. Comparación técnica entre el estándar IEEE 802.11 y el IEEE 802.16.
- Tabla 2.6. Servicios DSL y sus propiedades
- Tabla 3.1. Tipos de CIDS.
- Tabla 3.2. Mensaje de control MAC.
- Tabla 3.3. Codificaciones TLV parámetros descriptores para el canal descendente.
- Tabla 3.4. Codificaciones TLV parámetros descriptores para el canal descendente (banda 10-66 GHz).
- Tabla 3.5. Elementos de información (information elements, IE) de los mensajes de control mapa.
- Tabla 3.6. Tipos de servicio para transmisiones en el UL.
- Tabla 5.1. Parámetros de simulación.
- Tabla b.1. Resultados primer escenario, R = 12 slots.
- Tabla b.2. Resultados primer escenario, R = 18 slots.
- Tabla b.3. Resultados primer escenario, R = 24 slots.
- Tabla b.4. Resultados primer escenario, R = 30 slots

Indice de Figuras

- Figura 1.1. Red inalámbrica de banda ancha.
- Figura 2.1. Visión de la evolución de los distintos protocolos disponibles, con sus velocidades máximas teóricas.
- Figura 2.2. Cdma2000 1x puede ser implementado en un espectro existente o en un nuevo espectro designado.
- Figura 2.3. Arquitectura BWA.
- Figura 2.4. Configuración de una red LAN.
- Figura 2.5. Topología de una red DSL básica.
- Figura 3.1. MAC PDU.
- Figura 3.2. Formato de un encabezado genérico.
- Figura 3.3. Formato de un encabezado de solicitud de ancho de banda.
- Figura 3.4. Formato del MAC management message.
- Figura 3.5. Consulta unicast.
- Figura 3.6. Consulta multicast y broadcast.
- Figura 3.7. Estructura del frame para TDD.
- Figura 3.8. Estructura del frame para enlace de subida TDD.
- Figura 3.9. Estructura del frame para enlace de bajada TDD.
- Figura 4.1. Canal DL.
- Figura 4.2. Multiframe WiMAX.
- Figura 4.3. Codificación de un mensaje de 300 bytes (palabra de código larga).

- Figura 4.4. Throughput como funcion del numero de usuarios, longitud del mensaje fijo $m = 300$ bytes y R como parametro.
- Figura 5.1. Modelo de simulacion en OPNET.
- Figura 5.2. Red BWA con 100 usuarios (SSs).
- Figura 5.3. Parametros de simulacion de la SS.
- Figura 5.4. Distribucion trafico constante.
- Figura 5.5. Throughput para la red de 100 usuarios (simulacion en opnet).
- Figura 5.6. Throughput en capa PHY para la red de 100 nodos.
- Figura 5.7. Comparacion entre los modelos para un periodo de contencion $R = 12$ slots.
- Figura 5.8. Comparacion entre los modelos para un periodo de contencion $R = 18$ slots.
- Figura 5.9. Comparacion entre los modelos para un periodo de contencion $R = 24$ slots.
- Figura 5.10. Comparacion entre los modelos para un periodo de contencion $R = 30$ slots.
- Figura 5.11. Desviacion porcentual entre los modelos.

Capítulo 1

Introducción

1.1. Definición del problema

La gran demanda de nuevos servicios de información que pueden ser utilizados desde el hogar o pequeños negocios tales como Internet de alta velocidad y servicios multimedia (voz, imagen, datos) ha creado un mayor interés en el acceso de banda ancha de última milla.

Actualmente estos servicios de telecomunicaciones son ofrecidos al usuario básicamente por los siguientes medios: el cable o fibra, el xDSL, y las redes inalámbricas. Sin embargo, la forma tradicional de proveer banda ancha mediante líneas alámbricas invierte demasiado tiempo, es sumamente costoso y carente de flexibilidad.

Por lo anterior, durante los últimos cuatro años las expectativas y realidades entorno al acceso de última milla de banda ancha por medio inalámbrico han creado una ventana de oportunidad para fabricantes, integradores y prestadores de servicios difícil de ignorar.

Lo que en su momento inició como el estándar IEEE 802.16 y que definía soluciones para acceso en los rangos de frecuencia de los 2 a los 60 GHz, recientemente ha sido ratificado en su última versión, la 802.16-2004, para los rangos de 2 a 6 GHz. El estándar 802.16-2004 define parámetros de la interfase inalámbrica para acceso de banda ancha a nivel físico y de acceso al medio (MAC). Las principales diferencias que existen entre la versión anterior, el 802.16a, se relacionan con el consumo de potencia en los sistemas. Como siguiente fase se prevé la adición de movilidad bajo la versión 802.16e, la cual se espera se materialice para el año 2006.

Contrario a las redes celulares actuales (GSM y CDMA), las tecnologías de acceso inalámbrico de banda ancha (BWA, por sus siglas en inglés) tienen un ancho de banda muy superior a las redes celulares en la banda SHF (*Super High Frequency*) y EHF (*Extremely High Frequency*), con velocidades de transmisión de datos por arriba de los 100 Mbps.

La ventaja de esta evolución de mercado se traduce en economías de escala, lo cual conlleva una reducción de costos en infraestructura.

Definitivamente la industria inalámbrica está viviendo un momento único. La disponibilidad de tecnología probada, la creación de estándares y grupos de trabajo y la gran necesidad de llevar el acceso multiservicios a zonas no abastecidas hacen de esta tecnología no sólo un mecanismo de competitividad sino una herramienta social, la cual puede ser implementada en relativamente cualquier parte del mundo.

Los estudios obtenidos a través de esta tesis permitirán conocer el funcionamiento de una red de comunicaciones basada en un esquema de acceso inalámbrico de banda ancha, con base en un conjunto de consideraciones concernientes a la capa de enlace de datos del modelo de referencia de Interconexión de Sistemas Abiertos, OSI.

Además, los resultados generados por este proyecto permitirán llevar a cabo futuros desarrollos para mejorar el desempeño de los sistemas de acceso inalámbrico de banda ancha basados en las normas del IEEE 802.16.

1.2. Modelado de redes de acceso inalámbrico de banda ancha (BWA)

Los sistemas de acceso inalámbrico de banda ancha (BWA), utilizan estaciones base (*Base Station*, BS) para proveer servicios a varios usuarios o estaciones subscriptoras (*Subscriber Station*, SS). El modo de acceso al canal de subida (de la SS a la BS) se basa en la técnica TDMA (*Time Division Multiple Access*) y cada canal de subida está conformado por un número fijo de *minislots*. Por otro lado, el canal descendente (de la BS a la SS) usa la técnica TDM (*Time Division Multiplexing*). Un esquema de una red BWA se muestra en la figura 1.1.

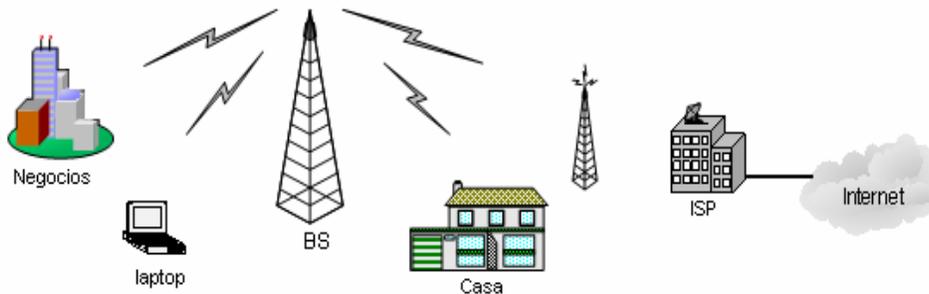


Figura 1.1. Red Inalámbrica de Banda Ancha.

Cuando un usuario desee transmitir información, primeramente deberá mandar un mensaje de reservación a la BS a través del módem inalámbrico. Este mensaje de reservación le indica a la BS el número de *slots* que requiere la SS para poder efectuar su transmisión.

Cada *frame* en el canal de subida está en periodo de contención, periodo de transmisión y periodo de *ranging* de acuerdo a la asignación de ancho de banda del mapa que la BS transmite a las SSs a través del canal descendente.

1.3. Propuesta de redes BWA

El estándar IEEE 802.16 es un sistema BWA de alta tasa de transmisión de datos y largo alcance (hasta de 50 Km.), escalable y en cuya cobertura se considera la incorporación de antenas sectoriales tradicionales o antenas adaptivas con modulaciones adaptables que permiten intercambiar ancho de banda por alcance.

Este protocolo operará en la banda de 2.5 a 11 GHz para sistemas fijos y móviles y en la banda de 11 a 66 GHz para sistemas fijos solamente. En cuanto a la calidad de servicio, del estándar IEEE 802.16 soporta calidad garantizada para audio y video, así como servicios diferenciados (E1/T1, *best effort*). Las velocidades de transmisión del protocolo IEEE 802.16 se espera que oscilen entre los 32Mbps y 134Mbps aproximadamente.

Además si una de sus variantes (el estándar IEEE 802.16e, en el que se integra la movilidad) se solidifica, es probable que llegue a ser un auténtico competidor del UMTS.

Por otro lado, existe un protocolo europeo: el ETSI HIPERLAN, el cual pretende operar en la banda de los 5 GHz y 17 GHz, y lograr velocidades de transmisión de datos que van de los 25 a 54 Mbps (para la banda de 5 GHz) y 155 Mbps (a 17 GHz). El protocolo que considera la banda de operación en los 5 GHz soporta movilidad pero su mayor desventaja es que un usuario móvil solamente se podrá mover dentro del área de cobertura local, y no será posible cambiar de estación base.

De momento este estándar junto con el ETSI HIPERLAN, son las bases del WiMAX. Una tecnología que, según las previsiones, será ampliamente aceptada en el uso residencial, seguido de pequeñas y medianas empresas, mientras que, también será predominante en el aspecto portátil, si los ordenadores portátiles llegan a incluir esta tecnología.

1.4. Objetivos y Contribuciones

El objetivo fundamental de este trabajo es incrementar el conocimiento actual de las redes inalámbricas de banda ancha.

Para ello se realizará un análisis detallado acerca del comportamiento de una red inalámbrica de banda ancha basada en el protocolo IEEE 802.16.

El modelo matemático que se desarrollará en el presente estudio permitirá evaluar el *throughput* de un sistema WiMAX como una función de varios parámetros tales como: número de usuarios, longitud del mensaje y número de *slots* de contención.

Asimismo dichos resultados se verificarán mediante la simulación de la red inalámbrica de banda ancha en estudio, para ello se empleará el simulador OPNET modeler v.8.

El conocimiento de las características de este protocolo de comunicaciones de banda ancha IEEE 802.16 resulta de gran importancia ya que permite a los proveedores de este tipo de servicios planear las aplicaciones que se les puede vender a los usuarios, así como valorar los costos y tarifas por cliente, para que finalmente se pueda implementar la topología de red que deberá soportar los servicios a ofrecer.

Por otro lado, los resultados presentados en este trabajo servirán para futuros estudios acerca de las redes inalámbricas de banda ancha en los que se tomarán en cuenta otros factores importantes, de los que citamos los siguientes: manejo de diferentes tipos de tráfico, técnicas de mejoramiento en la asignación de *slots* de contención en el canal de subida para la transmisión de datos, calidad de servicio (QoS), etc.

Cabe destacar que esta tesis se realizó dentro del marco de investigación del proyecto PAPIIT IN-110805 "Técnicas de Mejoramiento de Capacidad de Redes Inalámbricas de Banda Ancha".

1.5. Estructura de la Tesis

El presente estudio muestra el comportamiento dinámico de una red inalámbrica de banda ancha cuya operación está basada en el protocolo IEEE 802.16.

En el segundo capítulo se presenta el estado del arte de las redes de tercera generación y de las redes BWA, en él se describen las tecnologías más representativas de cada generación.

En el tercer capítulo se hace una descripción del protocolo de comunicaciones de banda ancha IEEE 802.16, en este apartado se muestra la arquitectura del protocolo y también se explica la operación del mismo, incluyendo los procesos de comunicación entre la BS y la SS durante el inicio de la conexión y la operación de la red.

El cuarto capítulo está orientado al desarrollo de un modelo matemático que permitirá evaluar el funcionamiento de una red inalámbrica WiMAX. Al final de este capítulo se muestran los resultados obtenidos con el citado modelo analítico.

En el quinto capítulo se comprobarán los resultados obtenidos en el capítulo 4, para ello se hará la comparación entre los resultados dados por medio del simulador de redes OPNET modeler v.8 y el modelo matemático desarrollado.

El sexto y último capítulo se enfoca a las conclusiones y discusiones finales del presente trabajo, en él también se realiza un análisis del trabajo futuro y en general se hace una revisión de los objetivos propuestos para concluirlos con los resultados logrados.

Capítulo 2

Estado del Arte de las Redes de Tercera Generación y de las Redes BWA

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 es 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 de 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. Sin embargo, 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. Estos sistemas se pueden clasificar en distintas generaciones dependiendo del grado de evolución técnica de los mismos.

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

2.2. Evolución de los Sistemas de Telefonía Móvil

2.2.1. La Primera Generación 1G

Es la más antigua de todas, haciendo su aparición en 1979, y engloba a todas aquellas tecnologías de comunicaciones móviles analógicas con capacidad para transmitir voz 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, ya que a cada llamada se le asigna un par de frecuencias diferente: 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.

La tecnología FDMA es usada en el estándar norteamericano AMPS así como también en otros estándares análogos en todo el mundo, incluyendo TACS y NMT. El Servicio Avanzado de Telefonía Móvil fue la tecnología implementada para telefonía celular en el año de 1983 y fue el estándar más ampliamente utilizado en el mundo.

Algunas características de AMPS se muestran en la siguiente tabla.

Características de AMPS	
Frecuencia	825-845 MHz; móvil-estación base 870-890 MHz; estación base-móvil
Ancho de Canal	30 KHz.
Número de Canales	416

Tabla 2.1. Características de AMPS

2.2.2. 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*).

La tabla 2.2 muestra un resumen de las tecnologías 2G.

Normas para la Interfaz de Aire	Ancho de Banda de la Interfaz de Aire	Servicios de Datos
IS - CDMA	1.25 MHz	SMS, Conmutación de Circuitos para Datos a una velocidad de más de 14.4 kbps.
IS - 136 TDMA	30 KHz	SMS, Conmutación de Circuitos para Datos a una velocidad de más de 9.6 kbps.
GSM	200 KHz	SMS, Conmutación de Circuitos para Datos a una velocidad de más de 9.6 kbps.

Tabla 2.2. Características de tecnologías 2G.

2.2.3. 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.

2.3. Redes de Tercera Generación

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.

Los terminales 3G combinarán la funcionalidad de un teléfono móvil con la de un PDA (*Personal Digital Assistant*) y un ordenador personal 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.

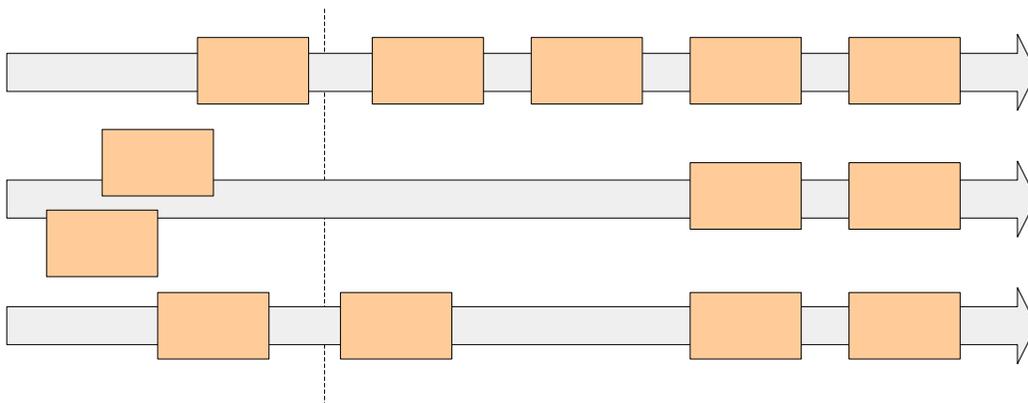


Figura 2.1. Visión de la evolución de los distintos protocolos disponibles, con sus velocidades máximas teóricas.

Algunas de las funcionalidades más interesantes de la tecnología 3G, a parte 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.

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 2.3.

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

Tabla 2.3. Tecnologías de Radio-transmisión

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

2.3.1. 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 las operadoras 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 *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.

2.3.2. 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.

CDMA2000 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 CDMA2000 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 condicen 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 2Mbps.

2.3.2.1. 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.

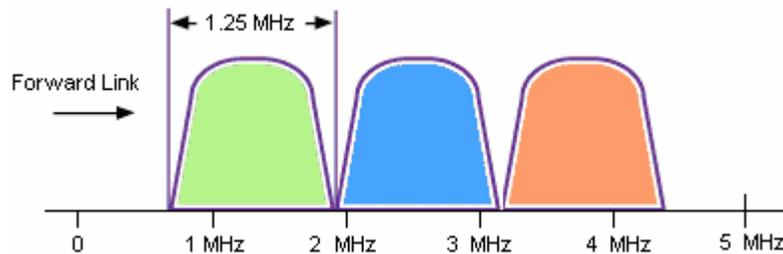


Figura 2.2. CDMA2000 1X puede ser implementado en un espectro existente o en un nuevo espectro designado.

2.3.2.2. 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*).

1xEV-DO se caracteriza por mejorar el volumen de transmisión de datos y alcanzar 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.

2.3.2.3. WCDMA

WCDMA es la tecnología de interfaz de aire en la que se basa la UMTS (*Universal Mobile Telecommunication System*), 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.

2.3.3. UMTS-HSPDA

UMTS (*Universal Mobile Telecommunication System*) 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 del 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.

2.4. Redes Inalámbricas de Banda Ancha

2.4.1. Arquitectura BWA

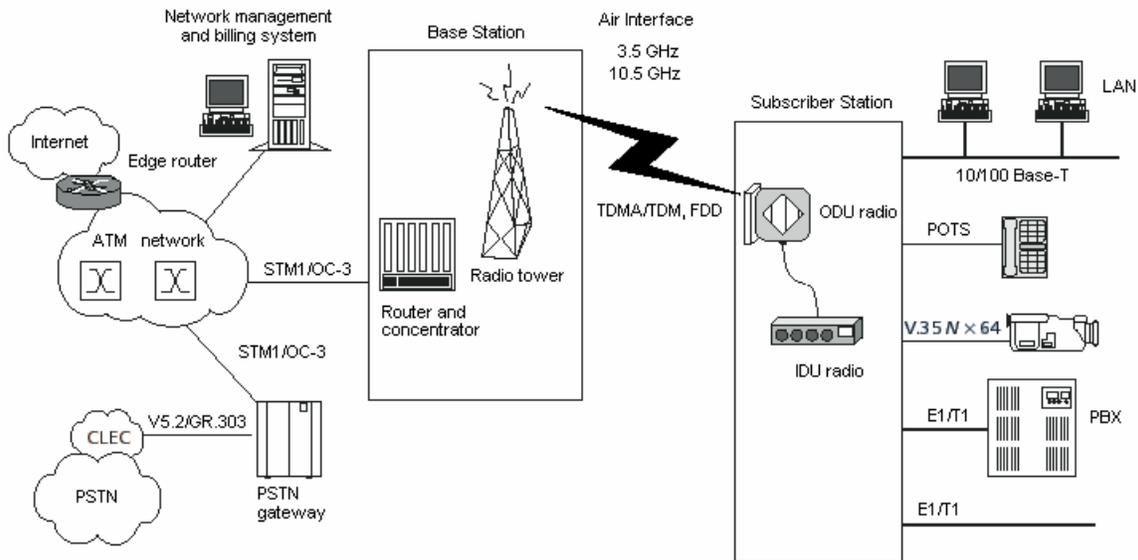


Figura 2.3. Arquitectura BWA.

Un sistema BWA está compuesto por al menos una BS y una o más SSs. La BS y las SSs conforman la interfaz aérea del sistema (*Outdoor Unit*, ODU), en donde se incluye los transmisores, receptores y antenas. Por otro lado, se encuentra la interfaz alámbrica (*Indoor Unit*, IDU) 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.

La BS le asigna un canal de radio a cada una de las SSs 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 y 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, en 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 SSs comparten en el tiempo los canales de subida (*Up Link*, UL) y de bajada (*Down Link*, DL). 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.

2.4.2. Redes IEEE 802.11 o WiFi

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 de hasta 11Mbps dentro de los 90 metros a partir de la estación base en donde se transmite la señal.

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.

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, tal y 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 estaciones conectadas a un AP que actúa como puente a una red alámbrica.

GHz, mientras que la rectificación del estándar 802.16a fue diseñado para sistemas que operen en bandas entre 2 GHz y 11 GHz.

La significativa diferencia entre estas dos bandas de frecuencia se encuentra en la habilidad de soportar la operación de NLOS (*Non-Line-of-Sight*) en las frecuencias más bajas, algo que no es posible en las frecuencias altas.

WiMAX y WiFi son soluciones complementarias para dos aplicaciones bastante diferentes. WiFi fue diseñado para el uso privado en una oficina cerrada para una red Ethernet. WiMAX fue diseñado para que un *carrier* lo use en la última milla para dar servicios a suscriptores con requerimientos distintos, y tarifas distintas. Otras diferencias técnicas entre estos protocolos se observan en la Tabla 2.5.

Estándar	802.11	802.16
Velocidad máxima	54 Mbps	100 Mbps
Tecnología	OFDM	OFDM
Subcarriers (FFT)	64	256
MAC	CSMA / CA	TDM / TDMA
Cobertura	Interno 100 m	Externo varios Km
Usuarios	Cientos	Miles
QoS	En desarrollo	Sí

Tabla 2.5. Comparación técnica entre el estándar IEEE 802.11 y el IEEE 802.16.

En el futuro es posible que WiMAX crezca hasta soportar aplicaciones que hoy en día no son soportadas, como movilidad y aplicaciones PDA.

2.5. Otras Tecnologías

2.5.1. LMDS

LMDS (*Local Multipoint Distribution Service*) aparece como una prometedora tecnología de gran valor estratégico en el marco de las comunicaciones inalámbricas de banda ancha.

Su importancia se debe fundamentalmente a tres razones. En primer lugar, los sistemas LMDS se pueden desplegar e instalar muy rápidamente en comparación con las tecnologías homólogas basadas en cable e incluso con relación a sus homólogas inalámbricas. Además, estos sistemas pueden ser ampliados muy fácilmente con un nivel de riesgo realmente bajo, gracias a la naturaleza intrínsecamente modular de su arquitectura. En segundo lugar, LMDS permite el acceso a Internet de alta velocidad, tanto para el sector residencial como para el empresarial, gracias a las técnicas digitales que se han incorporado recientemente. Finalmente, esta tecnología presenta un importante potencial como tecnología de acceso (especialmente compatible con las redes de fibra óptica) para nuevos operadores que no dispongan de grandes recursos financieros, así como para los CLEC (*Competitive Local Exchange Carrier*).

