



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN
INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA

**ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE
LAS REDES WIMAX MÓVILES BASADOS EN
UN MODELO TEÓRICO**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA

INGENIERÍA ELÉCTRICA- TELECOMUNICACIONES

P R E S E N T A :

ING. APOLO GONZÁLEZ VALDÉS

TUTOR:

DR. VÍCTOR RANGEL LICEA

2010



JURADO ASIGNADO

Presidente: Dr. Gómez Castellanos Javier

Secretario: Dr. Castrejon Gutiérrez Ramón

Vocal: Dr. Rangel Licea Víctor

1er Suplente: Dr. Moctezuma Flores Miguel

2do Suplente: Dr. García Garduño Víctor

Ciudad Universitaria, México D.F.

Víctor Rangel Licea

Dedicatorias

A Dios

Por permitirme llegar hasta este momento y otorgarme el regalo mas preciado la vida....

A mis padres

Apolo González Laguna y Teresa Valdés Ortega gracias a ustedes soy quien soy hoy en día, fueron los que me llenaron de cariño y amor en los momentos mas difíciles, los que con regaños y castigos me corrigieron en el trayecto de mi formación de la cual estoy muy agradecido, los que han velado por mi salud, mis estudios, mi alimentación, entre otras cosa desde que era un niño. Son a ustedes papis, mis más grandes amigos a quienes les debo todo y este trabajo es sólo una pequeña forma de agradecerles.

A mis hermanas

Lizeth, mi hermanita la más grande, la que ha sabido llevar la batuta de hermana mayor, de carácter fuerte pero que me ha dado un apoyo inigualable. Prácticamente hemos vivido las mismas historias de desaliento y alegría. Y claro, a mi hermanita Arely la más pequeña que siempre está ayudándome en todas mis locuras. Les agradezco mucho a las dos porque siempre me han mostrado un amor inigualable. Las quiero mucho.

A mi sobrinito

Carlos Martínez González, tu llegada es una bendición que vino a llenar de más alegría nuestra casa, esperaré con ansias el día que ingreses a la UNAM.

A mi cuñado

Carlos Martínez que ha sido como un hermano para mí, siempre atento y ayudando a mis papás cuando yo no podía hacerlo por cuestiones escolares. Gracias Carlos.

A mis abuelitos

Gabino González Peña no sabes cuanto te quiero abuelito, aunque estuviste poco tiempo con nosotros sentí cuánto nos querías, te hecho de menos. A mi abuelito José Isabel Valdés Osorno que estoy seguro que se sentiría orgulloso de mí. A mis abuelitas Ofelia Ortega Peña y Catalina Laguna por su cariño y cuidados que me han dado.

A mis grandes amigos

Que han sido como mi segunda familia, ellos hicieron mi vida más amena en la Universidad, con los que pasé experiencias únicas desde desveladas, sufrimientos, alegrías, diversión, etc. Nazul Valencia, Valeria Celeste Castañeda, Óscar Nepomuceno, Luis Salvador Hernández, Luis Felipe Flores, Gerardo González, Nilton, José Roberto García, Alejandro Baeza, Ponce Casanova, Luis Daniel, Luis Enrique, Arturo, Memo, Francisco Curiel, etcétera. Sé que sin su apoyo y compañía estos años

no hubiesen sido los mismos. Y aunque ya no estamos tan juntos como antes, siempre estarán en mi corazón.

A Ann Margareth Meza

Por compartir momentos de tu vida conmigo, por tu apoyo incondicional y en especial por quererme tanto.

A mis tíos

Roberto Santiago Jiménez Laguna e Irma Nieves Morales por proporcionarme la herramienta para salir adelante.

Agradecimientos

A la Universidad Nacional Autónoma de México

Por darme la oportunidad de ser un integrante de ella, de aprender y de formarme no sólo como profesionista sino también como persona.

A mi tutor Dr. Víctor Rangel Licea

Por la enseñanza y paciencia en la realización de esta tesis

A la DGAPA-UNAM,

Por el apoyo recibido por parte de los proyectos de investigación PAPIIT No. IN108910 “Diseño de Algoritmos de reservación de capa cruzada en redes móviles y mesh de banda ancha” y IN104907 “Diseño de técnicas de mejoramiento de capacidad en redes inalámbricas de banda ancha tipo mesh”

A PAPIME

Por el apoyo recibido del proyecto PAPIME PE103807 “Integración de nuevas tecnologías y elaboración de material didáctico para un laboratorio de redes en la facultad de ingeniería”

A CONACYT

Por el apoyo recibido del proyecto CONACYT 105279 “Diseño de técnicas de reservación de capacidad de redes BWA móviles”