La principal diferencia de los sistemas LMDS con respecto al resto de tecnologías de acceso vía radio es su margen de frecuencias de trabajo. En este caso, LMDS opera a frecuencias milimétricas en torno a los 28 GHz (banda Ka). Dada la congestión espectral que existe a frecuencias bajas, esta es la única forma de conseguir anchos de banda elevados. En particular, anchos de banda de unos 2 GHz son típicos en estos sistemas. Las elevadas frecuencias utilizadas en los sistemas LMDS limitan enormemente la cobertura como consecuencia de la atenuación introducida en el trayecto de propagación radio. Esto les confiere una estructura celular, de tal forma que existen BS distribuidas por toda la zona que se desea cubrir.

Las comunicaciones en los sistemas LMDS se realizan en forma de radiodifusión desde la estación base hacia los usuarios, en lo que se conoce como punto a multipunto. Al mismo tiempo, dado que la comunicación es bidireccional, los usuarios también pueden establecer enlaces punto a punto con dicha estación base. Para el enlace descendente suele utilizarse TDMA como técnica de acceso. Por otro lado, para el enlace ascendente se utilizan combinaciones de acceso múltiple TDMA y FDMA. Los esquemas de modulación más empleados son QPSK y QAM. Las modulaciones de fase (QPSK) son más resistentes frente a interferencias y distorsión que las modulaciones de amplitud (QAM), aunque como desventaja se tiene una menor eficiencia espectral que conduce a menores velocidades de transmisión.

2.5.2. ISDN

ISDN (*Integrated Service Digital Network*), es un servicio que utiliza el cable de cobre de la línea telefónica existente en una instalación para soportar datos a mucha mayor velocidad de transmisión.

ISDN es un sistema de telefonía digital punto a punto que inicialmente se diseñó para sustituir por completo el sistema telefónico actual por un servicio totalmente digital,

pero ahora se ve como una tecnología alternativa para los usuarios domésticos que necesitan conexiones de red de gran ancho de banda y para enlaces entre redes de negocios.

Al contrario que una conexión por módem, que utiliza líneas telefónicas convencionales, las conexiones ISDN son casi instantáneas por su carácter digital, al igual que la red de computadoras, y no se necesita una conversión analógica-digital. ISDN puede transportar diversos tipos de tráfico, como voz, fax y datos.

Los servicios básicos, facilitados por la portadora, que proporcionan los medios básicos para permitir el tráfico de la información, entre dos puntos de la red, y en tiempo se mencionan a continuación.

Conmutación de circuitos:

- Tráfico de datos a 64 Kbps.
- Conversación telefónica.
- Servicio de audio a 3,1 KHz.
- Simultaneidad de datos y voz (2 o más canales B).
- Tráfico de datos a 384 Kbps.
- Tráfico de datos a 1.536 Kbps. (US) o 1.920 Kbps. (Europa).
- Backup digital de líneas punto a punto

Conmutación de paquetes:

- Circuitos conmutados y circuitos virtuales permanentes.
- Señalización de usuario.

También existen otro gran grupo de servicios que ofrece una red RDSI denominados Teleservicios:

- Telefonía: Conversación a 3,1 KHz.
- Videoconferencia: a través de dos o más canales B.
- Teletexto: Según norma CCITT F.200.
- Telefax: Comunicaciones según norma CCITT Grupo 4.
- Modo mixto: Teletexto y fax grupo 4 combinados (F.200 anexo C).
- Videotexto: Almacenamiento y recuperación de textos y gráficos de buzones.
- Vigilancia y seguridad remotas, a través de líneas no dedicadas.
- Aplicaciones médicas: transferencia de rayos X, telemedicina, ultrasonidos y scanners.
- Transmisiones de radio de alta calidad de audio

2.5.3. DSL

El término DSL (*Digital Subscriber Line*), denominado a veces xDSL, agrupa varias tecnologías relacionadas que proporcionan un servicio WAN similar, en cierto sentido, a ISDN, pero a velocidades mucho mayores. Al igual que ISDN, DSL utiliza los cables de la telefonía estándar para la transmisión de datos desde el domicilio de un usuario al PoP de una compañía telefónica por medio de una conexión privada punto a punto.

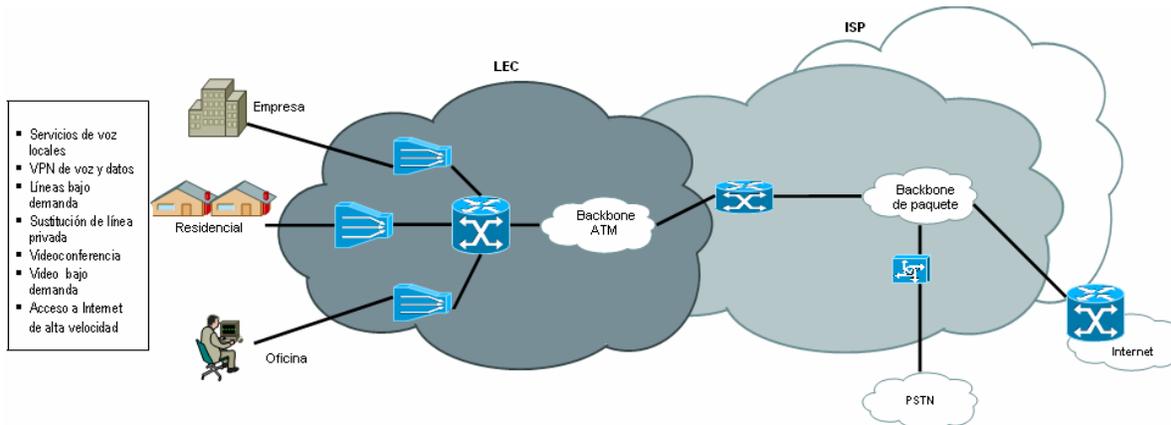


Figura 2.5. Topología de una red DSL básica.

Las velocidades de transmisión de los servicios DSL varían enormemente y muchos de los servicios tienen un funcionamiento asimétrico, lo que significa que poseen velocidades diferentes de subida y de bajada. DSL utiliza frecuencias por encima del ancho de banda de telefonía estándar y métodos de codificación de señal avanzados para transmitir datos a mayor velocidad. Algunos de los servicios DSL sólo utilizan frecuencias fuera del intervalo de las comunicaciones de voz estándar, por lo que la línea se puede utilizar para tráfico normal de voz a la vez que transporta datos digitales. Por esta razón DSL se está promocionando con fuerza como solución de acceso a Internet.

Sin embargo, los operadores de telefonía local han empleado los servicios con velocidades más altas, como HDSL (*High-bit-rate Digital Subscriber Line*). La operación asimétrica no representa un problema para servicios ADSL (*Asymmetrical Digital Subscriber Line*), utiliza para tener acceso a Internet, ya que los usuarios típicos de Internet descargan muchos más datos de los que cargan. Sin embargo para conexiones WAN, son normales los servicios simétricos, como HSDL.

Actualmente las compañías telefónicas ofrecen el servicio xDSL de punto a punto debido a que ofrecen servicios de línea rentada de T1 y T3. El término xDSL aborda numerosas formas (aunque competidoras) de DSL, entre las cuales incluyen DSL asimétrica (ADSL), la DSL simétrica (SDSL), la DSL de alta velocidad de datos (HDSL), la DSL adaptable a la velocidad (RADSL) y la DSL de muy alta velocidad de datos (VDSL). xDSL está llamando mucho la atención de los implementadores y proveedores de servicios, ya que promete enviar velocidades muy altas de datos con mucho ancho de banda a ubicaciones dispersas efectuando cambios relativamente pequeños en la infraestructura de telecomunicaciones existente.

Los servicios xDSL conforman un acceso de red dedicada, punto a punto y pública sobre cable de cobre de par trenzado en el bucle local (“última milla”) entre la oficina central de un proveedor de servicios de red y el sitio del cliente, o en los bucles locales creados, o bien dentro de un edificio, o dentro de un campus.

A continuación, en la tabla 2.6 se listan los diferentes servicios xDSL y sus propiedades.

Servicio	Velocidad de Transmisión	Longitud del enlace	Posibilidad de voz simultánea	Aplicaciones
HDSL (<i>High-bit rate Digital Subscriber Line</i>)	1.544 Mbps <i>full duplex</i> (dos pares de hilos) o 2.048 <i>full duplex</i> (tres pares de hilos)	3.6 - 4.6 km	No	Substituto de T1/E1 para conexiones a Internet, interconexiones de LAN y centralitas.
SDSL (<i>Symmetrical Digital Subscriber Line</i>)	1.544 Mbps <i>full duplex</i> (dos pares de hilos) o 2.048 <i>full duplex</i> (tres pares de hilos)	3 km	Sí	Substituto de T1/E1 para conexiones a Internet, interconexiones de LAN y centralitas.
ADSL (<i>Asymmetrical Digital Subscriber Line</i>)	1.544 - 8.448 Mbps en bajada; 640 Kbps - 1.544 Mbps en subida	3 - 5.5 km	Sí	Acceso a Internet/intranet, acceso remoto a LAN, redes privadas virtuales, video bajo demanda, voz sobre IP.
RADSL (<i>Rate Adaptive Digital Subscriber Line</i>)	1.544 - 8.448 Mbps en bajada; 640 Kbps - 1.544 Mbps en subida	3 - 5.5 km	Sí	Lo mismo que ADSL, excepto que la velocidad de transmisión se ajusta de forma dinámica según la longitud del enlace y a calidad de la señal.
ADSL Lite	Hasta 1 Mbps en bajada; hasta 512 Kbps en subida	5.5 km	Sí	Acceso a Internet/intranet, acceso remoto a LAN, telefonía por IP, video conferencia
VDSL (<i>Very-high bit-rate Digital Subscriber Line</i>)	12.96 - 51.84 Mbps en bajada; 1.6 - 2.3 Mbps en subida	300 - 1400 m	Sí	Acceso multimedia a Internet, oferta de televisión de alta definición
ISDSL (<i>ISDN Digital Subscriber Line</i>)	Hasta 144 Kbps <i>full duplex</i>	5.5 km	No	Acceso a Internet/intranet, acceso remoto a LAN, telefonía por IP, videoconferencia.

Tabla 2.6. Servicios DSL y sus propiedades

2.5.4. Sistemas Satelitales

Las comunicaciones vía satélite han sido una tecnología muy utilizada para proveer comunicaciones a áreas alejadas y de difícil acceso. Ante la escasa y en muchos casos nula infraestructura terrestre de comunicaciones (por ejemplo, fibra óptica) en las zonas remotas, las comunicaciones vía satélite abren una ventana hacia al resto del mundo. Las comunicaciones satelitales permiten transmitir múltiples servicios de voz, datos y video a velocidades en el orden de Mbps. Las terminales satelitales hacen posible las comunicaciones donde otros medios no pueden penetrar por su alto costo.

La introducción de pequeñas terminales conocidas como VSAT (*Very Small Aperture Terminal*) ha permitido que el costo de las comunicaciones vía satélite haya bajado drásticamente. VSAT es una tecnología de comunicaciones vía satélite que mediante el uso de antenas de satélite con diámetros pequeños, permiten comunicaciones altamente seguras entre una estación maestra y nodos dispersos geográficamente. Entre las aplicaciones típicas de este tipo de terminales se encuentra la telefonía rural, educación a distancia, redes privadas y acceso a Internet, entre otras.

Existen satélites de todo tipo, los hay geoestacionarios (GEO, *Geostationary Earth Orbit*), aquellos que giran a una órbita natural a 36,000 Km. de la superficie de la tierra, proveen comunicaciones fijas para aplicaciones de voz, datos y video en las bandas C y Ku principalmente. Existen satélites en órbitas bajas (LEO, *Low Earth Orbit*) y medias (MEO, *Medium Earth Orbit*) que dan varias vueltas a la tierra y que para cubrir casi toda la superficie están agrupados en constelaciones de satélites, y además por su baja altitud su latencia es breve. Muchos de estos satélites proveen aplicaciones móviles de voz, sensado remoto (SCADA), meteorología, determinación de la posición (GPS), etc. La mayoría de estos trabajan en la banda móvil L.

2.6. Conclusiones

Actualmente existen diversas tecnologías que ofrecen servicios de banda ancha no obstante, las tecnologías inalámbricas y en especial las relacionadas con las redes locales y metropolitanas están experimentando un crecimiento muy superior al resto de las tecnologías, esto se debe a que las nuevas técnicas inalámbricas se presentan ante el operador de cable como una oportunidad para extender su red hacia áreas sin cobertura y cuyo cableado no se justifica económicamente.

Entre las características más evidentes que presentan los sistemas cableados frente a los inalámbricos es que los primeros tardan más tiempo en promedio para ofrecer toda la gama de los servicios. Pues se estima que el tiempo de instalación de toda la infraestructura alámbrica puede durar por lo regular desde muchos meses hasta años con una razón de clientes potenciales del 70%, lo originan muchos gastos previos por el largo tiempo transcurrido en la instalación total del sistema.

Por otra parte, la mayoría de los sistemas inalámbricos pueden ser instalados en unos cuantos meses con una razón de clientes potenciales del 90%. Otra ventaja de los sistemas inalámbricos es que son adaptables al tráfico, es decir, pueden instalarse menos radio bases separadas a más distancia entre ellas en lugares donde el tráfico sea menor. De la misma manera, pueden instalarse más radio bases a más corta distancia entre ellas en lugares donde hay mucho tráfico.

En el presente trabajo enfocaremos nuestro estudio en el protocolo de redes inalámbricas de banda ancha del IEEE 802.16.

Los siguientes capítulos se dedican a la descripción de las principales características del estándar IEEE 802.16, esto es, su control de acceso al medio y el comportamiento dinámico de esta tecnología inalámbrica.

Capítulo 3

Descripción del Estándar IEEE 802.16 WiMAX

3.1. Introducción

El rápido crecimiento de la demanda por Internet de alta velocidad y servicios multimedia para uso residencial y de pequeños negocios, ha creado un mayor interés en el acceso de banda ancha de última milla [2]. El acceso inalámbrico de banda ancha aparece así como una tecnología atractiva, con numerosas ventajas y que se posiciona como una solución alternativa al acceso mediante una red alámbrica como enlaces de fibra óptica, sistemas de cable coaxial que utilizan un cable MODEM y DSL [2] [3].

En el año 2000, el grupo IEEE inició el *IEEE 802.16 Working Group* para crear estándares que regulen el acceso inalámbrico de banda ancha con el objeto de ofrecer una solución escalable, de bajo costo y alta capacidad, la cual incluye tanto usuarios como tasa de transmisión, para extender el *backbone* de fibra óptica [4].

El estándar IEEE 802.16 cuenta con distintas versiones de los que sobresalen el 802.16 que emplea el espectro entre 10 y 66 GHz y que requiere línea de vista (LOS, *Line of Sight*) entre el transmisor y el receptor, IEEE 802.16a que opera en la banda de frecuencias entre 2 y 11 GHz, y el 802.16e que está enfocado en proveer movilidad al estándar y que funciona en bandas menores de 6 GHz [4] [6]. Las dos últimas versiones mencionadas con anterioridad, no requieren LOS.

El estándar IEEE 802.16 permite alcanzar tasas de transferencia máxima que fluctúan entre 32 y 130 Mbps dependiendo del ancho del canal de frecuencia y de la técnica de modulación [5]. Adicionalmente se destaca que el estándar IEEE 802.16 posee la capacidad de utilizar ventajas ofrecidas por los sistemas de antenas avanzados que actualmente se encuentran disponibles.

3.2. Operación del Protocolo IEEE 802.16

3.2.1. El Control de Acceso al Medio en IEEE 802.16

El estándar IEEE 802.16 [1] describe un control de acceso al medio que puede compartir el canal de radio entre cientos de usuarios. Éste estándar usa un mecanismo del tipo solicitud/entrega (*Request/Grant Protocol*) similar al utilizado por los sistemas de cable modem (DOCSIS). El acceso al medio se puede configurar por TDD (*Time Division Duplex*), con un único canal de comunicación, como por FDD (*Frequency Division Duplex*) con varios canales en distintas portadoras.

Para ambos casos, el protocolo de acceso utiliza TDMA (*Time Division Multiple Access*) el cual ranura el tiempo tanto en el canal de subida (desde la terminal a la estación base) como en el de bajada (desde la estación base hacia la terminal). 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.

3.2.2. Direccionamiento y tipo de conexiones

Las SSs 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 (*Connection Identifier*), que consta de 16 bits, permitiendo hasta 65 536 conexiones en cada canal ascendente y descendente.

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, mensajes de control basados en estándares como DHCP (*Dynamic Host Configuration Protocol*), TFTP (*Trivial File Transfer Protocol*), SNMP (*Simple Network Management Protocol*), etc.

El CID funciona como un apuntador hacia el destino de cada conexión y también proporciona información acerca del contexto en la que se realiza. Por ende, el tipo de servicio que la BS brinda está implícito en el CID.

CID	Valor	Descripción
<i>Ranging</i>	0x0000	Usado por una SS durante el proceso de <i>ranging</i> como parte del proceso de entrada a la red.
CID para conexión básica	0x0001 - m	
CID para conexión primaria	$m + 1 - 2m$	
CID para conexión Secundaria	$2m + 1 - 0xFFEF$	
CID para consultas Multicast	0xFF00 - 0xFFFE	Una SS puede ser incluida en un grupo <i>multicast</i> para propósitos de obtención de ancho de banda mediante consultas
CID para mensajes tipo Broadcast	0xFFFF	Usado para información <i>broadcast</i> que es transmitida en el DL a todas las SSs.

Tabla 3.1. Tipos de CIDs.

Adicionalmente, cada solicitud de asignación de ancho de banda que realizan las SSs está basada en el CID, por lo que el ancho de banda disponible será distinto para conexiones diferentes. Además, es posible que una sola conexión soporte tráfico proveniente de distintas sesiones de capas superiores.

En la tabla 3.1 se muestran los diversos tipos de CIDs así como su significado.

3.2.3. Unidad Básica de Comunicación

El *MAC Protocol Data Unit* (MAC PDU) es la unidad básica de comunicación intercambiada entre la capa MAC de la BS y las SSs.

El MAC PDU posee tres campos como se puede apreciar en la figura 3.1. El primer campo es de tamaño fijo y corresponde al *Generic MAC Header* (Encabezado Genérico), el segundo campo es opcional, de longitud variable, y corresponde a la carga útil (*Payload*) que puede tener sub-encabezados, mientras que el tercer campo correspondiente al CRC (*Cyclic Redundancy Check*), es también opcional y protege tanto al *Generic MAC Header* como al *Payload*.

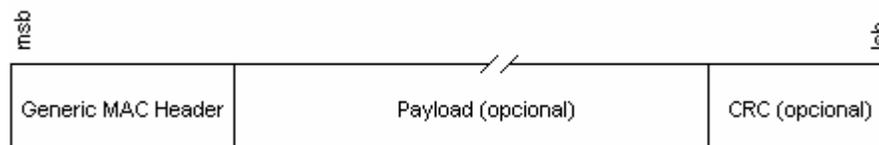


Figura 3.1. MAC PDU.

3.2.3.1. Formatos de los paquetes de transmisión MAC

El transporte de la información a través de la capa MAC IEEE 802.16 se realiza mediante el procesamiento de los paquetes provenientes del Punto de Acceso al Servicio de la Subcapa de Convergencia. Dicho procesamiento consiste en la agregación de encabezados de control de 6 bytes.

El estándar 802.16 [1] define dos tipos de *MAC Headers*: Encabezado Genérico (*Generic MAC Header*, GMH) y el Encabezado de Solicitud de Ancho de Banda (*Bandwidth Request Header*, BRH), los cuales son señalizados en el primer *bit* (*Single Bit Header Type*, HT) del MAC PDU: HT=0 para un Encabezado Genérico y HT=1 para un Encabezado de Solicitud de Ancho de Banda.

A continuación se describen estos tipos de encabezados:

- **Encabezado Genérico:** Este tipo de encabezado se utiliza para los paquetes que incluyen información de usuario de control. Puede contener información indicando que se ha agregado un sub-encabezado, aplicable en el caso de las transmisiones de paquetes de control, o bien cuando se emplean las funciones de fragmentación, concatenación o empaquetamiento.

El formato de este encabezado es el que se muestra en la figura 3.2.

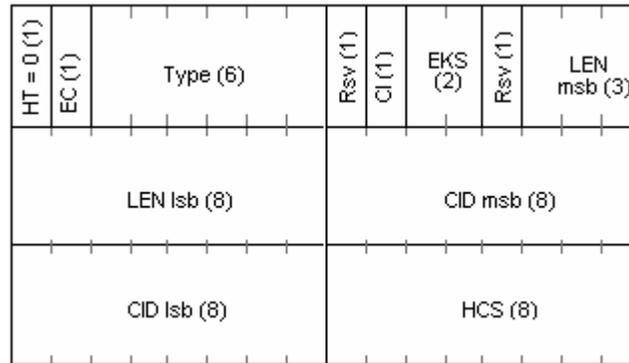


Figura 3.2. Formato de un Encabezado Genérico.

En el GMH se especifica el HT descrito anteriormente, la encriptación del *Payload* (EC=1 cuando el *Payload* no es encriptado, y el EC=0 cuando sí está encriptado), el tipo de *payload* incluyendo la presencia de *subheaders* (*Type*), la existencia del CRC (CI=1 existe CRC y CI=0 no existe CRC), la *Encryption Key Sequence* (EKS), el tamaño del MAC PDU incluyendo el *header* (LEN), el identificador de conexión (CID) y la Secuencia Verificadora del Encabezado (*Header Check Sequence*, HCS).

- **Encabezado de Solicitud de Ancho de Banda:** Este tipo de encabezado, es exclusivo para las peticiones de oportunidades de transmisión en el canal de subida. Su formato es el que se presenta en la figura 3.3.

En el encabezado BHR el campo EC será cero, indicando que no existe encriptación, el campo *Type* puede ser 000000 para incrementar el ancho de banda en BR bytes ó 000001 que reemplaza el ancho de banda asignado anteriormente, el *Bandwidth Request* (BR) indicará la cantidad de bytes requeridos, el CID indicará el tipo de flujo de servicio para el cual se está haciendo el requerimiento de ancho de banda y también se incluye el HCS.

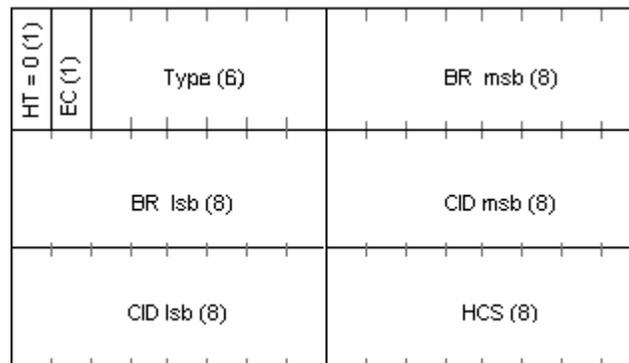


Figura 3.3. Formato de un Encabezado de Solicitud de Ancho de Banda.