Índice

Capítulo 1	11
1.1 Introducción	12
1.2 Definición del problema.....	13
1.3 Objetivo	13
1.4 Contribuciones	14
1.5 Estructura de la tesis.....	15
Capítulo 2	16
2.1 Introducción	17
2.1.1 LMDS (<i>Local Multipoint Distribution Services</i>)	22
2.1.2 MMDS (<i>Multichannel Multipoint Distribution Services</i>)	22
2.2 Estándares Inalámbricos de Banda Ancha	23
2.2.1 WPAN (<i>Wireless Personal Area Network</i>)	23
IEEE 802.15	23
2.2.2 WLAN (<i>Wireless Local Area Network</i>).....	23
IEEE 802.11	23
2.2.3 WMAN (<i>Wireless Metropolitan Area Network</i>)	23
IEEE 802.16	23
2.2.4 WAN (<i>Wide Area Network</i>)	24
2.3 Arquitectura de las redes BWA.....	25
2.4 WiMAX Forum.....	26
2.5 Certificación.....	27
2.5.1 Interoperabilidad.....	27
2.5.2 Conformidad.....	27
Capítulo 3	28
3.1 Introducción	29
3.2 Versiones del protocolo IEEE 802.16	29
3.3 Topologías del estándar IEEE 802.16	30
3.3.1 Topología punto multipunto PMP	30
3.3.2 Topología <i>Mesh</i>	31
3.4 Capa MAC	31
3.4.1 Encabezado de la capa MAC.....	33
3.4.1.1 Encabezado genérico	33
3.4.1.2 Encabezado de solicitud de ancho de banda	34
3.5 Fragmentación, concatenación y empaquetamiento	35
3.6 Paquetes de control MAC	36
3.6.1 Mensaje descriptor de canal descendente (DCD).....	36
3.6.2 Mensaje de mapa descendente (DL-MAP).....	36
3.6.3 Mensaje descriptor del canal ascendente (UCD).....	37
3.6.4 Mensaje de mapa ascendente (UL-MAP).....	37
3.6.5 Mensaje de solicitud de ranging (RNG-REQ) y respuesta de ranging (RNG-RSP)	38
3.6.6 Mensaje de Solicitud de Registro (REG-REQ) y Respuesta de Registro (REG-RSP)	39
3.7 Servicios de programación de transmisión ascendente.....	40
3.8 Solicitud y asignación de ancho de banda.....	41
3.9 Resolución de colisiones	42
3.10 Modelo Analítico	43
3.10.1 Describiendo la estrategia.....	43
3.10.2 Calculando el Retardo de Contención \bar{C}	46

3.10.2.1 Integrando y generalizando el modelo para el retardo de contención	49
3.10.3 Calculando el retardo de espera \bar{W}	52
Capítulo 4	53
4.2 Panorama general de OFDM	55
4.2.1 Análisis de OFDMA en el dominio del tiempo	56
4.2.2 Análisis de OFDMA en el dominio de la frecuencia	57
4.3 Slots OFDMA y regiones de datos	58
4.4 Transmisión de Datos en la Capa PHY	59
Randomizer	60
Codificador FEC	60
Interleaver	60
Modulación	60
4.5 Cálculo de los parámetros de OFDMA	61
4.6 Parámetros del canal Uplink	64
4.7 Canal de calibración (Ranging)	64
4.8 Códigos CDMA	65
4.9 Slot de contención	66
4.10 Describiendo la estrategia para calcular la eficiencia de una red WiMAX	66
Capítulo 5	71
5.1 Resultados para Single Carrier	72
5.1.1 Análisis y resultados con paquetes de tamaño fijo 300 Bytes y frames de 2 milisegundos	72
5.1.2 Análisis y resultados con paquetes de tamaño variable y frames de 2 milisegundos	78
5.1.3 Análisis y resultados con paquetes de tamaño variable y frames de 1 milisegundo	82
5.2 Resultados para WirelessMAN OFDMA	85
5.2.1 Throughput para un paquete VoIP G711 con 64QAM3/4	85
5.2.2 Throughput para un paquete VoIP G711 con 64QAM2/3	90
5.2.3 Throughput para un paquete VoIP G711 con 16QAM3/4	91
5.2.4 Throughput para un paquete VoIP G711 con 16QAM1/2	92
5.2.5 Throughput para un paquete VoIP G711 con QPSK3/4	93
5.2.6 Throughput para un paquete VoIP G711 con QPSK1/2	94
5.2.7 Análisis de todos los resultados	95
5.2.8 Eficiencia del Sistema	96
Glosario	100
Bibliografía	105
Apéndice A	108
Apéndice B	109
Apéndice C	110