Se destaca que como el BRH es un requerimiento de ancho de banda, no contiene *Payload*, por consiguiente es de tamaño fijo (6 bytes).

Los mensajes de administración (*MAC Management Message*) son insertados en el *Payload* del PDU y comienzan con un campo *Type* que especifica el tipo de mensaje como se señala en la figura 3.4. Seguido al campo *Type* va el *Management Message Payload*.

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

- **Downlink Map (DL-MAP) Message:** Define el acceso a la información para el enlace de bajada. Especifica cuando se realizarán las transiciones de la capa física dentro del *downlink subframe*.
- **Uplink MAP (UL-MAP) Message:** 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 manutención inicial y las peticiones de ancho de banda.



Figura 3.4. Formato del MAC Management Message.

3.2.3.2. Fragmentación, Concatenación y Empaquetamiento

Para optimizar el uso del canal inalámbrico, se han incluido funciones que disminuyen dinámicamente el *overhead* agregado en las transmisiones. Dichas funciones se basan en la manipulación de la carga útil para conformar paquetes de longitud controlada. A continuación se citan estas funciones:

- **Concatenación:** Es posible agrupar en una transmisión múltiples PDU mediante la identificación de la conexión para cada uno de ellos.
- **Fragmentación:** Un paquete más grande que un PDU puede ser dividido en varios PDUs y de esta forma se evita la disminución del *throughput* al perderse paquetes de gran tamaño.
- **Empaquetamiento:** En el caso de paquetes de tamaño menor a un PDU, éstos pueden ser agrupados en un mismo PDU y de esta forma se aumenta la eficiencia evitando al mayor *overhead* que se produciría al enviar paquetes muy pequeños.

3.2.4. Paquetes de Control MAC

Como ya se mencionó en párrafos anteriores, los mensajes MAC de Control poseen un campo que especifica el tipo de mensaje de control (*Management Message Type*).

A diferencia de los Mensajes de Control MAC que se transmiten mediante conexiones Primarias, aquellas que correspondan a las conexiones Básicas, *Broadcast* o Inicial *Ranging* no pueden ser fragmentadas ni empaquetadas. La tabla 3.2 presenta la especificación de los Mensajes 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	Reservados		
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
19-20	Reservado		
21	MCA-REQ	Solicitud de Asignación Multicast (Multicast Assignment Request)	Básica
22	MCA-RSP	Respuesta de Asignación Multicast (Multicast Assignment Response)	Básica
23	DBPC-REQ	Solicitud de Cambio de Configuración de Transmisión Descendente (Downlink Burst Profile Change Request)	Básica
24	DBPC-RSP	Respuesta de Cambio de Configuración de Transmisión Descendente (Downlink Burst Profile Change Response)	Básica
25	RES-CMD	Comando de reseteo (Reset Command)	Básica
26	SBC-REQ	Solicitud de Capacidad Básica en Estación Suscriptora (SS Basic Capability Response)	Básica
27	SBC-RSP	Respuesta de Capacidad Básica en Estación Suscriptora (SS Basic Capability Response)	Básica
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		

Tabla 3.2. Mensaje de Control MAC.

3.2.4.1. Mensaje Descriptor de 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 Mbaud¹.
- 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.

3.2.4.2. 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 (*Information Elements, IE*) que están incluidos en el mensaje.

¹ Otra forma de expresar la velocidad de transmisión es en pulsos/s o Bauds. Cabe destacar que estos pulsos no son necesariamente binarios; por lo que una forma de conocer, en bits/s, la tasa de transmisión expresada en Bauds es como sigue: $V.T [bits / s] = N \cdot Baud$, donde N es el número de bits en cada pulso y Baud es la tasa expresada en esta cantidad.

3.2.4.3. 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 SSs 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.
- **Fin de *Backoff* en Solicitud (*Request Backoff End*):** Tamaño de la ventana límite 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.

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

Tabla 3.3. Codificaciones TLV Parámetros descriptores para el canal Descendente.

En la tabla 3.3 se incluyen los parámetros específicos que describen el canal de acuerdo con una codificación TLV (Tipo/Longitud/Valor).

En el caso de los sistemas que emplean la banda de 10 a 66 GHz, los códigos TLV de los mensajes UCD son los que se presentan en la tabla 3.4.

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 interleaving BTC	14	1	1 = Sin interleaving 2 = Interleaving de bloque 3 – 255 = Reservado
Scramblerseed	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

Tabla 3.4. Codificaciones TLV Parámetros descriptores para el canal Descendente (Banda 10-66 GHz).

3.2.4.4. 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 3.5 muestra los posibles IEs que pueden incluirse en un Mapa.

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	Broadcast	Offset inicial de la región de mantenimiento (empleado en el Ranging inicial)
Mantenimiento de Estación	3	Unicast	Offset inicial de la región de mantenimiento (empleado en el Ranging periódico)
Reservación de Flujo de Datos Tipo 1	4	Unicast	Offset inicial de la reservación de flujo de datos Tipo 1
Reservación de Flujo de Datos Tipo 2	5	Unicast	Offset inicial de la reservación de flujo de datos Tipo 2
Reservación de Flujo de Datos Tipo 3	6	Unicast	Offset inicial de la reservación de flujo de datos Tipo 3
Reservación de Flujo de Datos Tipo 4	7	Unicast	Offset inicial de la reservación de flujo de datos Tipo 4
Reservación de Flujo de Datos Tipo 5	8	Unicast	Offset inicial de la reservación de flujo de datos Tipo 5
Reservación de Flujo de Datos Tipo 6	9	Unicast	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

Tabla 3.5. Elementos de Información (Information Elements, IE) de los mensajes de control Mapa.

3.2.4.5. 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.

3.2.4.6. Mensaje de Solicitud de Registro (REG-REQ) y Respuesta de Registro (REG-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 CIDs 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.

3.2.5. Servicio de Calidad en la Transmisión Ascendente

Con la finalidad de hacer más eficientes los procesos de solicitud y asignación de ancho de banda, se han definido en el protocolo IEEE 802.16 cuatro servicios para la programación de transmisiones en el canal de subida. Cada uno de ellos corresponde a un tipo particular de tráfico generado por las SS. Gracias a esta distinción, la BS puede realizar estimaciones sobre el desempeño y la latencia del sistema en general.

Existen tres funciones que intervienen en la caracterización de QoS: solicitudes anidadas (*PiggyBack*), robo de Ancho de Banda (*Bandwidth Stealing*) y consulta (*Polling*).

1. **Solicitudes anidadas (*PiggyBack request*):** Se trata de solicitudes de asignación de ancho de banda incluidas en los encabezados de los paquetes enviados por las SS durante una transmisión garantizada. Es decir, cuando la SS ha hecho una solicitud previa en el periodo de contención y la BS le ha proporcionado una cantidad específica de *minislots* de transmisión, es posible que la SS aún tenga paquetes por enviar que no habían sido considerados cuando se realizó la asignación. Para evitar hacer una solicitud por contención nuevamente, la SS incluye en los encabezados de los paquetes que está enviando una solicitud

adicional. Esta nueva solicitud tiene carácter preferencial, ya que su recepción en la BS está garantizada, aunque es posible que no se realice la asignación en su totalidad.

2. **Robo de Ancho de Banda (*Bandwidth stealing*):** Se refiere al empleo de una porción del ancho de banda asignado a una SS para solicitudes adicionales. Este proceso tiene lugar cuando una SS se encuentra operando bajo un esquema de Asignación Garantizada por SS, esto es, que cuenta con oportunidades garantizadas para la transmisión de paquetes. En este caso, es posible que parte de estas oportunidades, destinadas para el envío de datos, se use para realizar solicitudes adicionales de ancho de banda. El término *stealing* se refiere a que parte de los *minislots* destinados para enviar información de usuario se usa para hacer solicitudes de ancho de banda.
3. **Consulta (*Polling*):** Es el proceso mediante el cual la BS destina a una SS o a una conexión oportunidades específicas para el envío de solicitudes de ancho de banda. En este caso, la BS asigna regularmente algunos *minislots* que la SS puede usar para hacer solicitudes de ancho de banda. Dichas oportunidades son independientes de aquellas que se asignan normalmente para las transmisiones de la SS. Adicionalmente, la SS puede indicar que requiere de este servicio.

Las funciones anteriormente mencionadas permiten la clasificación de los servicios de programación para las transmisiones ascendentes, como se describe en la tabla 3.6.

Tipo de programación	Solicitud PiggyBack	Robo de ancho de banda	Polling
UGS – Servicio Garantizado no Solicitado (Unsolicited Grant Service)	Inválida	Inválida	Sólo aplica cuando se solicita mediante el bit PM para transmisiones que no sean del tipo USG
rtPS – Servicio de Consulta en Tiempo Real (Real-Time Polling Service)	Permitida	Permitida para Asignaciones Garantizadas por Estación Suscriptora (GPSS, Grant per SS)	Sólo se permite la consulta unicast
nrtPS – Servicio de Consulta no en Tiempo Real (Non-Real-Time Polling Service)	Permitida	Permitida para GPSS	Puede restringirse hacer consultas unicast mediante políticas de transmisión – solicitud. Otros tipos de consulta están permitidos
BE – Mejor Esfuerzo (Best Effort)	Permitida	Permitida para GPSS	Todas las formas están permitidas

Tabla 3.6. Tipos de Servicio para transmisiones en el UL.

Existen cuatro tipos de servicios de calidad (QoS) para el enlace de subida soportados:

- **Unsolicited Grant Service (UGS):** Soporta servicios de tiempo real que generen paquetes de longitud fija en forma periódica, por ejemplo: VoIP sin supresión de silencios. La asignación de oportunidades de transmisión periódica y fija en tiempo real permite reducir tanto la latencia como el *overhead*, sin dejar de cumplir con las

demandas de la comunicación en tiempo real. La Política de Solicitud y Transmisión impide a la SS utilizar las oportunidades de contención para la asignación de ancho de banda. Adicionalmente, la BS no podrá proporcionar a la conexión que usa este servicio la oportunidad *unicast* para realizar solicitudes. Por este motivo, la SS sólo podrá transmitir tráfico constante en oportunidades no solicitadas para esa conexión en particular.

- **Real-Time Polling Service (rtPS):** Soporta servicios de tiempo real que generan paquetes de longitud variable, en forma periódica, por ejemplo: Video MPEG. Mediante este servicio se ofrecen oportunidades periódicas *unicast* que permiten a la SS especificar la longitud deseada para cada una de las asignaciones. Aunque esta indicación puede incrementar el *overhead*, puede mejorarse la eficiencia en la utilización del canal inalámbrico. La periodicidad de las asignaciones de oportunidades de transmisión debe cubrir los requerimientos del tráfico generado por la SS. Cabe mencionar que, también es posible que la SS emplee el Servicio Garantizado sin Solicitud, sin embargo, no está permitido que emplee la región de contención para el envío de solicitudes de asignación de ancho de banda para esa conexión en particular.
- **Non-Real Time Polling Service (nrtPS):** Soporta servicios que no son de tiempo real y que generan paquetes de longitud variable a intervalos regulares de tiempo, tales como FTP. La BS deberá proporcionar periódicamente, durante intervalos menores a un segundo, oportunidades de transmisión para la SS, aún en el caso de congestión en la red. De acuerdo con la Política de Solicitud/Transmisión, en este servicio la SS puede emplear los intervalos de contención para hacer solicitudes adicionales de ancho de banda, así como oportunidades *unicast* y del tipo UGS.
- **Best Effort Service (BE):** No reserva ancho de banda, es decir, no asegura tasas de transmisión. Asigna según tasa disponibles y no da prioridad. Este tipo de servicio es característico del tráfico intermitente IP. En donde, la SS puede emplear cualquier tipo de oportunidad para realizar solicitudes de asignación de ancho de banda, como son las regiones de contención, las oportunidades *unicast* y el servicio UGS.

Todos los tipos de servicio requerirán de aumentos o disminuciones de forma dinámica del ancho de banda asignado, exceptuando el UGS el cual tiene una tasa fija de transmisión asignada. Por esto, la BS debe permitir a las SSs que informen sus requerimientos de ancho de banda. Estas peticiones se pueden realizar por medio del BHR como se explicó anteriormente (campos BR y *Type*), o bien por medio de un *PiggyBack Request* que va a nexa a un PDU con datos.

3.2.6. Mecanismos de Solicitud y Asignación de Ancho de Banda

Con la finalidad de tener acceso al canal inalámbrico, cada una de las SS participa en un mecanismo de solicitud de ancho de banda a través del cual se indica a la BS la necesidad de incrementar o disminuir los requerimientos de ancho de banda, de acuerdo con el tipo de tráfico generado.

Los mecanismos mediante los cuales las SS solicitan a la BS la asignación de ancho de banda de acuerdo con los requerimientos específicos de cada conexión se conoce como Acceso Múltiple por Asignación de Demanda (*Demand Assigned Multiple Access, DAMA*). Cada una de las SSs envía mensajes para solicitar la reservación de *minislots* en el canal ascendente. Las oportunidades de transmisión requeridas dependen del tipo de tráfico generado así como los parámetros de QoS especificados durante el establecimiento inicial de la conexión.

Existen diversos métodos empleados por las SSs para realizar sus peticiones: Solicitudes, Reservaciones por Conexión, Reservaciones por Estación Suscriptora y Consulta.

A continuación se describe cada una de las peticiones realizadas:

3.2.6.1. Solicitudes

Las solicitudes consisten en mensajes enviados por las SSs hacia la BS para solicitar la reservación de ancho de banda en el canal ascendente para la transmisión de datos. Debido a las características dinámicas del canal inalámbrico, las solicitudes se expresan en términos de *bytes* sin tomar en cuenta el *overhead* de la capa física. Estas solicitudes pueden transmitirse durante el periodo de contención de Solicitud de Ancho de Banda, o bien aprovechando algún periodo asignado por la BS para la conexión.

Las solicitudes realizadas durante una región reservada se realizan mediante los subencabezados de solicitudes *PiggyBack*.

Como ya se ha mencionado, las solicitudes *PiggyBack* permiten optimizar el uso del canal inalámbrico, ya que reducen la posibilidad de ocurrencia de colisiones durante el envío múltiple de solicitudes de asignación de ancho de banda por varias estaciones.

Cabe señalar que las Solicitudes pueden ser incrementales o totales, lo cual se indica en el campo *Type* del encabezado del Mensaje de Solicitud de Ancho de Banda. Puesto que los subencabezados para las peticiones *PiggyBack* no cuentan con el campo *Type*, se ha definido que siempre serán del tipo Incrementales. La BS cuenta con un registro de las peticiones realizadas por cada SS. En el caso de las Solicitudes Incrementales, dicho registro del ancho de banda solicitado sólo se modifica de acuerdo con los mensajes enviados, esto es, cada SS indica que a la cantidad de *bytes* requeridos con anterioridad es necesario agregar otra cantidad como lo indique la solicitud incremental.

Por otro lado, en las Solicitudes Totales, la BS renueva su registro del ancho de banda solicitado por la SS, de acuerdo con la última petición enviada, sin importar que del ancho de banda requerido anteriormente sólo se haya reservado una porción.

Debido a las características dinámicas del canal, la BS puede requerir que se generen solicitudes totales bajo un esquema periódico, lo cual dependerá de los parámetros de QoS para un servicio en particular, así como de las características del canal. Es importante señalar que las Solicitudes realizadas durante las regiones de Contención siempre deberán ser Totales.

3.2.6.2. Modo de Asignación por Conexión (GPC)

En las Asignaciones por Conexión (GPC, *Grant per Connection*) el ancho de banda es asignado explícitamente para una conexión y las SSs usan la asignación de ancho de banda sólo para esa conexión.

3.2.6.3. Modo de Asignación por Estación Subscriptora (GPSS)

Con el modo de asignación por estación subscriptora, a las SSs se les otorga ancho de banda adicional dentro del mismo *grant*.

En este modo de asignación, las SS deberán ser más inteligentes en su manejo de calidad de servicio. Típicamente usará el ancho de banda para la conexión que la solicitó, pero no necesariamente. Además si la calidad de servicio de la SS ha cambiado desde la última petición, la SS tiene la opción de mandar los datos con mayor calidad de servicio.

3.2.6.4. Consultas

Mediante las consultas, la BS establece periodos para la transmisión en el UL destinados específicamente para que las SS envíen solicitudes de asignación de ancho de banda. Ya que la BS no envía mensajes explícitos para indicar tales oportunidades, dichos periodos se definen mediante los correspondientes IE dentro de los UL-MAPs.

Las asignaciones de estas oportunidades pueden realizarse para una sola SS (*Unicast*) o para un grupo de SSs o de conexiones (*Multicast*). En este último caso, las estaciones o conexiones involucradas tendrán que contender para conseguir el envío de sus solicitudes. En base al tipo de consulta, la asignación podrá ser del tipo GPC o GPSS.

A continuación se mencionan las características para consultas de tipo *Unicast* y de tipo *Multicast*.

- **Consulta *Unicast*:** Cuando se establece una consulta *Unicast* para una SS en particular, la BS incluye en el UL-MAP una oportunidad exclusiva para la SS que podrá ser empleada sólo para solicitar ancho de banda. No es necesario que la SS siempre utilice esta oportunidad. La figura 3.5 muestra la operación de consulta *unicast*.
- **Consulta *Multicast* y *Broadcast*:** Cuando la BS no dispone de ancho de banda suficiente para atender a cada una de las SS asociadas a ella, puede emplear consultas a un grupo de SSs. Tales grupos se identifican mediante CIDs exclusivos y las oportunidades que reciben se especifican a través del UL-MAP.

Las SSs involucradas sólo envían solicitudes si lo necesitan, participando en contenciones con las otras SSs de su grupo. Debido a que se encuentran sujetas a la ocurrencia de colisiones, emplean el algoritmo exponencial *Backoff* tanto para determinar el *minislot* en el que enviarán su solicitud como para reprogramarla en el caso de haberse presentado una colisión. Las solicitudes se considerarán

exitosas sólo si en algún futuro UL-MAP se incluye una reservación para la CID en cuestión. La figura 3.6 muestra la forma en que operan las consultas *multicast* y *broadcast*.

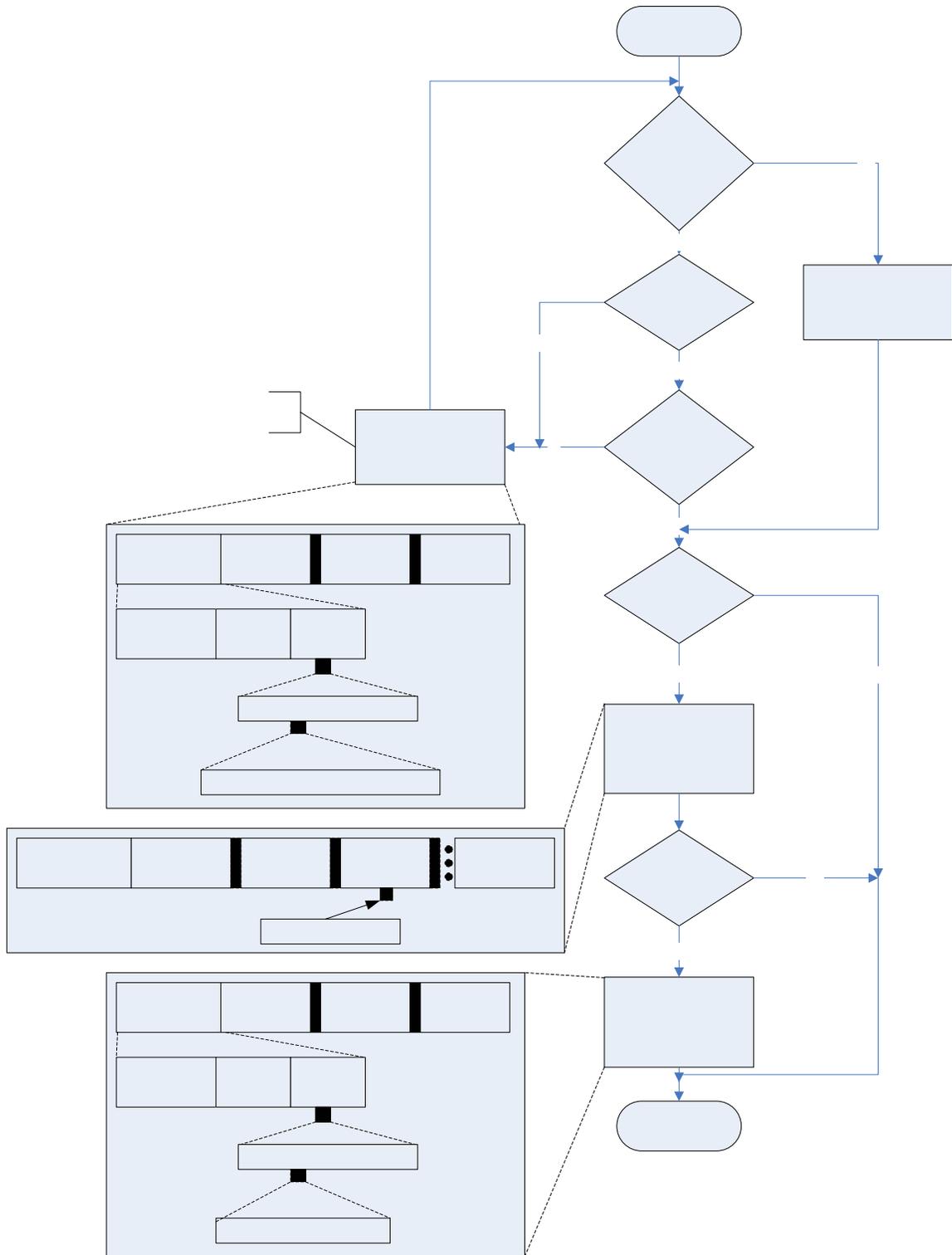


Figura 3.5. Consulta Unicast.