Lista de figuras

Tabla 2. 1. Evolución de las redes inalámbricas.....	19
Tabla 2. 2. Principales documentos publicados de la IEEE 802.16.....	20
Tabla 2. 3. Miembros del Foro <i>WiMAX</i>	26
Figura 3. 1 Topología punto multipunto.....	30
Figura 3. 2 Topología <i>Mesh</i>	31
Figura 3. 3 Subdivisión de la capa MAC.....	32
Figura 3. 4 Formato del <i>frame</i> MAC.....	33
Figura 3. 5 Encabezado genérico.....	33
Figura 3. 6 Encabezado de solicitud de ancho de banda.....	34
Figura 3. 7 Mensajes entre la BS y SS.....	39
Figura 3. 8 Componentes de retardo en.....	43
Figura 4. 1. Eficiencia espectral de OFDM respecto de FDM.....	55
Figura 4. 2. Superposición de sub-portadoras en OFDM.....	55
Figura 4. 3. Representación de los símbolos OFDM en el dominio tiempo- frecuencia.....	56
Figura 4. 4. Estructura del símbolo OFDMA en el dominio del tiempo.....	57
Figura 4. 5. Estructura del símbolo OFDMA en el dominio de la frecuencia.....	57
Figura 4.6. <i>Slot</i> OFDMA.....	58
Figura 4. 7. Estructura de un <i>frame</i> OFDMA.....	58
Figura 4. 8. Etapas de codificación en la transmisión de datos en capa PHY basada en OFDMA.....	59
Figura 4. 9. Constelaciones de modulación BPSK, QPSK, 16QAM y 64QAM.....	61
Figura 4. 10. Tiempos del símbolo OFDMA.....	62
Figura 4. 11. Diagrama de un <i>frame</i>	63
Figura 5. 1 Capacidad del canal <i>Uplink</i> con $c=30$ para un <i>subframe</i> 2 ms.....	74
Figura 5. 2 Capacidad del canal <i>Uplink</i> con $c=51$ para un <i>subframe</i> 2 ms.....	74
Figura 5. 3 Capacidad del canal <i>Uplink</i> con $c=72$ para un <i>subframe</i> 2 ms.....	75
Figura 5. 4 Desviación Estándar.....	75
Figura 5. 5 Retardo para un <i>subframe</i> de 2 ms.....	76
Figura 5. 6 Capacidad del canal <i>Uplink</i> con $c=30$ variando el tamaño del paquete.....	79
Figura 5. 7 Capacidad del canal <i>Uplink</i> con $c=51$ variando el tamaño del paquete.....	80
Figura 5. 8 Capacidad del canal <i>Uplink</i> con $c=30$ variando el tamaño del paquete.....	80
Figura 5. 9 Retardo en <i>slots</i> y milisegundos.....	81
Figura 5. 10 Capacidad del canal <i>Uplink</i> con $c=30$ variando el tamaño del paquete.....	82
Figura 5. 11 Capacidad del canal <i>Uplink</i> con $c=51$ variando el tamaño del paquete.....	83
Figura 5. 12 Capacidad del canal <i>Uplink</i> con $c=30$ variando el tamaño del paquete.....	83
Figura 5. 13 retardo en <i>slots</i> y milisegundo.....	84
Figura 5. 14 Grafica del <i>Throughput</i> para un paquete VoIP usando 64QAM3/4.....	88
Figura 5. 15 Grafica del <i>Throughput</i> para un paquete VoIP usando 64QAM2/3.....	90
Figura 5. 16 Grafica del <i>Throughput</i> para un paquete VoIP usando 16QAM3/4.....	91
Figura 5. 17 Grafica del <i>Throughput</i> para un paquete VoIP usando 16QAM1/2.....	92
Figura 5. 18 Grafica del <i>Throughput</i> para un paquete VoIP usando QPSK3/4.....	93
Figura 5. 19 Grafica del <i>Throughput</i> para un paquete VoIP usando QPSK1/2.....	94
Figura 5. 20 Grafica del <i>Throughput</i> para todas las modulaciones.....	95
Figura 5. 21 Desviación estándar del modelo matemático y la forma analítica.....	96
Figura 5. 22 Eficiencia para el canal <i>Uplink</i> con diferentes modulación y codificaciones.....	96

Lista de tablas

Tabla 2. 1 Evolución de las redes inalámbricas	19
Tabla 2. 2 Miembros del Foro <i>WiMAX</i>	26
Tabla 3. 1 Características de las versiones del estándar IEEE 802.16	29
Tabla 3. 2 Tipos de IEs de los mensajes de control de UL-MA	38
Tabla 3. 3 Componentes que forma el retardo en la transmisión de un solo paquete.	44
Tabla 3. 4 Notación completa de elementos componentes de nuestro modelo matemático	45
Tabla 4. 1 Características de perfil de capa PHY para un canal de 20 MHz	64
Tabla 5. 1 Parámetros de configuración para la simulación	73
Tabla 5. 2 Eficiencia Normalizada del Sistema con paquetes fijos de 300Bytes y <i>frames</i> de 2 milisegundos	77
Tabla 5. 3 Retardo en <i>slots</i> y milisegundos de una red <i>WiMAX</i> , manteniendo el tamaño del paquete en 300Bytes y variando los <i>slots</i> de contención	78
Tabla 5. 4 Cálculo de los símbolos redondeando y sin redondear expresión 43	85
Tabla 5. 5 Numero maximo de usuarios para paquetes	86
Tabla 5. 6 Muestra los resultados teoricos como analíticos de 64QAM3/4.....	89
Tabla 5. 7 Cálculos para 64QAM2/3 con y sin cuantificar	90
Tabla 5. 8 Cálculos para 16QAM3/4 con y sin cuantificar	91
Tabla 5. 9 Cálculos para 16QAM1/2 con y sin cuantificar	92
Tabla 5. 10 Cálculos para QPSK3/4 con y sin cuantificar	93
Tabla 5. 11 Cálculos para QPSK1/2 con y sin cuantificar	94



Capítulo 1

1. 1 Introducción

Los BWA se han convertido en una opción para satisfacer el acceso a Internet de alta velocidad para particulares y pequeñas empresas, porque no se requiere de una fuerte inversión para su implementación y es de fácil expansión en comparación con las redes que necesitan de una infraestructura. Por otro lado son sencillos de actualizar y su mantenimiento no es complejo. A partir de todas estas características se prevé un buen futuro en el uso de estas tecnologías [27].

La tecnología *WiMAX* cumple con las características mencionadas en el párrafo anterior. Su primera versión (fija) apareció en abril de 2001 [20] que fue orientado a usuarios inalámbricos fijos con línea de vista (LOS) y con un rango de 11 a 66 GHz. A partir de ésta se hicieron mejoras y adaptaciones que han sido consideradas como nuevas versiones dentro del mismo grupo de estándares. La versión del 2004[21] tenía como principales características la comunicación sin línea de vista (NLOS), la adaptación de la topología *Mesh*, la modulación OFDM y puede contener 256 subportadoras, las cuales disminuyen considerablemente los efectos de atenuación causados por la multitrayectoria.

A partir de la última versión fija (2004), el IEEE802.16e empezó a trabajar para tener una versión móvil que fue creada en 2005[22], la cual soporta velocidades de hasta 120Km/h de las SSs y utiliza OFDMA para la transmisión de datos. La versión más actual es la 2009[23] donde los errores de conceptos que presentaba la anterior fueron corregidos. Sin embargo, la movilidad introduce muchos problemas técnicos como: transferir un usuario de una BS a otra BS (*handoff*), la multitrayectoria y el número de usuarios que puede soportar.