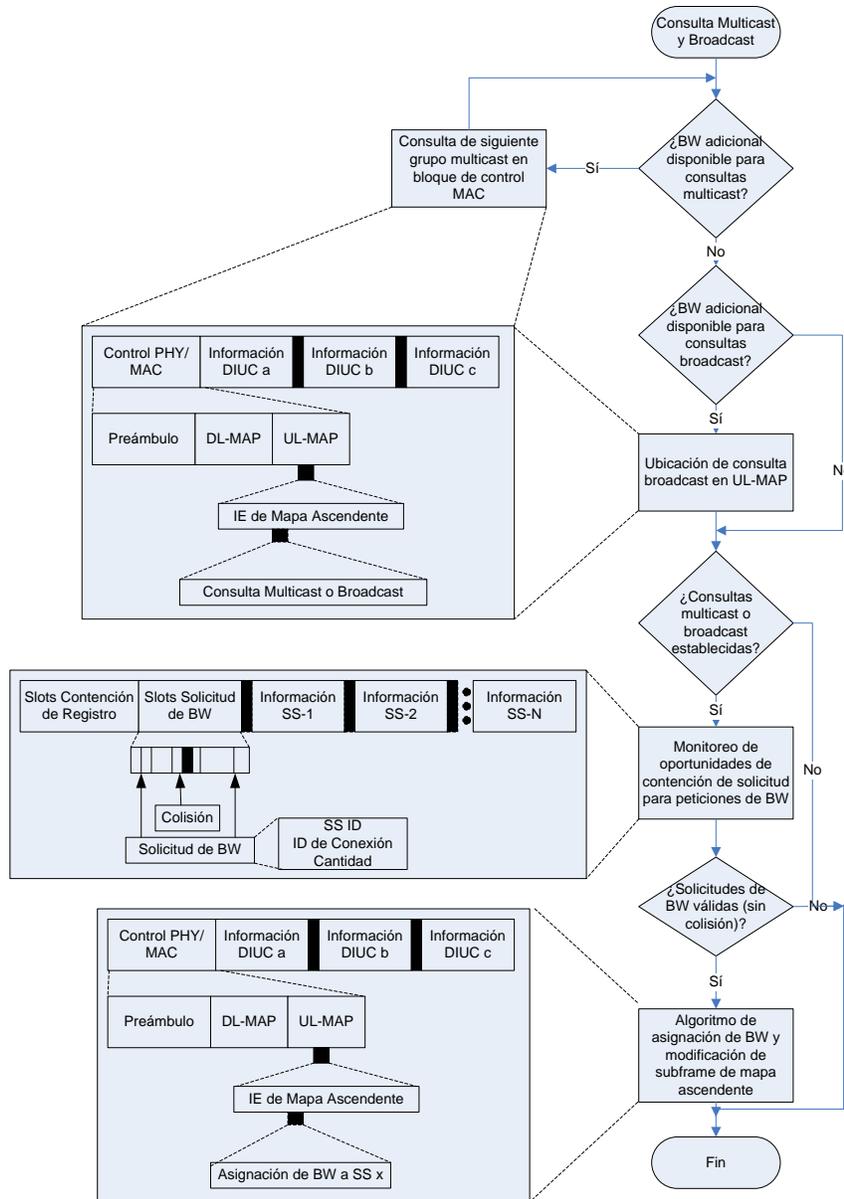


Figura 3.6. Consulta Multicast y Broadcast.

3.2.7. Características de la Capa Física

3.2.7.1. FDD (*Frequency Division Duplex*)

En este modo de funcionamiento, el enlace de bajada está separado en frecuencia del enlace de subida, por lo que la BS puede transmitir en ráfagas mientras que el UL utiliza TDMA. Este modo permite funcionamiento *Full-Duplex* por parte de una SS. Si una SS funcionara en *Half Duplex* la BS no debe asignar ancho de banda en el enlace de subida en el mismo instante en que espera datos en el enlace de bajada.

3.2.7.2. TDD (*Time Division Duplex*)

Cuando el funcionamiento es TDD, el enlace de subida y enlace de bajada transmiten en distintos instantes de tiempo, existiendo una trama de duración fija, la cual es dividida en un UL *sub-frame* y un DL *sub-frame*, los que a su vez están divididos en ranuras temporales (*Physics Slots*, PS) como se muestra en la figura 3.7.

El ancho de banda del enlace de subida y del enlace de bajada puede variar, desplazando la división entre los *sub-frames* en forma adaptiva, lo cual puede ser de mucha utilidad para aprovechar el hecho de que el tráfico de Internet es asimétrico, ya que este modo de funcionamiento permite efectuar la división entre el ancho de banda de subida y de bajada en forma simple.

Existen *minislots* que son asignados por la BS para tareas de manutención o para que las SSs envíen peticiones. En estos *minislots* pueden ocurrir colisiones las que se solucionan utilizando el algoritmo exponencial de *Backoff* por parte de las SSs.

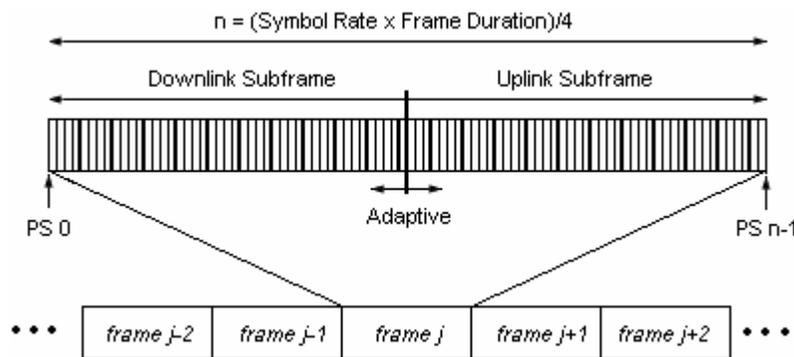


Figura 3.7. Estructura del Frame para TDD.

El *Downlink Burst Profile* (DBP) que describe las propiedades de la transmisión, es determinado dinámicamente por la BS de acuerdo a la calidad de la señal que recibe de una determinada SS. Se destaca que existe la posibilidad de que distintas SSs posean diferentes DBP (debido a que la calidad de los enlaces es distinta) con lo cual se logra una mejora en la eficiencia del ancho de banda.

3.2.7.3. UL *sub-frame*

La estructura del UL *sub-frame* usado por una SS para transmitir a la BS se muestra en la figura 3.8. Existen tres clases de *burst* que puede transmitir una SS:

- Los que son transmitidos en intervalos de contienda reservados para manutención inicial.
- Los que son transmitidos en intervalos de contienda definidos para intervalos de requerimientos reservados para responder a consultas *multicast* y *broadcast*.
- Los que son transmitidos en intervalos definidos específicamente para una SS individual.

Cualquiera de estos tipos de *burst* pueden estar presentes en un *frame* dado en un orden y cantidad (limitada por el número de PS disponibles en el *frame*) determinada por la BS en el UL-MAP que fue enviado en el DL *sub-frame*. Luego de los dos intervalos de contienda, los *slots* serán agrupados para la transmisión de una SS con su correspondiente *burst profile* especificado por la BS. Se muestran en la figura 3.8 el *SS Transition Gap* que separa la transmisión de varias SSs durante en UL *sub-frame*.

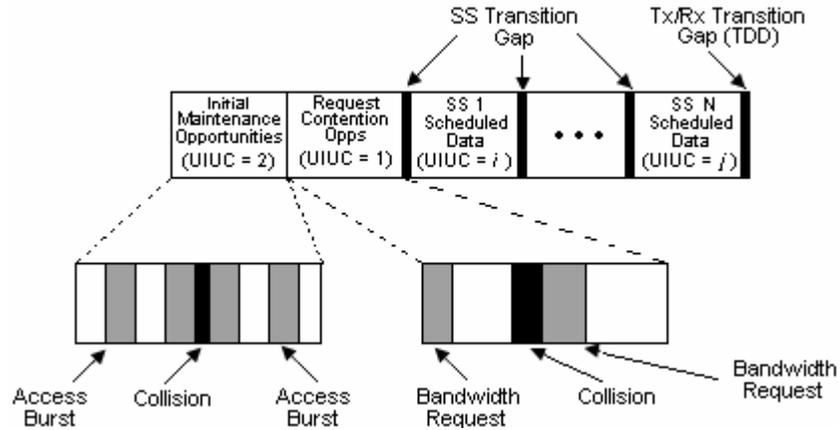


Figura 3.8. Estructura del frame para enlace de subida TDD.

3.2.7.4. DL *sub-frame*

El DL *sub-frame* comienza con un frame de preámbulo para la sincronización y ecualización. Esto es seguido por el DL-MAP y el UL-MAP declarando los PS en los cuales los *burst* comienzan. Seguido se tiene una porción TDM en donde la BS envía los datos organizados en *burst*, con diferentes *burst profiles* y por ende distintos niveles de robustez a las diferentes estaciones. Estos *burst* son transmitidos de mayor a menor robustez.

En la figura 3.9. se muestra la situación anterior en donde al final del *sub-frame* se agrega el *Tx/Rx Transition Gap* (TTG) que separa el *frame* de bajada del *frame* de subida.

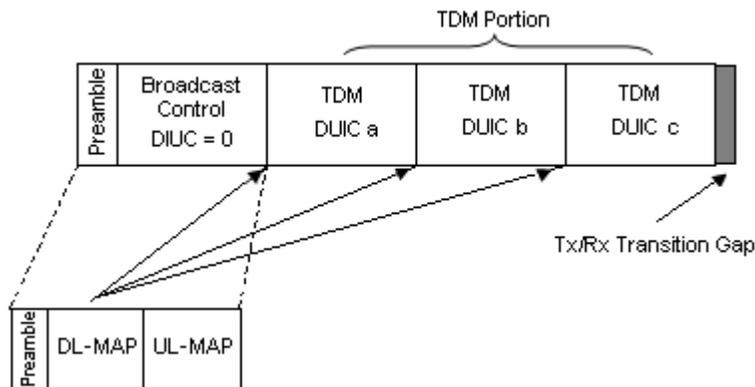


Figura 3.9. Estructura del frame para enlace de bajada TDD.

3.2.8. Resolución de Colisiones

Las colisiones son eventos que ocurren cuando dos o más SSs intentan transmitir información en el mismo *minislot*. En este caso, se desperdicia parte del ancho de banda disponible en el canal ascendente, ya que todas las transmisiones que se hayan realizado durante una colisión se verán afectadas, mientras que la información que pretendía transmitirse se perderá.

La BS especifica a través del UL-MAP las regiones que están sujetas a la ocurrencia de colisiones. Las colisiones pueden ocurrir durante los intervalos de Mantenimiento Inicial y de Solicitud, cada uno definido mediante su respectivo IE. Cuando ocurre una colisión en cualquiera de los periodos mencionados, las SSs involucradas son las responsables de aplicar los métodos de resolución.

El método para la resolución de colisiones que puede ser soportado se basa en el algoritmo exponencial de *Backoff* binario truncado cuya operación se basa en los parámetros de ventana de *Backoff* inicial y ventana de *Backoff* final, ambos controlados por la BS en los mensajes Descriptores del Canal Ascendente (UCD) mediante potencias binarias. Por ejemplo, un valor de 4 indica una ventana entre 0 y 15, un valor de 10 indica una ventana entre 0 y 1023.

El mecanismo de resolución de colisiones mediante el Algoritmo Exponencial *Backoff* Binario Truncado se describe a continuación:

1. Al ocurrir una colisión, las SSs involucradas generan un número aleatorio entre cero y el exponente binario indicado por la ventana de *Backoff* inicial.
2. La SS esperará la cantidad de *minislots* indicados por el número generado en el paso anterior. Probablemente, la SS aguardará durante varios periodos incluidos en distintos mapas. Por ejemplo, si una SS tiene que esperar un total de 9 *minislots* y el mapa actual cuenta con 5, para el periodo descrito por el mapa siguiente esperará sólo 4. En caso de que este otro no cuente con la cantidad suficiente de *minislots*, la SS esperará hasta el siguiente periodo, y así sucesivamente hasta agotar toda la cantidad de *minislots* de espera que ha determinado.
3. Cuando han transcurrido todos los *minislots* de espera, cuya cantidad fue generada por la SS, se intentará hacer una nueva transmisión, también sujeta a la ocurrencia de colisiones.
4. La SS considerará que la transmisión fue exitosa cuando:
 - En el caso de las contenciones para la solicitud de asignación de ancho de banda, reciba un Mapa que incluya la reservación correspondiente al CID para el cual se hizo la solicitud, dentro de un periodo máximo definido mediante el mensaje Descriptor de Canal Ascendente.
 - Reciba el mensaje RNG-RSP que corresponde a la respuesta de la BS cuando la SS ha enviado un mensaje RNG-REQ durante el periodo de Mantenimiento Inicial.

- Si se cumple cualquiera de las dos condiciones anteriores que aplique, la SS finalizará la ejecución del algoritmo exponencial *Backoff* e iniciará la transmisión de la información correspondiente.
- En caso de que se haya terminado el tiempo de espera, la SS incrementará en uno el valor de la ventana *Backoff* y generará un nuevo número aleatorio de *minislots* de espera. Lo anterior implica que valor generado deberá estar en un rango cuya cota final será el doble que el rango usado anteriormente. En caso de que la ventana inicial *Backoff* haya sido de 4, y haya fracasado el primer reintento de transmisión, la ventana incrementará al valor 5, lo que implica que la SS generará un número aleatorio entre 0 y 32.
- La SS repetirá el proceso anterior tantas veces como sea necesario hasta llegar al valor de la ventana *Backoff* final. En caso de que en este nuevo intento no se haya recibido respuesta por parte de la BS, cuando ha ocurrido una colisión, la SS descartará la información pendiente por transmitir. Si se ha intentado transmitir un mensaje RNG-REQ durante el intervalo de mantenimiento inicial, la SS reiniciará el proceso.

3.3. Conclusiones

En este capítulo se ha presentado el modo de operación del protocolo de comunicaciones de acceso inalámbrico de banda ancha IEEE 802.16. Se han descrito los mensajes de administración más importantes empleados durante la inicialización del servicio y durante su operación normal. Adicionalmente, se presentaron tanto los cuatro mecanismos de solicitud de asignación de ancho de banda que varían de acuerdo con el tipo de tráfico generado por la SS, como los servicios de programación ascendente, funciones realizadas por la BS. También se describe la estructura del *frame* para el UL-MAP y el DL-MAP.

Asimismo se representó el algoritmo Exponencial Backoff, que permite resolver las colisiones ocurridas durante los periodos de contención, tanto para la transmisión de solicitudes de asignación de ancho de banda como la transmisión de datos de información.

Capítulo 4

Modelo Analítico para el Estándar BWA IEEE 802.16

4.1. Introducción

El objetivo principal de este estudio es evaluar el *throughput* y el retardo de un sistema basado en el protocolo del IEEE 802.16, como una función de varios parámetros tales como: número de usuarios, longitud del mensaje y número de *slots* de contención.

Para comprender el modelo matemático que se desarrollará en la siguiente sección es conveniente considerar algunos conceptos y principios de la transferencia de datos de una red inalámbrica WiMAX.

El estándar IEEE 802.16, también llamado WiMAX (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*) supone una topología punto-multipunto a través de un canal compartido, con una estación base controladora que conecta estaciones suscriptoras a diversas redes públicas ligadas a la BS. El mecanismo de acceso al canal ascendente se basa en la técnica de acceso al medio TDMA y cada canal ascendente está dividido en *frames* los cuales están constituidos por un tamaño fijo de *slots*, cada uno de ellos de 16 bytes. El tamaño del *frame* puede ser de 0.5, 1 o 2 ms.

El protocolo IEEE 802.16 contempla este mecanismo de acceso al canal ascendente por medio del funcionamiento de la capa de Acceso al Medio (MAC). El esquema presentado consiste en el envío periódico de mensajes de control desde la BS que determinan el tipo de transmisión que podrá realizarse durante un intervalo de tiempo futuro.

Cabe destacar que el estándar IEEE 802.16 soporta diferentes flujos de datos, por lo que es posible garantizar una calidad de servicio. Entre estos se mencionan los siguientes: UGS, rt-PS, nrt-PS y BE los cuales se describieron en el capítulo anterior.

Por otra parte, las SSs cuentan con periodos específicos durante los cuales intentan hacer solicitudes de asignación de ancho de banda, a estos periodos se les conoce como contención. En el caso de no haber ocurrido colisión (cuando dos o más SS intentan transmitir en el mismo *slot*) u otro tipo de error, la BS responde con oportunidades de transmisión a alguna conexión en específico.

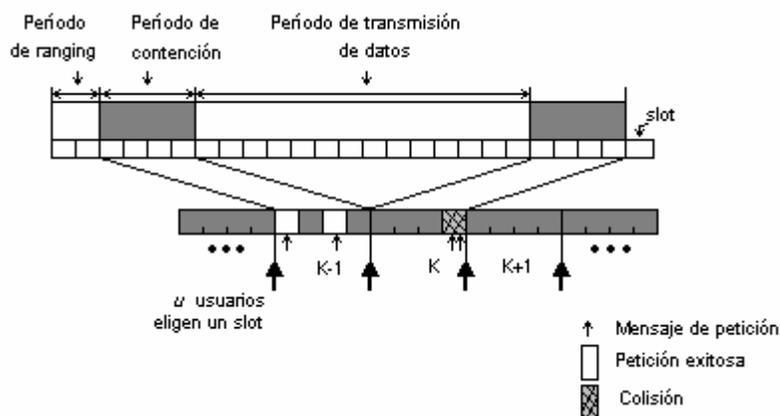


Figura 4.1. Canal DL.

En lo que concierne al canal descendente, éste está dividido en los siguientes periodos: contención, transmisión y *ranging* de acuerdo al mapa de asignación de ancho de banda que la BS transmite a las SS por el canal DL, tal y como se ilustra en la figura 4.1.

Cuando la SS entra en el periodo de transmisión de la BS, la BS y la SS llevan a cabo los procesos de *ranging* y de registro. El primero de éstos se refiere al mecanismo en el que se realizan ajustes de potencia, sincronía y frecuencia entre la BS y SS mientras que el segundo, como su nombre lo indica, se refiere al proceso en el que la SS registra los parámetros de conexión entre ella y la BS.

Muchas SS transmiten mensajes de petición de ancho de banda a la BS en un periodo limitado de contención por el canal ascendente por ende, las colisiones pueden ser generadas en el periodo de contención. Si un mensaje de petición de ancho de banda es transmitido exitosamente durante el *frame* actual, entonces los datos correspondientes a ese mensaje de petición de ancho de banda son transmitidos durante el periodo de transmisión asignado.

4.2. General Packet Radio Service (GPRS)

El análisis que se realizará para valorar el funcionamiento de una red WiMAX se fundamenta en una analogía de lo que ocurre en una red GPRS.

Por ello, con el fin de entender el modelo analítico adaptado para el comportamiento de una red basada en el protocolo IEEE 802.16, resulta conveniente describir brevemente el modo de operación del protocolo GPRS.

GPRS es un sistema TDMA/FDMA que es capaz de transferir paquetes punto a punto. Un cliente de esa red que desee transmitir datos desde una SS deberá contender con otros clientes para ganar el acceso al medio. En el caso de tener éxito, se le asignarán recursos consistentes con la cantidad de datos que va a transmitir. La transmisión de datos de la red a la estación móvil es libre de contención y es encolada en la BS.

Un sistema GPRS se compone de dos partes: la inalámbrica y la alámbrica. La primera de ellas se refiere al transporte de los datos entre la SS y el subsistema de estaciones base (BSS). Por otro lado, la parte alámbrica se ocupa del envío de datos entre el BSS y un ruteador en la frontera de la red de comunicaciones de datos estándar. Para el propósito de este estudio, únicamente se hará referencia a la parte inalámbrica del sistema.

Cuando un usuario móvil desea usar los servicios GPRS, en primer lugar se añade en la red por medio de un proceso de señalización el cual ocurre, ya sea, cuando la SS es encendida o cuando el usuario desea transferir paquetes de datos. De esta forma, el número de sistemas finales elegibles para la transmisión sobre un sistema inalámbrico es controlado por el sistema. El acceso al canal UL para propósitos de transmisión de datos es conseguido, reservando capacidad por medio de un proceso de contención.

El tiempo sobre el canal de transmisión inalámbrico es organizado como una secuencia de *multiframes*, cada *multiframe* contiene ya sea 26, 51 o 52 *frames*. Además, cada *frame* tiene 8 *time slots*, cada uno de los cuales puede transmitir una unidad de datos denominada *burst*, cuya capacidad es de 114 bits. Un paquete de reservación puede ser enviado en un *time slot*, pero la transmisión de una unidad básica de datos, o bien, un bloque RLC (*Radio Link Control*), requiere cuatro ráfagas o un *time slot* en cuatro *frames* consecutivos.

En la SS los paquetes llegan al sistema GPRS desde un protocolo de la capa de red, como IP. Tales paquetes de datos, que en el caso de IP incluyen 20 *bytes* de *overhead* son primero transformados en *frames* LLC (*Logical Link Control*) por el protocolo SNCDP (*Sub-network Dependent Convergence Protocol*).

La cantidad de datos de un usuario en un LLC *frame* está limitado a 1600 *bytes* y un encabezado (*header*) de 40 *bytes* es añadido a cada LLC *frame*. Posteriormente son segmentados en bloques RLC en la subcapa RLC/MAC. Cada bloque RLC, que contienen aproximadamente 20 *bytes* de un LLC *frame*, es codificado y transmitido sobre la interfaz de aire en cuatro *time slots*, así como se describió anteriormente.

El tiempo ocupado por un bloque RLC, es aproximadamente 18.5 ms o de manera equivalente, el tiempo de un *frame* es cerca de 4.625 ms. Cabe señalar que la capacidad de transmisión de un *time slot* depende de la tasa de codificación utilizada. Para una tasa de 1/1 la capacidad es 21.4 kb/s, mientras que para una tasa de 1/2, la capacidad de transmisión es 9.05 kb/s por *slot*. El ancho de banda sobre demanda puede conseguirse asignando *time slot* paralelos. Por ejemplo, si utilizamos 8 *time slots*, la tasa de transmisión alcanzada es aproximadamente 160 kb/s.

La secuencia de acciones involucradas en la transferencia de datos entre la SS y el BSS, se describen a continuación. La SS inicia la transferencia de paquetes por medio de una solicitud del canal (PCR, *Packet Channel Request*) en un *slot* de contención del canal de acceso aleatorio (PRACH, *Packet Random Access Channel*). Existen dos métodos de acceso de paquetes: el de una y el de dos fases.

En el acceso de una fase, la red responde al PCR con un mensaje de asignación inmediata (PIA, *Packet Immediate Assignment*) sobre el canal de acceso otorgado (PAGCH, *Packet Access Grant Channel*), reservando recursos sobre los canales de datos (PDCHs, *Packet Data Channels*) para la transferencia de un número de radio bloques. Los recursos reservados se especifican en el PCR.

Por otra parte, en el acceso de dos fases, el PCR responde mediante un PIA que reserva los recursos de UL transmitiendo una solicitud de recursos (PRR, *Packet Resource Request*). El mensaje PRR porta una descripción completa de los recursos solicitados para la transferencia de UL. La red entonces responde con una asignación de paquetes (PARA, *Packet Request Assignment*) reservando recursos para la transferencia de UL. Si la SS no recibe alguna respuesta a su mensaje PCR dentro de un intervalo específico de tiempo, este espera por un intervalo de tiempo aleatorio y lo intenta nuevamente.

En la dirección BSS-SS, la red inicia la transferencia de paquetes hacia la SS que está en estado de espera (*standby*) enviando una solicitud de *paging* (PPReq, *Packet*

Paging Request) sobre el canal de *paging*. La SS responde enviando una respuesta de *paging* (PPRes, *Packet Paging Response*). El mensaje PPRes contiene un identificador único conocido como el identificador temporal de la capa de enlace (TLLI, *Temporary Link Layer Identifier*) así como un *frame* LLC sobre el canal de tráfico de datos (PDTCH, *Packet Data Traffic Channel*). La asignación de recursos es seguida por los procedimientos de transferencia.

4.3. Análisis del Modelo Matemático para IEEE 802.16

En este apartado se discutirá la técnica para evaluar la máxima capacidad de transmisión (*throughput*) por el canal ascendente en el funcionamiento de un sistema WiMAX.