Como se acaba de mencionar, el estándar IEEE 802.16 es capaz de proveer acceso inalámbrico fijo y móvil. La gran demanda de nuevos servicios de información como aplicaciones sobre la red (FTP, e-mail), de telefonía sobre el protocolo IP (VoIP), de audio (MPEG2) y de videoconferencia, han motivado a la industria y a las instituciones de investigación a extender y mejorar sus redes de comunicaciones, con el fin de desarrollar nuevos protocolos que puedan soportar eficientemente tales aplicaciones e impulsar el desarrollo de las tecnologías inalámbricas, como es el caso de la tecnología *WiMAX*.

La UNAM (Facultad de Ingeniería) es de las pocas instituciones educativas públicas de Latinoamérica que se han preocupado por el desarrollo de esta tecnología. Su participación ha sido constante debido a las ponencias que se han realizado en congresos de la IEEE y en la publicación de artículos como los de las referencias [5,6,7,8,9,10].

El estudio que se hace en esta tesis pretende dar opiniones técnicas por medio de un modelo matemático teórico sobre la eficiencia de la red, el número máximo de usuarios que soporta, el retardo, entre otras características, con la finalidad de hacer la versión móvil más eficiente.

1.2 Definición del problema

Las redes inalámbricas han tenido un gran avance en los últimos años y las posibilidades de que mejoren crecen día a día. La tendencia nos indica que pueden llegar a transmitir grandes cantidades de información a mayores velocidades y que su implementación pueda ser segura, fiable y rentable [24].

En esta medida, la importancia de tener modelos teóricos para la simulación de redes inalámbricas es de gran importancia, ya que éstos pueden indicar cómo podría comportarse una red inalámbrica, qué tipo de servicios puede soportar, la cantidad de usuarios, el retardo máximo, el *throughput*, etcétera.

En general, los modelos teóricos nos pueden dar un aspecto más detallado del comportamiento dinámico de las redes inalámbricas. La mayoría de las licencias de los simuladores para estas redes son costosas; otro problema que tienen es su complejidad, debido al código de programación.

El problema de los simuladores reside en que contienen muchas líneas de código, lo cual dificulta su manejo y comprensión. Cuando se trabaja en estudios detallados es necesario modificar una parte de éste, pero surge un problema: se ven afectados otros módulos que deben de ser detectados para agregar o en su defecto quitar información.

1.3 Objetivo

El objetivo primordial de este trabajo consiste en mejorar el proyecto de tesis que presentó el Maestro Javier Chapa López para obtener el grado de Maestro con el trabajo *Análisis del Comportamiento Dinámico de Redes Inalámbricas de Banda Ancha Fijas Basadas en el Estándar IEEE 802.16* [12].

Cabe mencionar que él publicó un artículo con el nombre de “*Performance Analysis of Best Effort Support in Broadband IEEE 802.16 Networks*” [29], presentado en *IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering 2009 – Communications and Networking*, que está basado en su proyecto de maestría. En esta publicación la IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) le hace algunas observaciones que no consideró en su proyecto.

Las observaciones fueron las siguientes: no tomó en cuenta el algoritmo EBA (*Exponential Backoff Algorithm*) que ya era utilizado en ese entonces para resolver colisiones, por lo tanto presenta un rezago tecnológico. Al no emplearlo su proyecto presenta una gran deficiencia, ya que actualmente la mayoría de las redes usan algún algoritmo que resuelven este tipo de problemas.

De acuerdo con lo anterior, se adaptará el EBA para que el modelo matemático esté completo y sea competente contra el simulador *Opnet Modeler* bajo determinadas situaciones. La otra meta consiste en adaptar este mismo modelo matemático para la versión móvil de *WiMAX* basado en OFDMA.

1.4 Contribuciones

Debido a lo difícil del proyecto, la investigación hecha en este trabajo contribuirá a la optimización de control de acceso al medio para las SSs, empleando el algoritmo EBA. Esto con el fin de mejorar el desempeño y la calidad de servicio de una red que esté basada en el estándar IEEE 802.16, tanto para la versión fija como para la versión móvil.

Al día de hoy hay muy pocas publicaciones y avances que estén relacionados con el manejo de las colisiones en los *slots* de contención en redes inalámbricas basadas en el estándar IEEE 802.16. Por esta razón, la presente tesis tiene relevancia ya que hace un estudio muy detallado de cuando se varían los *slots* de contención y el tamaño del paquete a transmitir, además de las consecuencias que esto conlleva.

Los resultados de este trabajo con respecto al tema del manejo de colisiones que presentan los usuarios al acceder al medio inalámbrico usando el algoritmo EBA para una red IEEE 802.16 deberán difundirse en la publicación de un *IEEE Journal*¹. Con la finalidad de que los resultados sean un referente, y otros investigadores puedan presentar otras mejoras.

¹ *IEEE Journal*. Publicación técnico-académica publicada por la IEEE que se enfocan a un cierto tema en particular. Son escritos en lenguaje académico y pueden ser arbitrados, lo cual significa que un comité de expertos en la disciplina ha leído el artículo y han determinado que tiene valor y es digno de ser publicado. Los *Journals* arbitrados son considerados de muy buena reputación.

Por consiguiente, se pretende que la Facultad de Ingeniería continúe como miembro activo del *WiMAX Development Consortium de OPNET Technologies, Inc.*, ya que el desarrollo de este tipo de trabajos permiten seguir proyectando a la Universidad Nacional Autónoma de México internacionalmente, porque es una institución que se dedica a la investigación y por lo tanto, se encuentra a la vanguardia en trabajos tecnológicos.