Como se citó con anterioridad, cuando más de dos mensajes de petición de ancho de banda son transmitidos simultáneamente en un *slot* durante el periodo de contención se produce una colisión en ese *slot*. Por esta razón los mensajes de petición de ancho de banda serán transmitidos en el periodo de contención correspondiente al siguiente *frame*. En dicho periodo, los usuarios eligen aleatoriamente un *slot* al principio de un *frame* para transmitir su petición de transmisión.

Para analizar el funcionamiento del protocolo de acceso al medio, MAC, se tomarán en cuenta los siguientes aspectos:

- El tamaño del frame dado en *slots* es M y el número total de usuarios es U.
- Un usuario sólo transmite un mensaje de petición de ancho de banda.
- Los usuarios transmiten datos de tamaño constante.

Como parte del análisis, se considera que el canal ascendente está dividido en *multiframe*s de 15 bloques, en donde cada bloque contiene 30 *slots*, así como se ilustra en la figura 4.2.

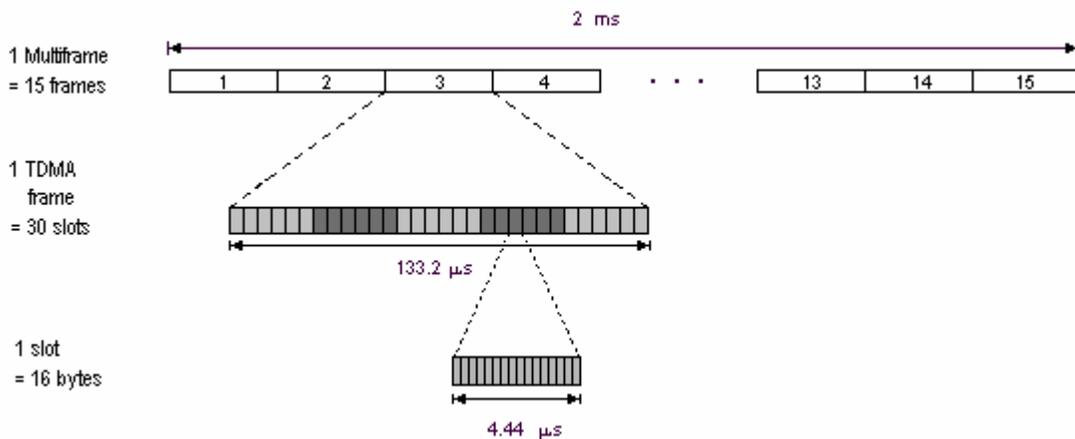


Figura 4.2. Multiframe Wimax.

Los *slots* de contención se localizan en el primer bloque de cada *multiframe*. Por tanto, existen $R \in \{1, \dots, 30\}$ *slots* de contención.

También se considerará un número fijo de usuarios, U , cada uno de ellos tiene una sesión continuamente en operación, y cada sesión es un ciclo que está dividido en las siguientes fases: *contención*, *espera* y *transmisión*. De acuerdo a lo anterior, se denotarán \tilde{c} , \tilde{w} y \tilde{m} como las longitudes de los tiempos del periodo de contención, espera y transmisión del mensaje respectivamente, dichas longitudes están expresadas en *slots*.

El ciclo que experimenta cada usuario se describe a continuación: cada usuario que desee transmitir un mensaje tiene que contender en el primer bloque de contención de cada *multiframe* hasta tener éxito, es decir, no debe existir colisión alguna entre él y otros usuarios. En el bloque inmediato después de haber contendido exitosamente y, si existe la capacidad disponible, el usuario comenzará a transmitir en *slots* sucesivos hasta completar su transmisión; en el caso de no haber capacidad para llevar a cabo la transmisión, el usuario deberá esperar hasta que haya disponibilidad de capacidad. Una vez que la transmisión se completa, el usuario nuevamente entra en el estado de contención y el ciclo se repite.

En esta aproximación, inicialmente supondremos que el tiempo promedio de espera, $E[w]$, de cada usuario es conocido y también que el tiempo de llegadas de los paquetes a la red sigue una distribución exponencial. Basados en estas suposiciones, será posible realizar algunas simplificaciones acerca del comportamiento del sistema.

Como ya se ha mencionado, el ciclo que experimenta cada usuario está conformado por tres etapas: contención, espera y transmisión. Por lo que la longitud del ciclo, \tilde{z} , se define como:

$$E \left[\tilde{z} \right] = E \left[\tilde{c} \right] + E \left[\tilde{w} \right] + E \left[\tilde{m} \right] \quad (4.1)$$

Donde el término \tilde{m} , se refiere al número de *slots* requeridos para transmitir un mensaje, el cual se obtiene procesando la variable \tilde{m} , misma que denota la longitud del mensaje en *bytes*.

El *throughput* del sistema está definido como la relación de la cantidad *slots* que son requeridos para mandar el mensaje de longitud \tilde{m} y los *slots* que son necesarios para transmitir tal mensaje, esto es, se incluyen los *slots* de contención y de espera.

De lo anterior, el *throughput* del sistema se define como:

$$\rho = U \frac{E \left[\tilde{m} \right]}{E \left[\tilde{z} \right]} \quad (4.2)$$

De la expresión anterior, el valor de $E\left[\tilde{m}\right]$ se calcula directamente ya que se conoce el tamaño del mensaje, tomando en cuenta la pila de protocolos así como también el *overhead* asociado.

Con el objeto de aproximar el valor de $E\left[\tilde{c}\right]$ se considerará que la probabilidad de que un usuario arbitrario contienda exitosamente, P_C , es conocida. Aunque la secuencia de contención no es una serie de intentos independientes de Bernoulli, asumiremos que sí es el caso. Bajo esta asunción, el número de contenciones requeridas para que un usuario logre el éxito tiene la distribución geométrica con parámetro, P_C .

Además, si un usuario contienda exitosamente en el primer *slot*, entonces el periodo de contención es exactamente el tamaño de un bloque, sin embargo, para cada contención adicional se requiere que pase un *multiframe* completo, para volver a contender. De lo anterior, se entiende que el periodo de contención se define como:

$$E\left[\tilde{c}\right] \approx 30 \left[1 + \left(\frac{1 - P_C}{P_C} \right) F \right] \quad (4.3)$$

En este caso, F denota el número de bloques por *multiframe*.

Dado el valor supuesto de $E\left[\tilde{w}\right]$ y el recién calculado para $E\left[\tilde{c}\right]$ es posible obtener el valor del ciclo completo, $E\left[\tilde{z}\right]$ y por tanto determinar el número promedio de periodos de contención por ciclo.

Sea N el número de ciclos, bz_i y z_i el número de *slots* de contención y número total de *slots* en el i -ésimo ciclo, respectivamente. Entonces, en N ciclos el número total de *slots* será $\sum_{i=1}^N z_i$ y el número total de *slots* de contención viene dado por $\sum_{i=1}^N bz_i$.

De esta forma, la relación del número total de *slots* de contención con el número total de *slots* es $\frac{\sum_{i=1}^N bz_i}{\sum_{i=1}^N z_i}$ y el promedio a largo plazo es $\frac{1}{F}$, entonces:

$$\frac{1}{F} = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{\sum_{i=1}^N bz_i}{\sum_{i=1}^N z_i} \quad (4.5)$$

$$\frac{1}{F} = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N bz_i}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N z_i} \quad (4.6)$$

O bien,

$$E[bz] = \frac{E[z]}{F} \quad (4.8)$$

Definiendo \tilde{u} como el número de contendientes en el primer bloque de contención, \tilde{s} como el número de contendientes exitosos por bloque y haciendo un razonamiento semejante al anterior, es fácil observar que la razón de usuarios que contiene exitosamente está dada por $E[\tilde{s}]$ y $E[\tilde{u}]$ pero también es la probabilidad de que un usuario seleccionado aleatoriamente contenga exitosamente en cada conexión, esto es:

$$P_C = \frac{E[\tilde{s}]}{E[\tilde{u}]} \quad (4.9)$$

De manera análoga se puede demostrar que:

$$E[\tilde{s}] = \frac{U}{E[bz]} \quad (4.10)$$

O bien de la ecuación (4.8):

$$E[\tilde{s}] = \frac{UF}{E[\tilde{z}]} \quad (4.11)$$

Definimos P_U como la proporción de usuarios conteniendo en cada bloque de contención. Por lo que el número esperado de usuarios conteniendo en un bloque de contención es $E[\tilde{u}] = P_U U$ y de las ecuaciones (4.9) y (4.10), se obtiene lo siguiente:

$$P_U = \frac{E[\tilde{s}]}{UP_C} = \frac{F}{E[\tilde{z}] P_C} \quad (4.12)$$

Ahora cada usuario que se encuentra actualmente en el modo de contención, contiene en cada bloque de contención hasta lograr el éxito en un periodo de

conexión dado. Por otro lado, el número de usuarios conteniendo es una variable aleatoria \tilde{u} , teniendo el conjunto de soporte $\{0, \dots, U\}$. Cada uno de los usuarios conteniendo escoge un *slot* de contención, aleatoria e independientemente de los otros usuarios del conjunto de los R *slots* de contención.

Definiendo \tilde{n} como el número de usuarios eligiendo un *slot* r , donde r es un *slot* arbitrario. Entonces, $\tilde{n} / \tilde{u} = u$ es una variable aleatoria binomial con parámetros u y $\frac{1}{R}$, por lo tanto:

$$P = \left\{ \tilde{n} = n / \tilde{u} = u \right\} = \binom{u}{n} \left(\frac{1}{R} \right)^n \left(1 - \frac{1}{R} \right)^{u-n} \quad (4.13)$$

En un *slot* de contención dado, generalmente un usuario puede ser exitoso y la probabilidad de que sea exitoso es especificada por el modelo de captura asumido, P_s .

En el modelo de captura se determina la probabilidad de recuperar una señal en la BS, aunque dicha señal provenga de una colisión múltiple. Esta probabilidad es calculada basándose en la tesis de que existe diferencia entre las potencias de las diversas señales provenientes de las SSs, considerando que la estas señales salen con la misma potencia de cada SS y que la distancia entre las SSs y la BS es diferente. Por tanto, la señal con mayor potencia tendrá cierta probabilidad de recuperarse aún aunque ésta haya colisionado.

Cabe destacar que, en una red operando bajo el estándar IEEE 802.16 esta probabilidad es nula debido a que la potencia con la que salen las señales de cada SS es diferente, de tal forma que todas lleguen con la misma potencia a la BS, haciendo imposible la discriminación. Por tanto, la probabilidad de recuperar cualquier señal que haya colisionado siempre será igual a cero.

La reducción de potencia en las SS es indispensable para reducir el nivel de interferencia hacia otras células.

Por otro lado, S describe el evento de que la contención en un *slot* sea exitosa. De la teoría de probabilidad, encontramos que la probabilidad de una contención exitosa en un *slot* arbitrario con u contendientes en el bloque se define por:

$$\begin{aligned} P \left\{ S / \tilde{u} = u \right\} &= \sum_{n=0}^u \left\{ S / \tilde{u} = u, \tilde{n} = n \right\} P \left\{ \tilde{n} = n, \tilde{u} = u \right\} \\ &= \sum_{u=0}^u P \left\{ S / \tilde{n} = n \right\} P \left\{ \tilde{n} = n / \tilde{u} = u \right\} \end{aligned} \quad (4.14)$$

Además,

$$P_s = P\{S\} = \sum_{u=0}^U P\left\{S/\tilde{u} = u\right\} P\left\{\tilde{u} = u\right\} \quad (4.15)$$

Siendo R slots de contención,

$$P_s = E[\text{número de éxitos en el slot } i] \quad (4.16)$$

Teniendo en cuenta que el número estimado de la suma determinista de variables aleatorias es siempre igual a la suma de valores esperados de las variables aleatorias individuales, entonces el número esperado de contenciones exitosas por bloque está dado por:

$$E\left[\tilde{s}\right] = RP_s \quad (4.17)$$

Donde la probabilidad requerida es calculada a partir de las ecuaciones (4.13) a (4.15). Por consiguiente, de la ecuación (4.9) se obtiene:

$$P_c = \frac{RP_s}{UP_u} \quad (4.18)$$

Como la distribución de \tilde{u} es desconocida, supondremos que \tilde{u} tiene una distribución binomial con parámetros U y P_u en la ecuación (4.15). Entonces, dada la distribución de \tilde{u} podemos calcular $E\left[\tilde{u}\right]$ y $E\left[\tilde{s}\right]$ de donde es posible emplear la ecuación (4.18) para determinar una nueva aproximación de P_c . Utilizando esa nueva aproximación de P_c , iteramos comenzando con la ecuación (4.3) hasta encontrar un valor consistente de P_c , que nos lleva a obtener $E\left[\tilde{c}\right]$.

Finalmente, resta determinar la forma en que se calculará $E\left[\tilde{w}\right]$. Una vez que se tiene la probabilidad de contención P_c para un valor dado de $E\left[\tilde{w}\right]$, se calcula el número de slots disponibles para cada usuario durante un ciclo.

Específicamente, conocemos la longitud promedio del ciclo además de la cantidad de slots que son usados para contención. En consecuencia, se sabe cuántos slots hay disponibles para transmitir en un ciclo, es decir:

$$E d = E[z] - E[bz] \quad (4.19)$$

Adicionalmente, sabemos que el número promedio de *slots* requeridos por usuario es $E[\tilde{m}]$ y existen U usuarios. De acuerdo a lo anterior, al menos debe haber disponible $UE[\tilde{m}]$ *slots* para la transmisión de datos.

Por lo que, si:

$$E[\tilde{m}] > \frac{E[z] - E[bz]}{U} \quad (4.20)$$

Entonces el valor inicial de $E[\tilde{w}]$ deberá incrementarse en una cantidad mayor a la diferencia entre $\frac{E[z] - E[bz]}{U}$ y $E[\tilde{m}]$.

Esto es:

$$E[\tilde{w}] = E_0[\tilde{w}] + \left[E[\tilde{m}] - \frac{E[z] - E[bz]}{U} \right] \quad (4.21)$$

Donde $E_0[\tilde{w}]$ es el valor inicial de $E[\tilde{w}]$.

Hasta este momento, tenemos un método para determinar un valor de P_C dado un valor inicial de $E[\tilde{w}]$. Para propósitos de indexación, se utilizará los subíndices i y j para realizar las iteraciones.

El procedimiento es ahora resumido:

1. Iniciación

- a) Valor inicial de i y j , $i = j = 0$.
- b) Asignar un valor inicial para $E_0[\tilde{w}]$.

2. Con $E_i[\tilde{w}]$ fijo realizar las siguientes iteraciones internas para j con un valor fijo de i :

- a) Utilizando P_{Cij} se calcula $E_{ij}[\tilde{c}]$ con (4.3).

$$E_{ij}[\tilde{c}] = 30 \left[1 + \left(\frac{1 - P_{Cij}}{P_{Cij}} \right) F \right]$$

Como la longitud de los paquetes es constante, el tamaño de $E \left[\tilde{m} \right]$ también será constante.

b) Usar $E_{ij} \left[\tilde{c} \right]$ y $E \left[\tilde{m} \right]$ en la ecuación (4.1) para obtener el ciclo $E_{ij} \left[\tilde{z} \right]$.

$$E_{ij} \left[\tilde{z} \right] = E_{ij} \left[\tilde{c} \right] + E_i \left[\tilde{w} \right] + E \left[\tilde{m} \right]$$

c) Con los valores de P_{Cij} y $E_{ij} \left[\tilde{z} \right]$ en (4.12) hallamos P_{Uij} .

$$P_{Uij} = \frac{F}{E_{ij} \left[\tilde{z} \right] P_{Cij}}$$

d) Empleando P_{Uij} en las ecuaciones (4.15) a (4.13) encontramos P_{Sij} .

e) Con P_{Uij} y P_{Sij} en la ecuación (4.18) se determina P_{Cij+1} .

$$P_{Cij+1} = \frac{RP_{Sij}}{UP_{Uij}}$$

f) Comparamos P_{Cij+1} y P_{Cij} para determinar si se requieren más iteraciones. Si $P_{Cij+1} > P_{Cij}$ significa que se requieren más iteraciones entonces, se incrementa j y se repite el proceso desde el paso 2.a.

3. Una vez calculado el valor de $E_{ij} \left[\tilde{z} \right]$, se calcula mediante (4.8) el número de slots de contención en el $E_i \left[bz \right]$ en el i -ésimo ciclo.

$$E_{ij} \left[bz \right] = \frac{E_{ij} \left[\tilde{z} \right]}{F}$$

4. Con (4.19) comparar que existan al menos $UE \left[\tilde{m} \right]$ slots para determinar si es necesario realizar más iteraciones.

$$E_{ij} \left[\tilde{z} \right] - E_{ij} \left[bz \right] \geq UE \left[\tilde{m} \right]$$

5. Si son necesarias más iteraciones, calcular $E_{i+1} \left[\tilde{w} \right]$ de acuerdo con (4.21) e ir al paso 2.

$$E_{i+1} \left[\tilde{w} \right] = E_0 \left[\tilde{w} \right] + \left[E \left[\tilde{m} \right] - \frac{E_{ij} \left[\tilde{z} \right] - E_{ij} \left[bz \right]}{U} \right]$$

4.4. Resultados

En esta sección analizaremos el funcionamiento de un sistema basado en el protocolo IEEE 802.16 usando la técnica descrita en el último apartado del presente capítulo.

Primeramente se examinará el *throughput* como una función del número de usuarios en el sistema. Después se examinará el *throughput* como una función del número de *slots* de contención.

Cabe destacar que el tráfico que se analizará corresponde a paquetes de tamaño constante los cuales serán generados por cada estación que compone la red. Para este tipo de tráfico se utiliza un método de compresión llamado *Constant Bit Rate* (CBR), mismo que se describe a continuación.

4.4.1. Tráfico CBR (Constant Bit Rate)

Este tipo de tráfico es utilizado generalmente en archivos de audio y video ya que garantiza al usuario una velocidad constante de transmisión, lo cual es ideal para este tipo de aplicaciones, así como para la emulación de circuitos que transporten información de aplicaciones que rigurosamente requieran del control del tiempo de transferencia de los datos y de los parámetros de desempeño.

La principal ventaja de CBR es la predicción del tamaño final del archivo en función de la duración del mismo, lo cual, permite comprimir al mismo dependiendo de las necesidades. Su principal inconveniente es la poca eficiencia que presenta, puesto que, los ficheros de audio o vídeo presentan fragmentos de baja complejidad (silencios, imágenes estáticas, etc.) para los que CBR otorga la misma capacidad de información que para los fragmentos complejos, con lo cual, se desaprovecha capacidad, obteniendo un archivo de mayor tamaño del necesario.

4.4.2. Parámetros utilizados

Para simplificar el análisis se consideraron algunos parámetros como constantes y conocidos, de tal forma:

$$U = 100 \quad \text{usuarios}$$

$$R = 12, 18, 24 \text{ y } 30 \quad \text{slots}$$

$$F = 15 \quad \text{bloques}$$

$$m = 300 \quad \text{bytes}$$

$$E_w = 255 \quad \text{slots}$$

Es importante resaltar que la longitud del mensaje representa la longitud del *frame* en la capa Ethernet MAC. Por lo que, al ir pasando en las subsecuentes capas se le irá adicionando el correspondiente *overhead* hasta su transmisión.

En IEEE 802.16, cuando el *frame* llega a la capa BWA MAC, se forma un *BWA MAC frame*, que se transmitirá en el canal UL utilizando palabras de código cortas (*short codewords*) o palabras de código largas (*long codeword*).

En el caso de que se requiera transmitir un *BWA MAC frame* menor a 245 bytes se usarán palabras de código cortas, en caso contrario, se usarían palabras de código largas.

En nuestro caso, cuando se genera un mensaje de 300 bytes, éste se codifica utilizando palabras de código largas, y por cada fragmento de 245 bytes del *BWA MAC frame*, se agregan 10 bytes de FEC-RS (para detectar y corregir errores en los 245 bytes de datos), es decir, por cada fragmento *BWA MAC frame* se agregan 10 bytes de protección. Por último, a estas palabras, se les adiciona un preámbulo (*preamble*) para sincronía y espacio de guarda (*guardband*) para posibles variaciones o retardos en la transmisión.

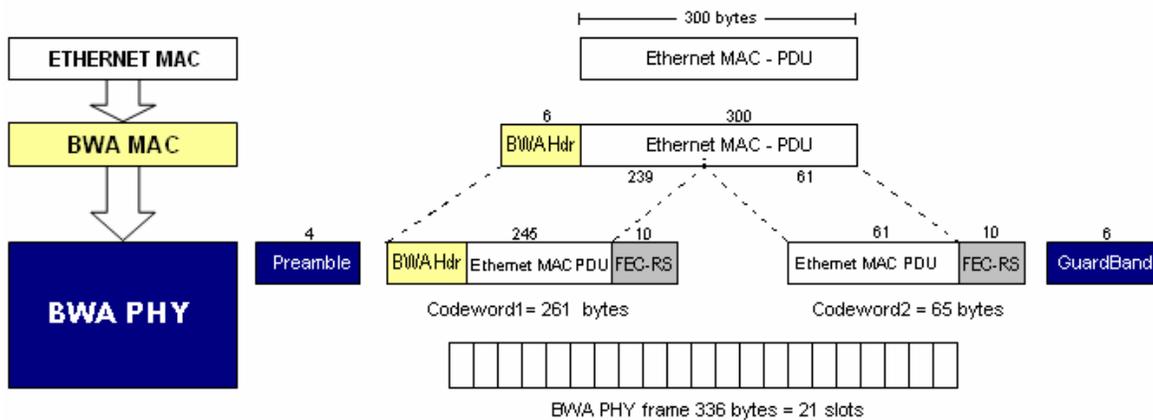


Figura 4.3. Codificación de un mensaje de 300 bytes (palabra de código larga).

Por consiguiente, para transmitir un mensaje Ethernet MAC de 300 bytes, se requiere un *grant* de 21 *slots*. Tal y como se ilustra en la figura 4.3.

Con el programa de computadora² que realizó el proceso iterativo de nuestro modelo, llegando a los siguientes resultados.

La figura 4.4 muestra el *throughput* del sistema como una función del número de usuarios, denotados por U , para un mensaje de 300 bytes y el número de *slots* de contención como parámetro.

² Para consultar el programa utilizado para obtener los resultados dirigirse al Apéndice B.

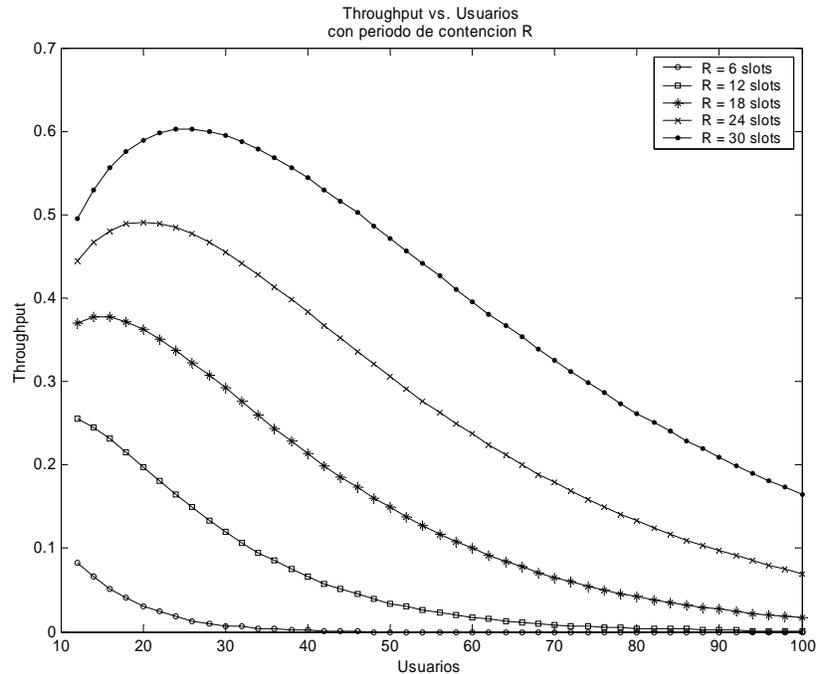


Figura 4.4. Throughput como función del número de usuarios, longitud del mensaje fijo $m = 300$ bytes y R como parámetro.

De acuerdo a la gráfica presentada, se observa que cuando se utilizan pocos *slots* de contención el *throughput* es bajo ya que éstos actúan como “un cuello de botella” al limitar a los usuarios ganar acceso al sistema. Por esta razón, al aumentar el número de *slots* de contención más usuarios logran el éxito y por ende, el *throughput* asciende.

Asimismo nos damos cuenta que el número de usuarios a través del cual se alcanza el máximo *throughput* aumenta directamente con el número de *slots* de contención. Después de ese número de usuarios, el *throughput* comienza a disminuir.

Con 30 usuarios, el *throughput* alcanzado con 30 *slots* de contención es mayor que el obtenido para 24 *slots* de contención y a su vez, éste es mayor que el logrado para 18 *slots*. Lo anterior se puede interpretar de la siguiente manera, cuando se tiene más *slots* de contención el número de colisiones disminuye por tanto aumenta la probabilidad de poder transmitir, además para este número de usuarios se cuenta con el suficiente número de *slots* para realizar la transmisión evitando así, que los usuarios tengan que esperar hasta que haya capacidad disponible.

4.5. Conclusiones

Con los resultados obtenidos mediante el modelo propuesto, es posible citar las siguientes características que presenta el sistema:

- El máximo *throughput* para una determinada longitud de mensaje es diferente dependiendo del número de usuarios en el sistema. Lo anterior es porque al incrementar el número de usuarios, más *slots* de contención son requeridos para conseguir un prolongado *throughput* ya que el máximo *throughput* obtenido decrece como producto del bajo número de *slots* disponibles para la transmisión de datos.
- También se observa que el máximo *throughput* corresponde a número de usuarios diferente para cada escenario. De esta forma, cuando el periodo de contención (R) es mayor, también el número de usuarios para el máximo *throughput* es mayor. Esto se debe a que al haber mayor número de *slots* de contención, se reducen el número de colisiones y por tanto aumenta el número de contendientes exitosos.
- El incremento del número de *slots* de contención no necesariamente aumenta el *throughput* para cualquier cantidad de usuarios en el sistema. Esto es porque además de contar con un número mayor de *slots* de contención que significa que en promedio habrá más usuarios que contiendan exitosamente, no siempre habrá capacidad disponible para que ellos puedan transmitir. Por esta razón los usuarios deberán esperar hasta que haya capacidad disponible y como consecuencia del incremento del tiempo de espera, el *throughput* se reduce.

Capítulo 5

COMPARACIÓN DE RESULTADOS

5.1. Introducción

En diversas ocasiones, para fines de investigación o proyección empresarial sólo se desea evaluar la posibilidad de implementar cierto tipo de red, por lo que se necesitan probar diversos aspectos de diseño de un modelo y valorar sus consecuencias.

Una forma de poder modelar diferentes tipos de redes es a través del uso de software especializado en la materia ya que con la ayuda de este tipo de herramientas es posible emular ambientes más reales y seguir con más detalle el comportamiento de la red en interés.

Para comprobar los resultados obtenidos mediante el modelo analítico propuesto en el capítulo anterior, se utilizó el simulador OPNET MODELER v. 8.0, un software de modelado de redes. Una de las razones por las que se utiliza esta herramienta es por su sencillez de programación con el interfaz gráfico, además de que cuenta con un modelo para redes que operan bajo el protocolo IEEE 802.16, este modelo fue desarrollado por el Laboratorio de Redes Inalámbricas de la Facultad de Ingeniería.

5.2. Modelo de Simulación para IEEE 802.16 en OPNET

OPNET (*Optimized Network Engineering Tool*) MODELER, es considerado uno de los simuladores de red más importantes de la actualidad. Entre las características que presenta el mencionado simulador, se citan las siguientes: es orientado a objetos, obedece jerarquías, utiliza las capacidades gráficas de la computadora y está basado en el lenguaje de programación proto C. Por lo tanto, OPNET es ideal para analizar y sintetizar los datos que se generan mediante las simulaciones.

Como ya se mencionó en párrafos anteriores, un minucioso modelo de simulación del protocolo MAC de IEEE 802.16 fue implementado utilizando OPNET Modeler v.8.0. Para ello se usó el siguiente diseño jerárquico que se muestra en la figura 5.1.

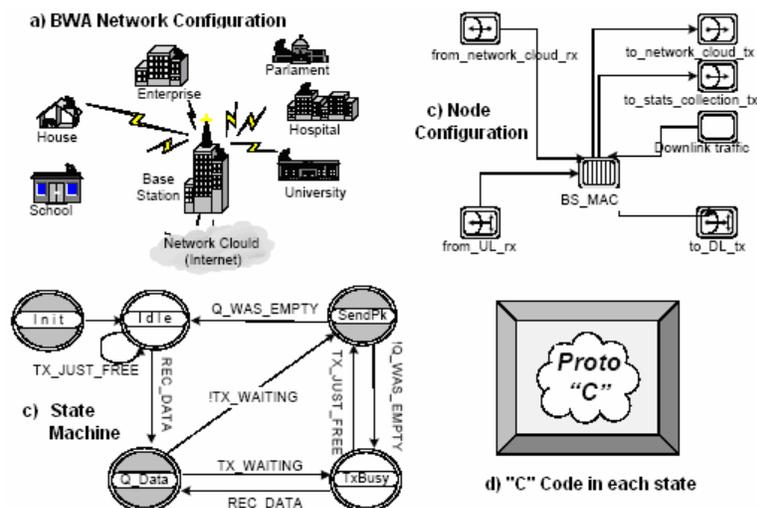


Figura 5.1. Modelo de simulación en OPNET.

En el nivel más alto de la topología de red BWA, se encuentran los componentes de la red, por ejemplo la BS y la SS, las cuales se encuentran conectadas como se muestra en la figura 5.1.a). El siguiente nivel, que se muestra en la figura 5.1.b), se define el funcionamiento de una SS en términos de sus componentes tales como las fuentes de tráfico, MAC y sus interfaces, etc. La operación de cada componente es definida por un estado, como en el ejemplo que se presenta en la figura 5.1.c). Las acciones de cada componente que se encuentre en un particular estado son definidas en código *Proto-C* como el de la figura 5.1.d). Este esquema permite realizar modificaciones que serán aplicadas en la operación del protocolo IEEE 802.16 para probar diferentes optimizaciones y mejoramientos en el mismo.

5.3. Simulación en OPNET

Para confirmar los resultados obtenidos con anterioridad, se procedió a realizar la simulación. Para ésta se empleó una red constituida por una estación base y 100 estaciones subscriptoras, cada una de ellas genera tráfico de tipo CBR, dicha red se muestra en la figura 5.2.

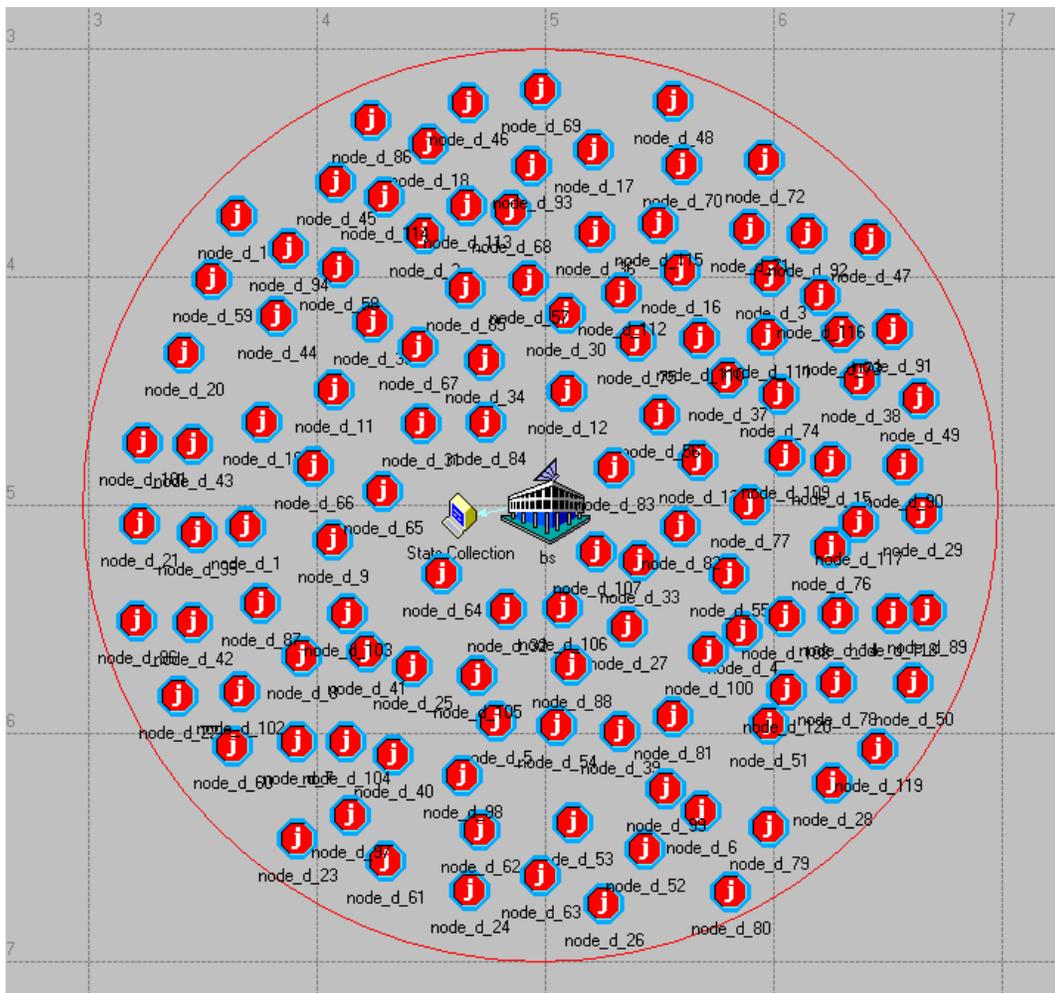


Figura 5.2. Red BWA con 100 usuarios (SSs).

Cada simulación emula el comportamiento de una red por 60 segundos, los resultados que se generan se guardan en un archivo de tipo escalar, el cual contendrá estadísticas promedio.

Todos los parámetros relacionados con la capa física, PHY, se encuentran en el archivo **bwa_phy.ef**, y todos los relacionados con la capa BWA MAC se hallan en el archivo llamado **bwa_mac_default.ef**.

Por otro lado, para que cada usuario pueda generar tráfico CBR, es indispensable definir ciertos parámetros, los cuales indicarán la distribución de las llegadas de los paquetes a transmitir, periodos activos y periodos inactivos. Dichas variables se establecen como atributos del módulo generador de tráfico **src_type_1**.

En la figura 5.3 se presentan los parámetros de simulación para cada una de las SSs.

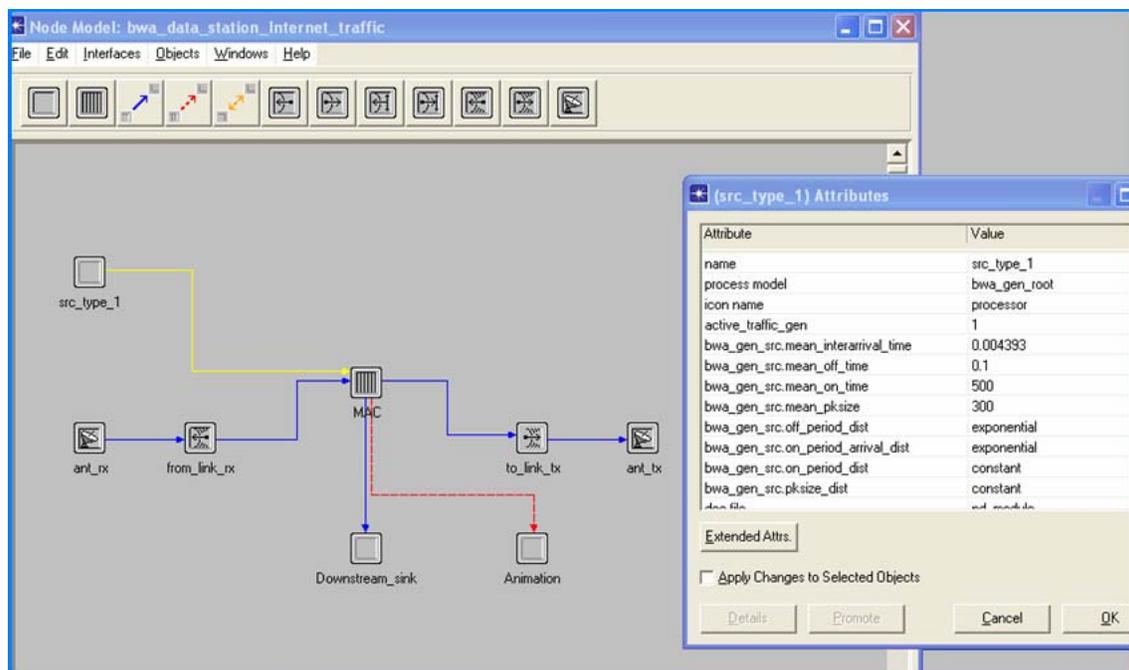


Figura 5.3. Parámetros de simulación de la SS.

Como se puede observar, la distribución que se emplea para generar tráfico CBR se fundamenta en lo siguiente:

- Distribución de periodo de inactividad, (*off-period_distribution*, *mean_off_time*).
- Distribución de periodo de actividad, (*on-period_distribution*, *mean_on_time*).
- Distribución de las llegadas de los paquetes (*on_period_arrival_distribution*, *mean_interarrival time*) y la distribución del tamaño de los frames (*packet_distribution*, *packet_size*).

En la figura 5.4, se muestra como se especifica el tráfico CBR.

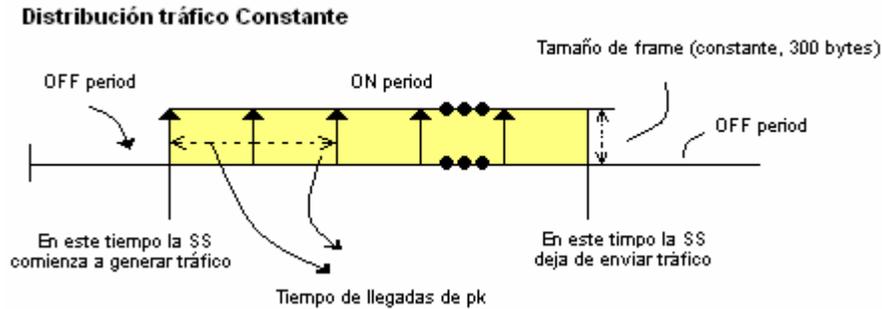


Figura 5.4. Distribución Tráfico Constante.

Cabe mencionar que en el parámetro concerniente al tiempo de llegadas de los paquetes, cambia dependiendo del número de nodos activos en la red. Estos valores se tomaron del tamaño del ciclo, $E[z]$, para el correspondiente número de nodos.

En el Apéndice C se presentan todos los tiempos de llegadas de paquetes para cada uno de los escenarios simulados, así como también, los valores del *throughput* proporcionado por el simulador y el modelo propuesto, para cada caso.

A continuación en la tabla 5.1 se resumen los parámetros empleados en las simulaciones.

Parámetro	Valor
Uplink Data Rate (18 MHz Ch.)	28.8 Mbps
Mínimo <i>slots</i> de contención por <i>frame</i> (MAC)	12, 18, 24 y 30 <i>slots</i>
Tiempo de llegada entre paquetes	$E[z]$ ms
Tiempo de simulación para cada corrida	60 s
Distancia mínima y máxima de SS al Headend	0.1 a 2 Km
Máximo número de usuarios en la red	100
Tipo de tráfico analizado	CBR

Tabla 5.1. Parámetros de Simulación.

Los resultados obtenidos mediante la simulación en OPNET se muestran en la gráfica de la figura 5.5.

En esta gráfica se presentan las gráficas correspondientes a cada uno de los escenarios simulados, es decir, para cuando se evalúa el *throughput* en el caso de que se empleen 12, 18, 24 y 30 *slots* de contención.

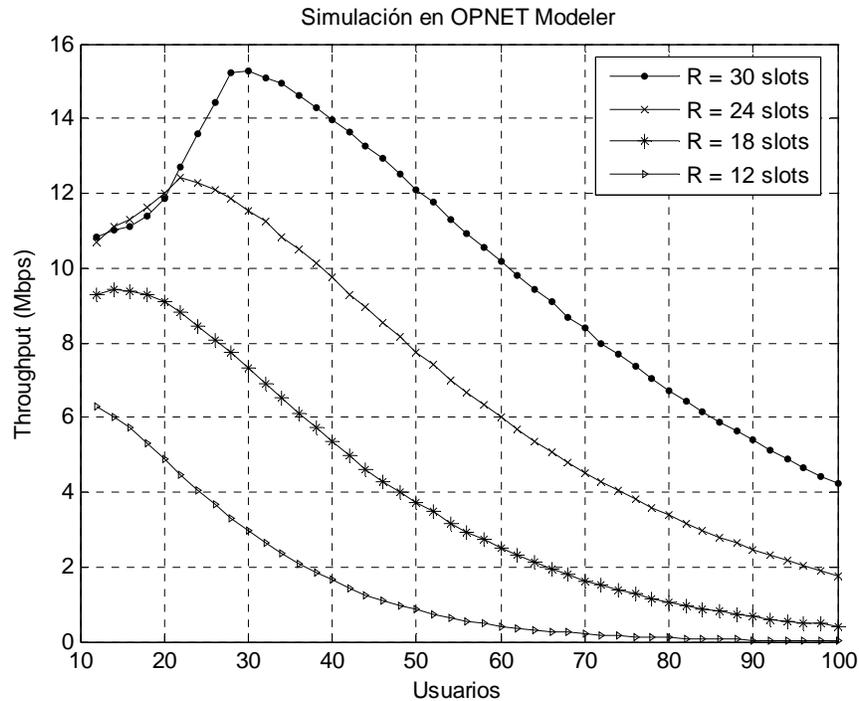


Figura 5.5. Throughput para la red de 100 usuarios (Simulación en OPNET).

De la gráfica presentada en la figura 5.5, es necesario señalar dos aspectos importantes: en cada una de las simulaciones, el *throughput* del sistema está valuado en la capa BWA MAC del protocolo en estudio además de que el *throughput* proporcionado mediante el simulador está dado en Mbps. Lo anterior no sucede con el modelo analítico pues éste calcula el *throughput* de la red en la capa PHY y el resultado lo da como una razón porcentual.

Para hacer una comparación apropiada con los resultados del modelo analítico es indispensable realizar una conversión de los datos proporcionados por el simulador y de esta forma obtener una distribución de *throughput* en la capa PHY³. Para esto tomamos en cuenta los encabezados y los códigos de detección de error que se agregan en el marco del estándar IEEE 802.16.

Debido a que la longitud de los paquetes es constante e igual a 300 *bytes* la distribución resultante será proporcional a la obtenida en la capa MAC. Tal y como se presenta en la figura 5.6.

³ Los resultados se observan en el apéndice C.

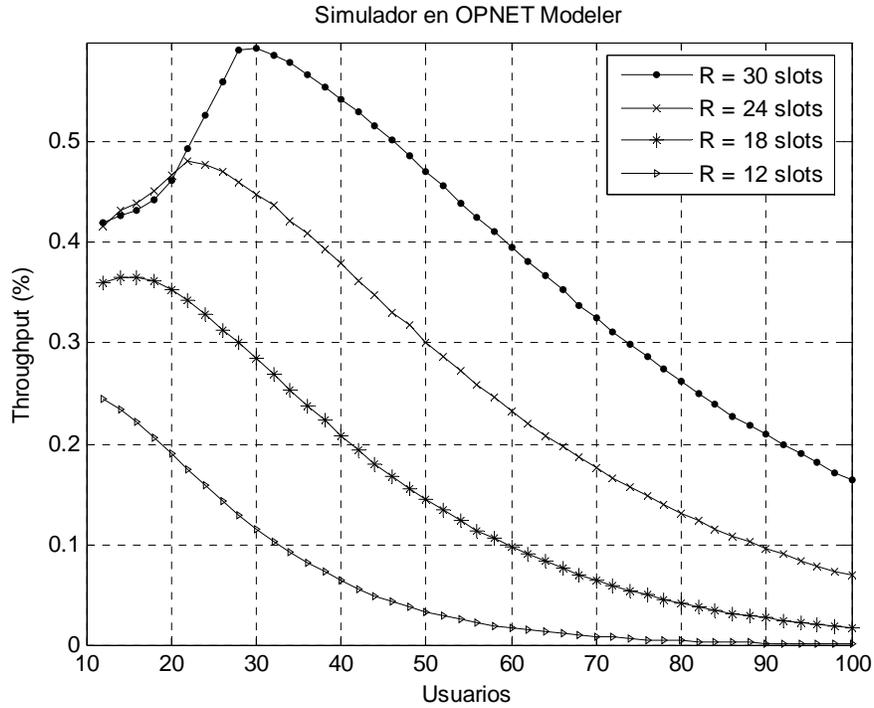


Figura 5.6. Throughput en capa PHY para la red de 100 nodos.

En este caso, al estar dado el *throughput* de manera porcentual, ya es posible realizar una comparación inmediata de la eficiencia de la red evaluada por medio del modelo matemático y la dada por OPNET. De esto nos ocuparemos en la siguiente sección del presente capítulo.

5.4. Comparación de Resultados

Una vez obtenido el comportamiento de nuestra red mediante el modelo de simulación de OPNET, se procedió a compararlo con los resultados arrojados con el modelo analítico propuesto. Esta comparación se aprecia en las gráficas de las figuras 5.7, 5.8, 5.9 y 5.10, correspondientes a cada uno de los casos estudiados.