1.5 Estructura de la tesis

Capítulo 2: Se hace una descripción general sobre los sistemas de comunicación inalámbricos y la clasificación de estos de acuerdo a su región de cobertura. Por último, una breve reseña acerca de los sistemas de comunicación de banda ancha (BWA), así como la forma en que se pueden configurar los diferentes tipos de topología, pero se hace un especial énfasis en *WiMAX*.

Capítulo 3: Describe las principales características de la capa física y de la capa MAC del estándar IEEE 802.16. Se incluye la descripción del algoritmo de resolución de colisiones (EBA) y el planteamiento detallado del modelo matemático basado en ecuación en diferencias para la capa física *single carrier* que se ha desarrollado en este trabajo implementando el EBA.

Capítulo 4: Se hacen definiciones de algunos parámetros de OFDMA como son: los *QuantumMaps*, los *slots* OFDMA, los símbolos, los símbolos OFMDA, entre otros. Todo con el propósito de obtener el modelo matemático basado en ecuaciones en diferencias para la versión móvil de *WiMAX*.

Capítulo 5: Se presentan los resultados de los modelos matemáticos que se obtuvieron en los capítulos anteriores para las dos versiones de *WiMAX* (fija y móvil). El resultado de la primera versión se comparó con los que presenta el simulador *Opnet*, mientras que el de la segunda versión, se cotejó con los resultados obtenidos mediante la forma simple.



Capítulo 2

Redes Inalámbricas de Banda Ancha

2.1 Introducción

Las tecnologías inalámbricas han ganado una aceptación extensa y en los últimos años han tenido un gran desarrollo. El éxito de las redes inalámbricas es porque proporcionan “redes instantáneas” en zonas donde se carece de infraestructura de cobre o de fibra. Actualmente se cuentan con redes inalámbricas BWA que son capaces de transmitir una gran cantidad de datos en el orden de los Mbits, pero para llegar a este punto primero se empezó con las tecnologías celulares llamadas de primera generación. A continuación se hará una breve descripción histórica de todas éstas, hasta llegar a los sistemas BWA.

Primera Generación 1G

En la década de 1970, los Laboratorios Bell propusieron el concepto celular, pero es hasta el año de 1979 que hace su aparición la telefonía móvil o también llamada 1G. Su principal característica es que era analógica, ya que enviaba la información sobre ondas cuya forma variaban de forma continua; sólo se podía transmitir voz y tenía una calidad de llamada altamente inestable debido a la interferencia. Otra desventaja importante era la baja seguridad que proporcionaba, ya que era fácil escuchar llamadas ajenas a través de un sintonizador de radio, además se podía dar la usurpación de frecuencia que permitía cargar las llamadas a un tercero. La tecnología predominante de esta generación es AMPS (*Advanced Mobile Phone System*). El estándar 1G AMPS fue muy popular en los EE.UU.

Segunda Generación 2G

La telefonía móvil 2G llegó aproximadamente en el año de 1990 y marcó el cambio de protocolos de telefonía móvil analógica a digital. No es un estándar sino protocolos que se derivaron de la necesidad de tener un mayor manejo de llamadas en prácticamente los mismos espectros de radiofrecuencia asignados a la telefonía móvil 1G.

Además, permitía integrar otros servicios como el envío de mensajes de texto (SMS, *Short Message Service*) y una mayor capacidad de envío de datos desde dispositivos de fax y modem. 2G abarca varios protocolos desarrollados por diversas compañías que presentaban incompatibilidad entre sí, por lo tanto limitaba el área de uso de los teléfonos móviles.

Protocolos de telefonía 2G:

GSM (*Global System por Mobile Communications*)

TDMA Celular PCS o IS-136 (conocido también como TIA/EIA136 o ANSI-136)

Sistema regulado por la *Telecommunications Industry Association* o TIA

CDMA (*Code Division Multiple Access*)

D-AMPS (*Digital Advanced Mobile Phone System*)

PHS (*Personal Handyphon System*). Sistema usado en un principio en Japón por la compañía NTT DoCoMo, con la finalidad de tener un estándar enfocado más a la transferencia de datos que al resto de los estándares 2G.

Generación 2.5G

Reciben este nombre algunos teléfonos móviles 2G que incorporan algunas de las mejoras y tecnologías del estándar 3G como es el caso de: GPRS (*General packet radio service*), EDGE (*Enhanced Data Rates for Global Evolution*) y HSCSD (*High Speed Circuit Switched Data*). Además, sus tasas de transferencia de datos son superiores a los teléfonos 2G regulares pero inferiores a los 3G.

Tercera Generación 3G

La 3G básicamente es la convergencia de la voz y datos con acceso inalámbrico a Internet, soportando aplicaciones multimedia como MP3, MPEG, entre otras. Las redes 3G empezaron a operar en el 2001 en Japón; en el 2002, en otros países. Los sistemas 3G pueden alcanzar una velocidad de transmisión de datos de hasta 2Mbps y soportar una movilidad de hasta 120Km/h. Algunas tecnologías contendientes por la tercera generación son: UMTS (*Universal Mobile Telecommunications System*), CDMA2000, IMT2000.

Cuarta Generación 4G

Hasta el día de hoy no hay ninguna definición de la 4G, pero WWRF (*Wireless World Research Forum*) define a la 4G como una fusión de las tecnologías (*WiFi* y *WiMAX*) y de los protocolos que funcionen con Internet, con el fin de permitir el máximo rendimiento con la red inalámbrica más barata.

La tabla 2.1. Describe brevemente las generaciones de las tecnologías inalámbricas que han surgido desde sus inicios.

El acceso de banda ancha se da a partir de la generación celular 2.5 en adelante, y no sólo proporciona descargas rápidas de archivos *Web* o navegación veloz en Internet, sino que permite el desarrollo e implantación de aplicaciones multimedia como audio, video, juegos interactivos, videoconferencia en tiempo real, telefonía VoIP (*Voice over Internet Protocol*), entre otras. Como el mercado de banda ancha continua creciendo, probablemente aparezcan nuevas y diversas aplicaciones, pero será difícil predecir cuál de ellas tendrá éxito.

Primera Generación	Segunda Generación	Generación 2.5G	Tercera Generación	Cuarta Generación
<p>Apareció en 1979</p> <p>Estrictamente para voz</p> <p>Tecnología celular analógica</p> <p>Sistemas macro-celulares</p> <p>Tecnología predominante AMPS</p>	<p>Apareció en 1990</p> <p>Voz digital y servicios de mensajería y datos</p> <p>Bucles inalámbricos local</p> <p>Tecnología celular digital</p> <p>Sistemas micro y pico-celulares, LAN</p> <p>Tecnología predominante son GSM(<i>Global Sytem for Mobile Communications</i>), IS-136, CDMA(<i>Code Division Multiple Access</i>) y PDC(<i>Personal Digital Communications</i>), este último en Japón</p>	<p>Muchos <i>carriers</i> se moverán a las redes 2.5G</p> <p>Las redes 2.5G ofrece capacidades adicionales como GPRS(<i>General Packet Radio System</i>), HSCSD(<i>High Speed Circuit Switched Dara</i>) entre otros</p>	<p>Audio y datos integrados de buena calidad</p> <p>Servicios multimedia de banda estrecha y banda ancha</p> <p>Mayor ancho de banda; radio-transmisión más eficiente LAN/WAM</p> <p>Integración en la administración de la red</p> <p>Alcanzan velocidades de hasta 384 Kbps y un máximo de 2 Mbps.</p>	<p>Tele-presentaciones</p> <p>Servicios de red unificados</p> <p>Operaciones basadas en el conocimiento de la red</p>

Tabla 2. 1. Evolución de las redes inalámbricas.

En la actualidad el acceso de banda ancha se ofrece a través de línea de abonado digital (DSL), fibra óptica, cable coaxial o inalámbrico. Este último recibe el nombre de acceso inalámbrico de banda ancha (*BWA*). A pesar de que DSL se ha desplegado a gran escala, presenta ciertas limitantes como: el costo del cable, el despliegue de la infraestructura, la escalabilidad, la actualización y el mantenimiento; por otro lado, la fibra óptica y el cable coaxial presentan las mismas limitantes que DSL.

Esto permite que los sistemas BWA y en especial *WiMAX* sean una solución para este tipo de limitantes, ya que no se necesita de mucha infraestructura para tener una red operable; el despliegue es resuelto con una cobertura de hasta 50km. La escalabilidad, la actualización y el mantenimiento es fácil de hacer.

Se especifica que: “El acceso inalámbrico de banda ancha, presenta uno de los más notables crecimientos en la historia de la industria de las telecomunicaciones en los recientes años. Los servicios inalámbricos móviles crecieron en el mundo de 11 millones de suscriptores en 1990, hasta 4 billones en 2008. Durante el mismo periodo se presentó el crecimiento de Internet; de ser una curiosa herramienta académica pasó a billones de usuarios. Este crecimiento es el impulsor de la demanda de servicios de acceso a Internet de alta velocidad, llevando consigo un incremento paralelo en la adopción de la banda ancha. En poco más de una década, el crecimiento de suscriptores de banda ancha a lo largo del mundo ha sido de cero hasta casi los 400 millones.”[24]

Las razones mencionadas anteriormente prevén que la curva de crecimiento de los sistemas BWA seguirá aumentando durante los próximos años.

En 1998, el Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE) formó un grupo al que nombró 802.16 para desarrollar un estándar llamado IEEE 802.16 o *WiMAX*, cuyo significado en español es Interoperabilidad mundial para acceso por microondas. Desde la primera versión del estándar (Abril del 2001) hasta nuestras fechas han existido actualizaciones y modificaciones, las más importantes se presentan en la tabla 2.1.

Nombre del Estándar	Fecha de Publicación	Características principales
802.16	Diciembre 2001	Frecuencias: 10 – 66GHz. Línea de vista Alcance de hasta 5Km Ancho de banda de 20, 25 y 28Mhz
802.16a	Enero 2003	Frecuencia de 2-11 GHz. Sin Línea de vista
802.16-2004	Octubre 2004	Revisión y consolidación oficial de los documentos anteriores Alcance de hasta 50 Km.
802.16e	Diciembre 2005	Movilidad Uso de OFDMA
802.16e	Mayo 2009	Revisión, corrección y consolidación oficial del documento anterior

Tabla 2. 2. Principales documentos publicados de la IEEE 802.16.

El estándar 802.16-2004 fue muy útil, ya que integró en un sólo documento las publicaciones anteriores que trataban de la misma tecnología, pero con diferentes características. Sin embargo, después de su publicación fue necesario hacer cambios y adicionar técnicas, principalmente para incluir la movilidad. En ésta tesis se presenta un análisis sobre el comportamiento dinámico de una red inalámbrica de banda ancha basada en los estándares 802.16-2004 y 802.16e.

Una red inalámbrica de banda ancha de este tipo (*WiMAX*) puede ofrecer tasas de transmisión en el orden de los Mbps, sin sacrificar el tipo de calidad de servicio (QoS). Estas características presentan una enorme ventaja sobre las actuales redes celulares comerciales.