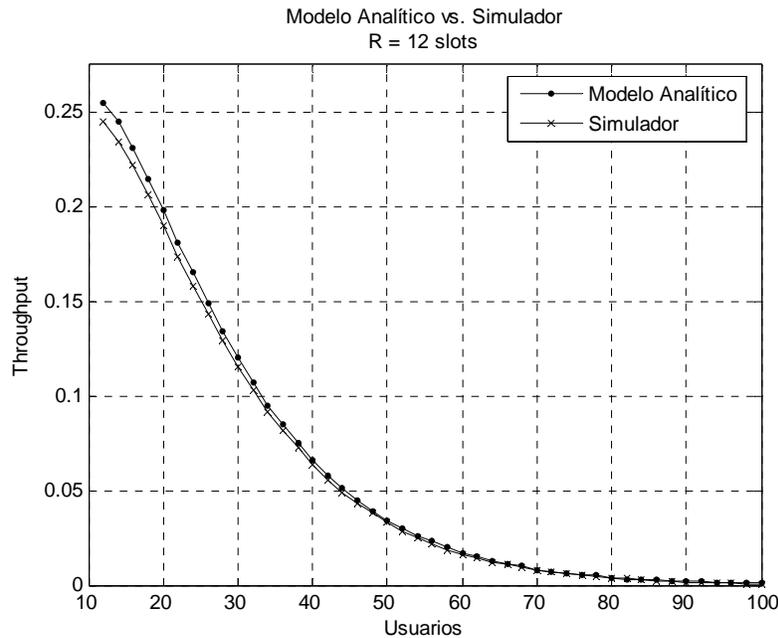


Figura 5.7. Comparación entre los modelos para un periodo de contención R = 12 slots.

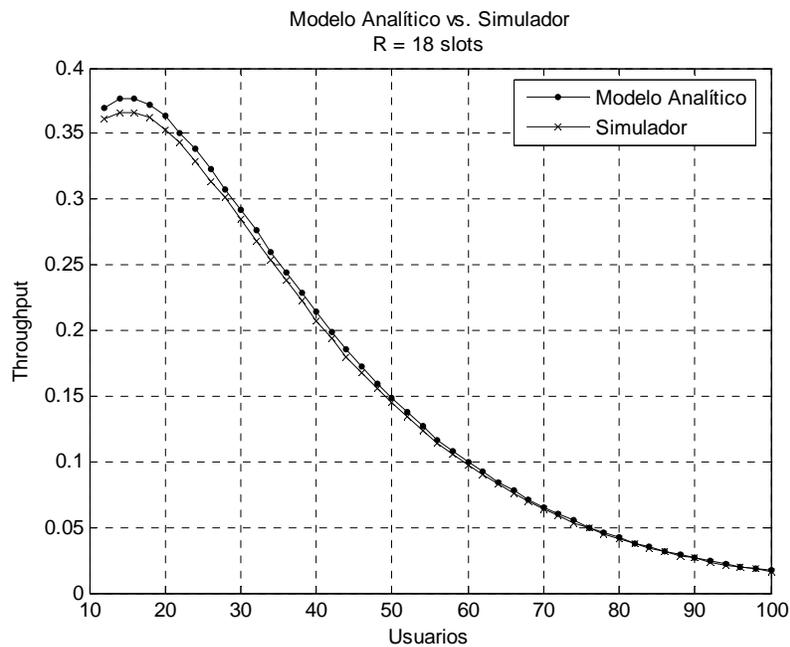


Figura 5.8. Comparación entre los modelos para un periodo de contención R = 18 slots.

Las figuras 5.7 y 5.8 muestran que los resultados obtenidos mediante el simulador guardan una estrecha relación con los conocidos a partir del modelo analítico. Por lo tanto se comprueba la validez de nuestro modelo matemático.

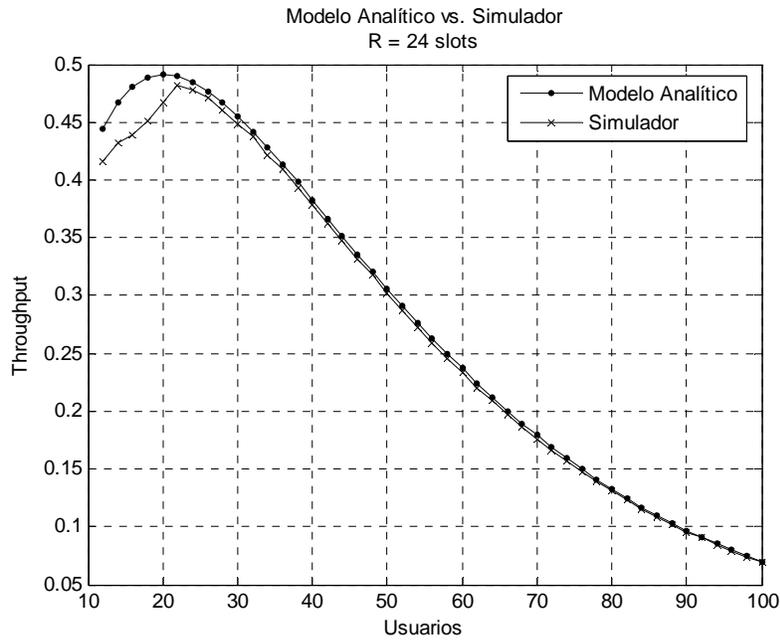


Figura 5.9. Comparación entre los modelos para un periodo de contención $R = 24$ slots.

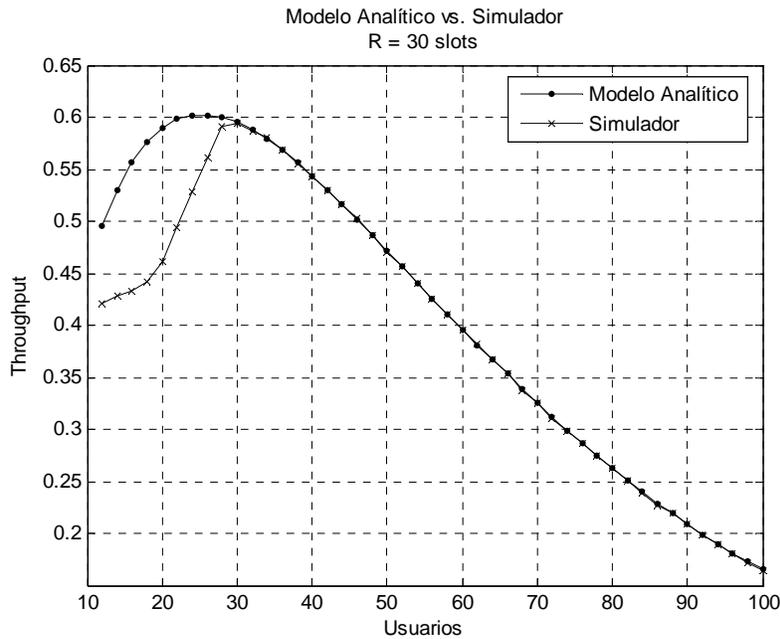


Figura 5.10. Comparación entre los modelos para un periodo de contención $R = 30$ slots.

En lo que concierne a los escenarios cuando se tienen 24 y 30 *slots* de contención, los cuales se presentan en las figuras 5.9 y 5.10 respectivamente, se aprecia que existe una gran diferencia entre las gráficas obtenidas con el simulador y con el modelo matemático, estas discrepancias se muestran en aquellos puntos en los que se tiene un número relativamente bajo de usuarios activos. Este comportamiento se justificará como parte de las conclusiones de este capítulo.

Una vez hecha la comparación, la mejor forma de validar el modelo analítico propuesto es determinando su desviación con el modelo teórico que, en este caso, es descrito por el modelo de simulación programado en OPNET.

En términos técnicos, se considera que la aproximación es buena si la desviación respecto al modelo teórico no es mayor al cinco por ciento. La desviación del modelo analítico propuesto se muestra en la gráfica de la figura 5.11.

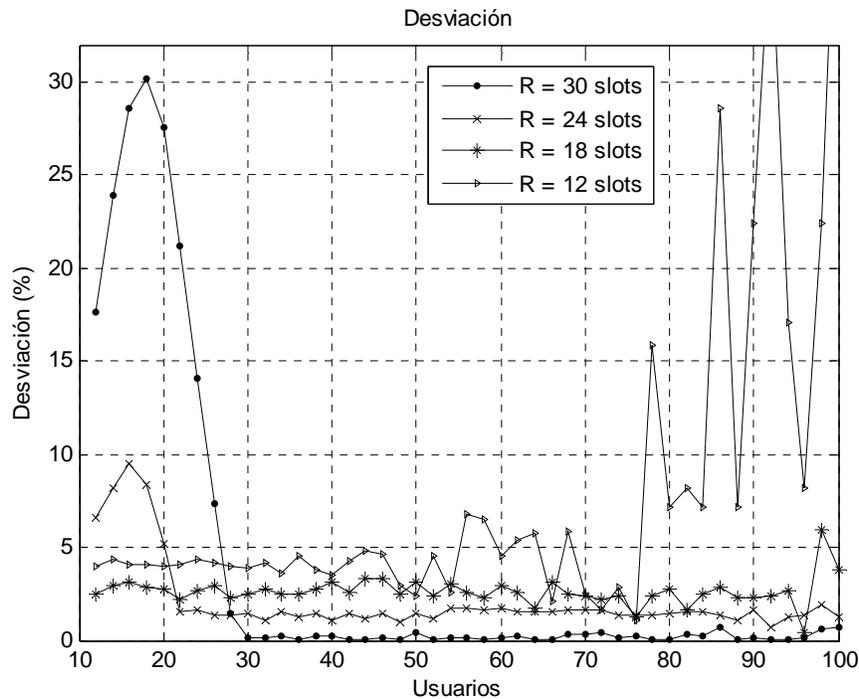


Figura 5.11. Desviación porcentual entre los modelos.

En las tablas presentadas en el Apéndice C, nos damos cuenta que la mayoría de los resultados se encuentran en el intervalo de confianza menor al 5%. Lo cual respalda la validez de nuestra aproximación analítica.

5.5. Conclusiones

De la comparación hecha entre el modelo analítico y el modelo de simulación pueden hacerse las siguientes observaciones:

- Los dos modelos tienen un comportamiento similar en tanto que ambos elevan su *throughput* hasta alcanzar un máximo para después caer de manera exponencial.
- Mediante la simulación en OPNET se comprobó la validez del modelo analítico formulado, considerando que una buena aproximación del comportamiento de la red no excedería una desviación del cinco por ciento. Para cada uno de los escenarios simulados, se observa que a partir de que la red comienza a operar con cierto número de usuarios, el comportamiento previsto por el modelo analítico es prácticamente el mismo que el del simulador. Para estos casos la desviación obtenida es menor al cinco por ciento. El número de usuarios para el que ocurre esto es diferente para cada escenario, encontrándose que para un $R = 30$ se tiene la mayor desviación.
- Los modelos difieren en su comportamiento para pocos usuarios registrándose una desviación máxima del treinta por ciento (para el caso de $R = 30$ *slots*). Esto indica que el modelo analítico propuesto no es capaz de determinar el comportamiento de la red cuando hay pocos usuarios. Esto se debe principalmente a la forma en que opera el simulador. Cuando un paquete llega a la cola de una SS, éste entra en contención para transmitir ese paquete. Sin embargo, dicho paquete puede no llegar a ser transmitido en el siguiente *frame* aún cuando la contención haya sido exitosa (esto dependerá del número de *slots* disponibles para la transmisión). Por tanto, esto generará un retardo. Si este retardo es mayor que el tiempo entre llegadas de paquetes (Ez), los paquetes permanecerán en la cola y provocarán un retardo mayor (*queue delay*). En el modelo analítico no se prevé este comportamiento. Para pocos usuarios el tiempo entre llegadas es pequeño, lo que produce un *queue delay* grande. Esto origina una caída en el *throughput* y la considerable desviación entre modelos. En tanto el número de usuarios aumenta, el tiempo entre llegadas también crece y el *queue delay* disminuye, haciendo que el sistema se estabilice.

Dicho comportamiento se observa en las gráficas comparativas. Sin embargo, para el estudio del funcionamiento de una red, es de especial interés analizar su comportamiento en sus límites, es decir, cuando la red está próxima a saturarse, trabajando a toda su capacidad. Para este caso se comprobó la validez del modelo propuesto.

- Se observa también que la desviación antes de que el sistema se estabilice, es directamente proporcional al número de *slots* de contención, excepto para el caso en el que se emplean 18 *slots* de contención. Sin embargo, cuando el sistema se estabiliza la desviación es inversamente proporcional al número de *slots* de contención, R .

Capítulo 6

Conclusiones

6.1. Discusiones Finales

De acuerdo con los resultados obtenidos mediante la simulación en OPNET Modeler se pueden hacer las siguientes observaciones:

El modelo analítico propuesto arrojó resultados esperados y se logró comprobar la validez del mismo. Si bien estos resultados no fueron los óptimos debido a diferencias en la forma de operación entre el modelo analítico y el simulador, puede concluirse que comportamiento de la red en cuestión es confiable para nuestros casos de interés.

El modelo funciona de manera eficiente con las consideraciones hechas. Tales consideraciones se limitaron a un análisis muy particular de las redes que operan bajo el protocolo IEEE 802.16. Lo anterior, es un buen principio ya que el modelo propuesto puede ser mejorado para predecir el comportamiento de este tipo de redes de una forma más general.

6.2. Trabajo Futuro

El estudio realizado en el presente documento servirá para generar nuevos modelos de simulación, así como para mejorar el modelo actual. Los datos mostrados y analizados podrán ser usados para la investigación en el campo de las comunicaciones con el fin de mejorar la interacción de la información entre usuarios que circula diariamente a través del mundo.

Existen diversos aspectos que pueden ser mejorados al actual modelo de simulación, y que servirán de base a trabajos subsecuentes. Una vez que se hagan estas modificaciones, el modelo se comportará de una manera óptima y servirá incluso para hacer más pruebas con otro tipo de redes aún más complejas.

Primeramente se debe mejorar el comportamiento con pocos usuarios. Para ello se debe minimizar el *queue delay*, discutido en las conclusiones del capítulo 5. Esto podría hacerse proponiendo otro tamaño de paquete y modificando el tamaño de los periodos de contención. De esta forma los tiempos de llegada entre paquetes se minimizarían y los usuarios tendrían más éxito en la transmisión de su información.

También es posible implementar al modelo propuesto otros tipos de tráfico. En este estudio, el tráfico fue con paquetes de tamaño constante mediante la implementación de CBR, el cual funciona cuando se transmite voz o vídeo. Sin embargo, es de gran interés determinar el comportamiento dinámico de redes que tengan otro tipo de tráfico como el de Internet o el de vídeo con ráfagas variables, el cual sigue una distribución de tipo variable y probabilística.

Otro mejoramiento al modelo se encuentra en incrementar la utilización de la red. Al utilizar un número de paquete constante, a cada usuario se le asigna un tamaño de *grant* para la transmisión de su información que también es constante (en el caso de estudio, 21 *slots*). Cuando el periodo de contención es igual $R = 30$ *slots*, pueden ser atendidos hasta 20 usuarios repartidos dentro de los 420 *slots* restantes en cada *frame*. Por otra parte, cuando el periodo de contención disminuye, existen más *slots*

que pueden ser utilizados para la transmisión, sin embargo éstos no son suficientes para acomodar a otro usuario ya que no se alcanza a completar otro *grant*. Esto hace que esos *slots* sobrantes se desperdicien y por ende afecten en la eficiencia de la red.

En general existen varios temas a estudiar a futuro, los cuales mejorarán el modelo de simulación haciéndolo mucho más extenso y funcional, lo que servirá para realizar pruebas más confiables y precisas.

6.3. Contribuciones

Con el estudio realizado en la presente tesis se logró la obtención de un modelo matemático que permite evaluar el comportamiento dinámico de redes bajo el estándar IEEE 802.16. Sin embargo, dicho modelo se enfoca en el análisis de un conjunto de redes con características muy particulares.

Lo anterior constituye la base de un proceso de investigación que permitirá la completa caracterización de redes inalámbricas de banda ancha ya que el modelo desarrollado puede ser adaptado, modificado, ampliado y optimizado para incorporar un mayor número de parámetros y funciones que conformen un esquema adaptable a los requerimientos específicos de otra investigación, desarrollo o implementación en particular.

Además, la importancia del desarrollo de modelos que permiten evaluar la eficiencia de las redes de telecomunicaciones radica en que este conocimiento permite a los proveedores de este tipo de servicios planear las aplicaciones que se les puede vender a los usuarios, valorar los costos y tarifas por cliente así como también implementar la topología de red que deberá soportar los servicios a ofrecer.

6.4. Conclusiones Finales

De los resultados de la investigación se comprobó que el protocolo para Redes Inalámbricas de Banda Ancha, IEEE 802.16, puede integrar servicios de voz y video siempre y cuando se realicen las adecuaciones que optimicen su comportamiento.

Finalmente, los objetivos planteados al inicio de esta investigación pudieron ser cumplidos al recrear las condiciones bajo las cuales funciona la red de comunicación propuesta. Al mismo tiempo, fue posible citar algunas de las recomendaciones que optimizan el comportamiento del protocolo en diferentes escenarios, en donde se podrá experimentar con otro tipo de aplicaciones que no fueron cubiertas en el presente estudio.

Cabe destacar que estos resultados también permiten considerar al protocolo IEEE 802.16 como una solución eficiente para la generación de infraestructura y el ofrecimiento de servicios diversos de comunicación. En desarrollos posteriores será posible también generar nuevas aplicaciones que extiendan las capacidades del protocolo.

Apéndice A

Acrónimos y Abreviaturas

BE	Best Effort
BRH	Bandwidth Request Header
BS	Base Station
BWA	Broadband Wireless Access
CBR	Constant Bit Rate
CDMA	Code Division Multiple Access
CID	Connection Identifier
CRC	Cyclic Redundancy Check
DCD	Downlink Channel Descriptor
DL	Downlink
DL-MAP	Downlink Map
DSL	Digital Subscriber Line
EDGE	Enhanced Data Rates for Global Evolution
EHF	Extremely High Frequency
FDD	Frequency Division Duplex
FDMA	Frequency Division Multiple Access
GMH	Generic MAC Header
GPC	Grant Per Connection
GPRS	General Packet Radio System
GPRS	General Packet Radio Service
GPSS	Grants Per Subscriber Station
GSM	Global System for Mobile Communications
HSDPA	High Speed Downlink Packet Access
IDU	Indoor Unit
IMT200	International Mobile Telecommunication 2000
ITU	International Telecommunications Union
LOS	Line of Sight
MAC	Media Access Control
NMT	Nordic Mobile Telephone

nrtPS	Non-Real-Time Polling Service
NTT	Nippon Telegraph and Telephone
ODU	Outdoor Unit
PCR	Packet Channel Request
PDC	Personal Digital Communications
PIA	Packet Immediate Assignment
PM	Poll-me bit
PoP	Point of Presence
POTS	Plain Old Telephony Service
PSTN	Public Switched Telephone Network
REG-REQ	Registration Request
REG-RSP	Registration Response
RLC	Radio Link Control
RNG-REQ	Ranging Request
RNG-RSP	Ranging Response
rtPS	Real-Time Polling Service
SHF	Super High Frequency
SMS	Short Message Service
SS	Subscriber Station
TACS	Total Access Communications System
TDD	Time Division Duplex
TDM	Time Division Multiplexing
TDMA	Time Division Multiple Access
TIA	Telecommunications Industry Association
UCD	Uplink Channel Descriptor
UGS	Unsolicited Grant Service
UL	Uplink
UL-MAP	Uplink Map
UMTS	Universal Mobile Telecommunication System
WCDMA	Wideband Code Division Multiple Access
WiFi	Wireless Fidelity
WiMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access
WLAN	Wireless Local Area Network

Apéndice B

Código para la Evaluación del *Throughput* del Sistema

```

#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <math.h>

#define zero 0
#define TRUE 1
#define FALSE 0
#define numberMoments 10

double findBinomialSuccess(int,int, double*, int);
void findBinomialProbs(int, double, double*);
double findProbSuccessContend(int, int, double, double*, int);
int computeblocksSerial(int);

main()
{
double Pc_i, U, Ex, Es_i, Pc, Pu, Ec, Ebz, Ebz_i, Ed, Ez, Es, Ew;
double proportionAvailMsg, delta, successesPerCycle, parallelCapability;
double Tdata_bloks, tThr,tThrProp, userShare, captureProb[6], upperCaptureLimit;

int R, j, F, moreWait, counter,iWait;

printf("U   CS Pc      E[z]   E[c]      E[w]      E[s]      Ebz      Ebz_i
Thr\n");
upperCaptureLimit = 1;

for (j=0; j<= upperCaptureLimit; j++)
    captureProb[j] = 0.0;
captureProb[1] = 1.0;      // Probabilidad de Captura

for (counter = 6; counter <=30; counter+=6) // No. de slots de contención
{
    for (U=2; U <= 100; U += 2) // No. De usuarios en la red
    {
R = counter; // No. de Slots de Contención por Bloque
Pc = 0.01;
F = 15;
Ex = computeblocksSerial(300); //Tamaño en slots del mensaje a transmitir
Tdata_bloks = Ex*U;
delta = 1.0;
Ew = 255;
moreWait = TRUE;
while (moreWait) {
    while(delta > 10E-10) {
        Pc_i = Pc; // Pc o,o
        Ec = (1 + (1-Pc_i)*F/Pc_i)*30;    // E[c]=1+[1-Pc]*F/Pc
    }
}
}
}

```

```

    Ez = Ex + Ew + Ec; //E[z]=E[c]+E[w]+E[x]
    Ebz_i = (0.25 + (Ez/30-0.25)/F);
    Ebz = Ez/(30*F);
    Es = U/Ebz;//E[s]=U*F/E[z]
    Pu = Es/(Pc_i*U); //Pc=E[s]/E[u], donde E[u]=Pu*U
    if (Pu > 1)
        Pu = 1;
        Pc = findProbSuccessContend(U, R, Pu,
captureProb,upperCaptureLimit);
        delta = fabs(Pc-Pc_i);
    }
    Ec = (1.0 + (1-Pc)*F/Pc)*30;// E[c]=1+[1-Pc]*F/Pc
    Ez = Ex + Ew + Ec; //E[z]=E[c]+E[w]+E[x]
    Ebz = Ez/(30*F);
    Es = U/Ebz;//E[s]=U*F/E[z]
    Ed = (Ez - Ebz*R);
    proportionAvailMsg = 30*Ed/Ez;
    successesPerCycle = Ebz*Es;//E[b]*E[s]

    if (Ed/U <= Ex)
        userShare = Ed/U;
    Else
        userShare = Ex;

    if (R != 30)
        tThrProp= U*userShare/((Ez-(30-R)*Ez/(30*F)));

    Else
        tThrProp= U*userShare/(Ez);
    delta = 1.0;
    if(userShare < Ex)
    {
        if (Ex - userShare >= 1)
            Ew+= Ex - userShare;
        Else
            Ew+= 1;
            iWait = iWait+1;
        }
    else moreWait = FALSE;
    }
    printf("%-3.0f %-2d %-3.3f %-7.2f %-7.2f %-8.3f %-8.3f %-8.3f %-8.3f %-
8.3f\n", U, R, Pc, Ez, Ec, Ew, Es, Ebz, Ebz_i, tThrProp);
}
}
return 0;
}

//int r_max, slots, UCL; double p, *pWin;
double findProbSuccessContend(int r_max, int slots, double p, double pWin[6], int
UCL)
{
double tempSuccessProb, contenderProbs[161], ESlotSuccess[161];
int i, j;
//contenderProbs = dvector(0,r_max);
for (j=1; j<= r_max; j++)
    contenderProbs[j] = 0;
//ESlotSuccess = dvector(1,r_max);
for (j=1; j<= r_max; j++)
    ESlotSuccess[j] = 0;
findBinomialProbs(r_max, p, contenderProbs);
ESlotSuccess[1] = pWin[1]/(double) slots;
for(i=2;i<=r_max;i++)
    ESlotSuccess[i] = findBinomialSuccess(i, slots, pWin, UCL);

```

```

tempSuccessProb = 0.0;
for(i=1;i<=r_max;i++)
    tempSuccessProb += ESlotSuccess[i]*contenderProbs[i];
for (j=1; j<= r_max; j++)
    ESlotSuccess[j] = 0;
for (j=0; j<= r_max; j++)
    contenderProbs[j] = 0;
tempSuccessProb /= ((double) r_max * p); //Pc = R*Ps/(U*Pu)
return tempSuccessProb;
}

/*****/
// Cálculo de Probabilidad Binomial.

void findBinomialProbs(int n, double pSuccess, double *probVector)
{
int i, j; double pChoose, qChoose;
pChoose = pSuccess;
qChoose = 1-pChoose;
probVector[0] = 1 -pChoose;
probVector[1] = pChoose;
for(i=2; i <= n; i++) {
    probVector[i] = probVector[i-1] * pChoose;
    for(j = i-1 ; j >0; j--)
        probVector[j] = probVector[j]*qChoose + probVector[j-1]*pChoose;
    probVector[0] *= qChoose;
}
}

/*****/

double findBinomialSuccess(int r, int n, double successProb[161], int
upperCaptureLimit)
{
double pChoose, qChoose, probMassChoose[161], temp, upperLimit;
int i, j;
pChoose = (double) 1/ n;
qChoose = 1-pChoose;
for (j=0; j<= r; j++)
    probMassChoose[j] = 0;
findBinomialProbs(r, pChoose, probMassChoose);
temp = 0.0;
if (upperCaptureLimit <= r)
    upperLimit = upperCaptureLimit;
Else
    upperLimit = r;
for(i=1;i<=upperLimit; i++)
    temp += probMassChoose[i]*successProb[i];
//free_dvector(probMassChoose, 0, r);
for (j=0; j<= r; j++)
    probMassChoose[j] = 0;
temp *= (double) n;
return temp;
}

/*****/
//Cálculo del tamaño del Grant

int computeblocksSerial(int no_of_bits)

{
int BWA_MAC_header = 6;

```

```
int FEC1 = 6;
int FEC2 = 10;
int preamble = 4;
int guard_band = 6;

int remain, length_BWA_MAC, length_Eth;
int RLC_pkts_1, RLC_pkts_2, Total_RLC_pkts, quotient, no_PDU_pkts;

length_Eth = no_of_bits;

length_BWA_MAC=length_Eth + BWA_MAC_header;

no_PDU_pkts = length_BWA_MAC/245;
remain = (length_BWA_MAC - no_PDU_pkts*245);
RLC_pkts_1= no_PDU_pkts*245;
RLC_pkts_2 = remain + FEC2;

Total_RLC_pkts = FEC2* no_PDU_pkts + RLC_pkts_1 + RLC_pkts_2 + preamble +
guard_band;

quotient = Total_RLC_pkts/16;

if ((Total_RLC_pkts - quotient*16) != 0)
    quotient += 1;

Total_RLC_pkts = quotient;

return (Total_RLC_pkts);
}
```

Apéndice C

Comparación Modelo Analítico y Simulación

Resultados primer escenario R=12 slots.

U	Modelo Analítico			Simulador				Desviación [%]
	Ez [slots]	Ez [s]	Thr [%]	Thr [Mbps]	Thr_MAC [%]	HeaderMAC [%]	Thr_PHY [%]	
12	1027,89	0,004568	0,255	6,307	0,2190	0,0263	0,2453	3,9661
14	1250,65	0,005558	0,245	6,035	0,2095	0,0251	0,2347	4,3911
16	1515,74	0,006737	0,231	5,708	0,1982	0,0238	0,2220	4,0645
18	1831,23	0,008139	0,215	5,311	0,1844	0,0221	0,2065	4,0966
20	2206,69	0,009808	0,198	4,895	0,1700	0,0204	0,1904	4,0128
22	2653,51	0,011793	0,181	4,474	0,1553	0,0186	0,1740	4,0296
24	3185,27	0,014157	0,165	4,066	0,1412	0,0169	0,1581	4,3497
26	3818,11	0,016969	0,149	3,678	0,1277	0,0153	0,1430	4,1715
28	4571,24	0,020317	0,134	3,315	0,1151	0,0138	0,1289	3,9431
30	5467,52	0,024300	0,120	2,971	0,1032	0,0124	0,1155	3,8611
32	6534,18	0,029041	0,107	2,641	0,0917	0,0110	0,1027	4,1813
34	7803,58	0,034683	0,095	2,357	0,0818	0,0098	0,0917	3,6426
36	9314,28	0,041397	0,085	2,091	0,0726	0,0087	0,0813	4,5296
38	11112,13	0,049387	0,075	1,858	0,0645	0,0077	0,0723	3,7982
40	13251,73	0,058897	0,066	1,639	0,0569	0,0068	0,0637	3,5475
42	15798,03	0,070213	0,058	1,430	0,0497	0,0060	0,0556	4,2957
44	18828,33	0,083681	0,051	1,251	0,0434	0,0052	0,0487	4,8304
46	22434,64	0,099710	0,045	1,106	0,0384	0,0046	0,0430	4,6241
48	26726,45	0,118784	0,039	0,974	0,0338	0,0041	0,0379	2,9627
50	31834,05	0,141485	0,034	0,854	0,0297	0,0036	0,0332	2,3754
52	37912,52	0,168500	0,030	0,738	0,0256	0,0031	0,0287	4,5296
54	45146,41	0,200651	0,026	0,652	0,0226	0,0027	0,0254	2,5416
56	53755,33	0,238913	0,023	0,554	0,0192	0,0023	0,0215	6,7561
58	64000,66	0,284447	0,020	0,483	0,0168	0,0020	0,0188	6,4774
60	76193,44	0,338638	0,017	0,418	0,0145	0,0017	0,0163	4,5796
62	90703,87	0,403128	0,015	0,366	0,0127	0,0015	0,0142	5,3864
64	107972,47	0,479878	0,013	0,316	0,0110	0,0013	0,0123	5,7866
66	128523,53	0,571216	0,011	0,277	0,0096	0,0012	0,0108	2,1145
68	152981,00	0,679916	0,010	0,243	0,0084	0,0010	0,0095	5,8201
70	182087,40	0,809277	0,008	0,211	0,0073	0,0009	0,0082	2,5051
72	216726,43	0,963229	0,007	0,183	0,0064	0,0008	0,0071	1,6393
74	257949,73	1,146443	0,006	0,150	0,0052	0,0006	0,0058	2,8571
76	307008,87	1,364484	0,005	0,130	0,0045	0,0005	0,0051	1,0989
78	365393,30	1,623970	0,005	0,111	0,0039	0,0005	0,0043	15,8301
80	434875,60	1,932780	0,004	0,096	0,0033	0,0004	0,0037	7,1429
82	517565,28	2,300290	0,003	0,084	0,0029	0,0004	0,0033	8,1633
84	615972,82	2,737657	0,003	0,072	0,0025	0,0003	0,0028	7,1429
86	733085,94	3,258160	0,003	0,060	0,0021	0,0003	0,0023	28,5714
88	872460,22	3,877601	0,002	0,048	0,0017	0,0002	0,0019	7,1429
90	1038327,14	4,614787	0,002	0,042	0,0015	0,0002	0,0016	22,4490
92	1235722,48	5,492100	0,002	0,037	0,0013	0,0002	0,0014	38,9961
94	1470639,25	6,536174	0,001	0,031	0,0011	0,0001	0,0012	17,0507
96	1750209,62	7,778709	0,001	0,028	0,0010	0,0001	0,0011	8,1633
98	2082921,47	9,257429	0,001	0,021	0,0007	0,0001	0,0008	22,4490
100	2478876,06	11,017227	0,001	0,018	0,0006	0,0001	0,0007	42,8571
Margen de confianza =								7,9494

Tabla B.1. Resultados primer escenario, R = 12 slots.

Resultados primer escenario $R=18$ slots.

U	Modelo Analítico			Simulador				Desviación [%]
	Ez [slots]	Ez [s]	Thr [%]	Thr [Mbps]	Thr_MAC [%]	HeaderMAC [%]	Thr_PHY [%]	
12	699,86	0,003110	0,370	9,285	0,3224	0,0387	0,3611	2,4694
14	802,06	0,003565	0,377	9,415	0,3269	0,0392	0,3661	2,9664
16	916,64	0,004074	0,377	9,399	0,3264	0,0392	0,3655	3,1417
18	1045,09	0,004645	0,372	9,304	0,3231	0,0388	0,3618	2,8129
20	1189,09	0,005285	0,363	9,086	0,3155	0,0379	0,3533	2,7326
22	1350,54	0,006002	0,351	8,830	0,3066	0,0368	0,3434	2,2165
24	1531,54	0,006807	0,338	8,462	0,2938	0,0353	0,3291	2,7113
26	1734,46	0,007709	0,323	8,068	0,2801	0,0336	0,3138	2,9464
28	1961,96	0,008720	0,308	7,740	0,2688	0,0323	0,3010	2,3256
30	2217,00	0,009853	0,292	7,329	0,2545	0,0305	0,2850	2,4501
32	2502,94	0,011124	0,276	6,904	0,2397	0,0288	0,2685	2,7976
34	2823,50	0,012549	0,260	6,526	0,2266	0,0272	0,2538	2,4474
36	3182,89	0,014146	0,244	6,121	0,2125	0,0255	0,2380	2,5043
38	3585,80	0,015937	0,229	5,731	0,1990	0,0239	0,2229	2,7495
40	4037,50	0,017944	0,214	5,337	0,1853	0,0222	0,2076	3,1077
42	4543,91	0,020195	0,199	4,988	0,1732	0,0208	0,1940	2,5891
44	5111,65	0,022718	0,186	4,627	0,1607	0,0193	0,1799	3,3684
46	5748,15	0,025547	0,173	4,304	0,1494	0,0179	0,1674	3,3590
48	6461,73	0,028719	0,160	4,013	0,1393	0,0167	0,1561	2,5239
50	7261,73	0,032274	0,149	3,715	0,1290	0,0155	0,1445	3,1340
52	8158,62	0,036261	0,138	3,467	0,1204	0,0144	0,1348	2,3528
54	9164,13	0,040729	0,127	3,170	0,1101	0,0132	0,1233	3,0194
56	10291,41	0,045740	0,117	2,932	0,1018	0,0122	0,1140	2,6116
58	11555,22	0,051357	0,108	2,716	0,0943	0,0113	0,1056	2,2512
60	12972,08	0,057654	0,100	2,497	0,0867	0,0104	0,0971	2,9807
62	14560,53	0,064713	0,092	2,306	0,0801	0,0096	0,0897	2,5895
64	16341,35	0,072628	0,084	2,124	0,0738	0,0089	0,0826	1,6949
66	18337,85	0,081502	0,078	1,944	0,0675	0,0081	0,0756	3,1746
68	20576,14	0,091450	0,071	1,781	0,0618	0,0074	0,0693	2,5106
70	23085,50	0,102602	0,065	1,633	0,0567	0,0068	0,0635	2,3532
72	25898,76	0,115106	0,060	1,510	0,0524	0,0063	0,0587	2,1760
74	29052,72	0,129123	0,055	1,381	0,0480	0,0058	0,0537	2,4103
76	32588,66	0,144838	0,050	1,270	0,0441	0,0053	0,0494	1,2373
78	36552,82	0,162457	0,046	1,155	0,0401	0,0048	0,0449	2,4119
80	40997,07	0,182209	0,042	1,051	0,0365	0,0044	0,0409	2,7593
82	45979,56	0,204354	0,038	0,961	0,0334	0,0040	0,0374	1,6798
84	51565,46	0,229180	0,035	0,878	0,0305	0,0037	0,0341	2,5057
86	57827,85	0,257013	0,032	0,800	0,0278	0,0033	0,0311	2,8571
88	64848,66	0,288216	0,029	0,729	0,0253	0,0030	0,0284	2,2928
90	72719,74	0,323199	0,027	0,679	0,0236	0,0028	0,0264	2,2512
92	81544,07	0,362418	0,024	0,603	0,0209	0,0025	0,0235	2,3454
94	91437,09	0,406387	0,022	0,551	0,0191	0,0023	0,0214	2,6705
96	102528,22	0,455681	0,020	0,512	0,0178	0,0021	0,0199	0,4464
98	114962,58	0,510945	0,018	0,492	0,0171	0,0021	0,0191	5,9233
100	128902,82	0,572901	0,017	0,421	0,0146	0,0018	0,0164	3,8344
Margen de confianza =								2,6376

Tabla B.2. Resultados primer escenario, R = 18 slots.

Resultados primer escenario $R=24$ slots.

U	Modelo Analítico			Simulador				Desviación [%]
	Ez [slots]	Ez [s]	Thr [%]	Thr [Mbps]	Thr_MAC [%]	HeaderMAC [%]	Thr_PHY [%]	
12	574,67	0,002554	0,444	10,710	0,3719	0,0446	0,4165	6,6026
14	638,52	0,002838	0,467	11,101	0,3855	0,0463	0,4317	8,1756
16	708,05	0,003147	0,481	11,296	0,3922	0,0471	0,4393	9,4951
18	783,75	0,003483	0,489	11,603	0,4029	0,0483	0,4512	8,3710
20	866,18	0,003850	0,491	12,004	0,4168	0,0500	0,4668	5,1792
22	955,93	0,004249	0,490	12,403	0,4307	0,0517	0,4823	1,5883
24	1053,65	0,004683	0,485	12,270	0,4260	0,0511	0,4772	1,6416
26	1160,06	0,005156	0,477	12,106	0,4203	0,0504	0,4708	1,3193
28	1275,92	0,005671	0,467	11,846	0,4113	0,0494	0,4607	1,3724
30	1402,08	0,006231	0,455	11,533	0,4005	0,0481	0,4485	1,4480
32	1539,44	0,006842	0,442	11,248	0,3906	0,0469	0,4374	1,0465
34	1689,01	0,007507	0,428	10,840	0,3764	0,0452	0,4216	1,5287
36	1851,87	0,008231	0,414	10,512	0,3650	0,0438	0,4088	1,2720
38	2029,19	0,009019	0,399	10,116	0,3513	0,0422	0,3934	1,4235
40	2222,28	0,009877	0,383	9,747	0,3384	0,0406	0,3791	1,0421
42	2432,51	0,010811	0,367	9,305	0,3231	0,0388	0,3619	1,4201
44	2661,43	0,011829	0,352	8,948	0,3107	0,0373	0,3480	1,1559
46	2910,68	0,012936	0,336	8,515	0,2957	0,0355	0,3311	1,4680
48	3182,08	0,014143	0,321	8,173	0,2838	0,0341	0,3178	0,9946
50	3477,59	0,015456	0,306	7,756	0,2693	0,0323	0,3016	1,4514
52	3799,36	0,016886	0,291	7,396	0,2568	0,0308	0,2876	1,1744
54	4149,71	0,018443	0,277	7,003	0,2432	0,0292	0,2723	1,7115
56	4531,20	0,020139	0,263	6,648	0,2308	0,0277	0,2585	1,7277
58	4946,57	0,021985	0,250	6,326	0,2197	0,0264	0,2460	1,6214
60	5398,85	0,023995	0,237	5,993	0,2081	0,0250	0,2331	1,6901
62	5891,32	0,026184	0,224	5,670	0,1969	0,0236	0,2205	1,5873
64	6427,54	0,028567	0,212	5,367	0,1864	0,0224	0,2087	1,5731
66	7011,40	0,031162	0,200	5,067	0,1759	0,0211	0,1971	1,4971
68	7647,13	0,033987	0,189	4,782	0,1660	0,0199	0,1860	1,6311
70	8339,35	0,037064	0,179	4,530	0,1573	0,0189	0,1762	1,6083
72	9093,07	0,040414	0,169	4,276	0,1485	0,0178	0,1663	1,6304
74	9913,76	0,044061	0,159	4,033	0,1400	0,0168	0,1568	1,3779
76	10807,36	0,048033	0,150	3,806	0,1322	0,0159	0,1480	1,3437
78	11780,35	0,052357	0,141	3,578	0,1242	0,0149	0,1391	1,3335
80	12839,79	0,057066	0,133	3,371	0,1170	0,0140	0,1311	1,4536
82	13993,36	0,062193	0,125	3,165	0,1099	0,0132	0,1231	1,5572
84	15249,42	0,067775	0,117	2,962	0,1028	0,0123	0,1152	1,5723
86	16617,08	0,073854	0,110	2,791	0,0969	0,0116	0,1085	1,3462
88	18106,25	0,080472	0,103	2,621	0,0910	0,0109	0,1019	1,0519
90	19727,73	0,087679	0,097	2,455	0,0852	0,0102	0,0955	1,6002
92	21493,27	0,095526	0,091	2,324	0,0807	0,0097	0,0904	0,6885
94	23415,67	0,104070	0,085	2,158	0,0749	0,0090	0,0839	1,2843
96	25508,88	0,113373	0,080	2,030	0,0705	0,0085	0,0789	1,3371
98	27788,05	0,123502	0,075	1,892	0,0657	0,0079	0,0736	1,9330
100	30269,73	0,134532	0,070	1,777	0,0617	0,0074	0,0691	1,2943
Margen de confianza =								2,1027

Tabla B.3. Resultados primer escenario, R = 24 slots.

Resultados primer escenario $R=30$ slots.

U	Modelo Analítico			Simulador				Desviación [%]
	Ez [slots]	Ez [s]	Thr [%]	Thr [Mbps]	Thr_MAC [%]	HeaderMAC [%]	Thr_PHY [%]	
12	509,38	0,002264	0,495	10,818	0,3756	0,0451	0,4207	17,6610
14	555,22	0,002468	0,530	10,999	0,3819	0,0458	0,4277	23,9074
16	604,28	0,002686	0,556	11,118	0,3860	0,0463	0,4324	28,5946
18	656,77	0,002919	0,576	11,376	0,3950	0,0474	0,4424	30,1989
20	712,95	0,003169	0,589	11,877	0,4124	0,0495	0,4619	27,5214
22	773,07	0,003436	0,598	12,690	0,4406	0,0529	0,4935	21,1753
24	837,4	0,003722	0,602	13,570	0,4712	0,0565	0,5277	14,0752
26	906,25	0,004028	0,602	14,420	0,5007	0,0601	0,5608	7,3509
28	979,93	0,004355	0,600	15,214	0,5283	0,0634	0,5917	1,4104
30	1058,78	0,004706	0,595	15,282	0,5306	0,0637	0,5943	0,1178
32	1143,16	0,005081	0,588	15,102	0,5244	0,0629	0,5873	0,1192
34	1233,46	0,005482	0,579	14,927	0,5183	0,0622	0,5805	0,2574
36	1330,1	0,005912	0,568	14,614	0,5074	0,0609	0,5683	0,0567
38	1433,51	0,006371	0,557	14,283	0,4959	0,0595	0,5555	0,2791
40	1544,18	0,006863	0,544	13,955	0,4845	0,0581	0,5427	0,2406
42	1662,62	0,007389	0,530	13,629	0,4732	0,0568	0,5300	0,0031
44	1789,36	0,007953	0,516	13,270	0,4608	0,0553	0,5161	0,0108
46	1924,99	0,008556	0,502	12,922	0,4487	0,0538	0,5025	0,1039
48	2070,14	0,009201	0,487	12,512	0,4344	0,0521	0,4866	0,0868
50	2225,47	0,009891	0,472	12,091	0,4198	0,0504	0,4702	0,3816
52	2391,7	0,010630	0,457	11,750	0,4080	0,0490	0,4569	0,0122
54	2569,6	0,011420	0,441	11,319	0,3930	0,0472	0,4402	0,1855
56	2759,97	0,012267	0,426	10,934	0,3797	0,0456	0,4252	0,1855
58	2963,69	0,013172	0,411	10,559	0,3666	0,0440	0,4106	0,0906
60	3181,71	0,014141	0,396	10,166	0,3530	0,0424	0,3953	0,1658
62	3415,03	0,015178	0,381	9,822	0,3410	0,0409	0,3820	0,2531
64	3664,71	0,016288	0,367	9,429	0,3274	0,0393	0,3667	0,0864
66	3931,91	0,017475	0,353	9,077	0,3152	0,0378	0,3530	0,0016
68	4217,85	0,018746	0,339	8,687	0,3016	0,0362	0,3378	0,3470
70	4523,85	0,020106	0,325	8,383	0,2911	0,0349	0,3260	0,3084
72	4851,32	0,021561	0,312	7,992	0,2775	0,0333	0,3108	0,3861
74	5201,77	0,023119	0,299	7,675	0,2665	0,0320	0,2985	0,1768
76	5576,8	0,024786	0,286	7,370	0,2559	0,0307	0,2866	0,2132
78	5978,14	0,026570	0,274	7,050	0,2448	0,0294	0,2742	0,0608
80	6407,64	0,028478	0,262	6,736	0,2339	0,0281	0,2620	0,0170
82	6867,26	0,030521	0,251	6,436	0,2235	0,0268	0,2503	0,2841
84	7359,14	0,032707	0,240	6,155	0,2137	0,0256	0,2394	0,2669
86	7885,52	0,035047	0,229	5,848	0,2031	0,0244	0,2274	0,6938
88	8448,82	0,037550	0,219	5,627	0,1954	0,0234	0,2188	0,0787
90	9051,65	0,040230	0,209	5,381	0,1868	0,0224	0,2093	0,1248
92	9696,77	0,043097	0,199	5,121	0,1778	0,0213	0,1992	0,0753
94	10387,14	0,046165	0,190	4,883	0,1695	0,0203	0,1899	0,0556
96	11125,95	0,049449	0,181	4,661	0,1618	0,0194	0,1813	0,1441
98	11916,59	0,052963	0,173	4,420	0,1535	0,0184	0,1719	0,6464
100	12762,69	0,056723	0,165	4,212	0,1463	0,0176	0,1638	0,7326
Margen de confianza =								3,9810

Tabla B.4. Resultados primer escenario, R = 30 slots