Para que el trabajo en esta tesis sea novedoso y no repetido, el punto de partida será la investigación de estudios previos realizados sobre el manejo y solución de colisiones, que han sido analizados a detalle en las referencias [1-5]. En estas referencias se observa la mejora en el rendimiento de la red, debido al adecuado uso de los *slots* de contención y a la implementación de algún algoritmo para resolver colisiones cuando estas surjan. Por otro lado, en [23] se especifica el uso del EBA para resolverlas. Una vez hecho esto, se implementará el mecanismo EBA en [12] para obtener un modelo matemático competente de acuerdo a las necesidades actuales de las redes *WiMAX* para *Single Carrier*.

Después de lo anterior, con las referencias [13-18] se procedió a realizar una investigación exhaustiva del funcionamiento de los códigos CDMA para peticiones de ancho de banda, con la finalidad de obtener los conocimientos necesarios del funcionamiento de estos mecanismos y hacer las adaptaciones necesarias al modelo matemático de *WiMAX* para *Single Carrier*. Al obtener el modelo matemático para IEEE 802.16e, se consigue un modelo para la versión móvil de *WiMAX*.

Por otra parte, existen sistemas relativamente poco conocidos y referenciados como sistemas de banda ancha inalámbricos BWA que son: MMDS (*Multichannel Multipoint Distribution Service*) y LMDS (*Local Multipoint Distribution Services*). Ambos hacen uso de frecuencias de microondas, por lo que necesitan que no haya ningún obstáculo físico entre la antena emisora y la antena receptora. La transmisión puede ser punto-multipunto, es decir, la estación base puede transmitir la señal a varias antenas receptoras dentro de una zona geográfica determinada, esta región es conocida regularmente como célula.

2.1.1 LMDS (Local Multipoint Distribution Services)

LMDS permite un radio de cobertura limitado, pero transmite datos a altas velocidades desde la estación base a las estaciones suscriptoras. Utiliza bandas de alta frecuencia que están reguladas y requieren de un pago correspondiente por la licencia. Las desventajas más notorias de LMDS son:

- El ancho de banda es compartido y utilizado por todos los usuarios, es decir, a medida que aumenta el número de usuarios, el ancho de banda para cada uno de ellos disminuye.
- Se requiere visión directa LOS (*Line Of Sight*) entre las antenas para efectuar la transmisión de datos.

2.1.2 MMDS (Multichannel Multipoint Distribution Services)

El funcionamiento de MMDS es muy similar a la anterior, pero las diferencias son las siguientes:

- Utiliza una banda de frecuencia diferente, también regulada, generalmente inferior a 2,5 GHz que no requiere visibilidad directa.
- La distancia entre la estación base y los clientes puede ser mayor a 10 Km. Mientras que en LMDS no suele pasar los 5 Km.

Ambas tecnologías, MMDS y LMDS, motivan la necesidad de superar la restricción de línea de vista directa entre las antenas, esto con el fin de tener un verdadero impacto en el mercado. En este sentido, *WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access)*, es una tecnología que como principal alternativa permite enlaces sin línea de vista (NLOS) entre la estación base y las estaciones suscriptoras.

Anteriormente, los fabricantes desarrollaban sus propias redes, las cuales no podían operar con otras redes de otros fabricantes. De ahí la necesidad de la estandarización para las redes inalámbricas de banda ancha.

2.2 Estándares Inalámbricos de Banda Ancha

En cualquier tipo de tecnología de comunicaciones, los estándares son parte importante, ya que estos permiten el buen funcionamiento de las redes, aunque éstas estén conformadas por diferentes equipos y dispositivos que han sido creados por distintas compañías.

Existen muchas tecnologías inalámbricas en la actualidad y algunas otras que están en desarrollo, sin embargo todas éstas pueden ser distribuidas en diferentes familias basándose en una escala de región de cobertura WPAN, WLAN, WMAN, WAN como lo representa la Figura 1.1.

2.2.1 WPAN (Wireless Personal Area Network) IEEE 802.15

Dentro del estándar IEEE 802.15[32] existen otras tecnologías inalámbricas que por su región de cobertura son consideradas como una WPAN. El estándar IEEE802.15.1, define a la tecnología *Bluetooth*; el IEEE802.11.3^a, define a UWB (*Ultra Wide Band*) y por último, el IEEE802.15.4 es acerca de *ZigBee*. La principal característica de estas tecnologías es su radio de cobertura, ya que por lo regular es de 20 metros.

2.2.2 WLAN (Wireless Local Area Network) IEEE 802.11

Ésta es otra red inalámbrica que es utilizada para la comunicación entre dispositivos como: computadoras, impresoras, teléfonos y asistentes personales. WLAN IEEE802.11[31] es también conocida como *WiFi*; la crearon en 1990. Una cualidad es su radio de cobertura, que llega a alcanzar hasta los 100 metros. Dentro de este estándar existen variantes como el IEEE802.11b, IEEE802.11e, IEEE802.11, etcétera.

2.2.3 WMAN (Wireless Metropolitan Area Network) IEEE 802.16

El grupo de trabajo IEEE 802 es el encargado de desarrollar diversos estándares y su principal objetivo es hacer que estos tengan altas velocidades de transmisión de datos. Entre ellos está el IEEE 802.16 [23] que recibe el nombre de *WiMAX*. Las redes BWA tienen un radio de cobertura bastante grande si las comparamos con WLAN y *WiFi*.

IEEE 802.16 tiene dos variantes: el IEEE802.16-2004[21], define un acceso inalámbrico fijo; IEEE 802.16e[23] (es una corrección de IEEE 802.16-2004 aprobado en Diciembre de 2005) incluye movilidad y *handover*.

2.2.4 WAN (Wide Area Network)

Las redes del tipo WAN son aquellas que cubren áreas geográficamente extensas como es el caso de un país o un continente, sin embargo las redes WAN a menudo son conexiones de varias WLAN o WMAN, permitiendo de esta forma la comunicación de un usuario con otros aunque se encuentren ubicados en zonas diferentes. El más claro ejemplo de este tipo de redes es Internet, pero también está 3G y *WIMAX* móvil, que son redes inalámbricas.

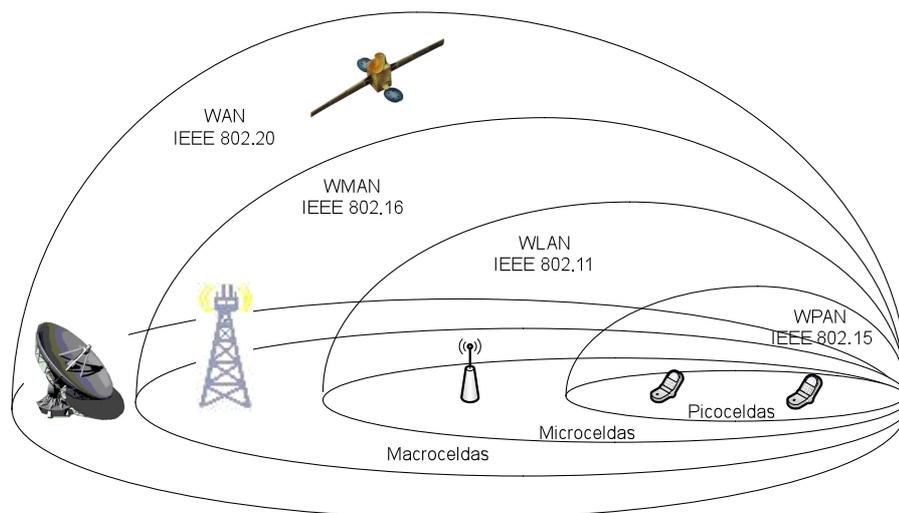


Figura 2. 1. Clasificación de las redes inalámbricas según su cobertura.

2.3 Arquitectura de las redes BWA

Un sistema de Acceso Inalámbrico de Banda Ancha (BWA, *Broadband Wireless Access*) incluye típicamente estaciones base (BS, *Base Station*), estaciones suscriptoras (SS, *Station Suscriptor*), equipos terminales de abonado, equipo central de la red, enlaces inter-celdas, repetidores y posiblemente otro tipo de equipo.

Un sistema BWA fijo se muestra en la figura 2.2, este diagrama indica la relación entre varios componentes del sistema BWA. Los sistemas pueden ser más complejos o más simples dependiendo de los elementos que contenga la red.

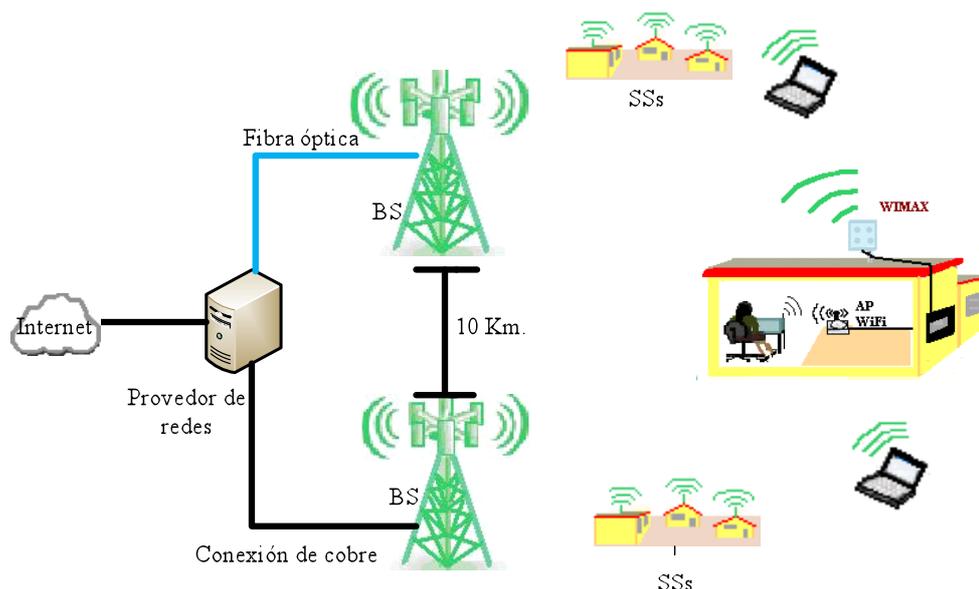


Figura 2. 2. Sistema fijo BWA.

Los enlaces entre las células pueden usar el medio inalámbrico; se hace uso de fibra óptica o medios de cobre para interconectar dos o más BSs, este tipo de enlaces pueden alcanzar velocidades en el rango de DS-3 (44.74 Mbps) y OC-3 (155.52 Mbps).

Se pueden usar antenas con distintos patrones de radiación. Por lo regular, las estaciones suscriptoras utilizan antenas altamente direccionales. Algunos sistemas usan repetidores. En los sistemas punto multipunto (PMP), los repetidores son utilizados como una alternativa para extender la cobertura de una estación base más allá de su rango normal de transmisión. Un repetidor trabaja con la misma frecuencia de una BS o bien, a diferentes frecuencias. En los sistemas *mesh*, la mayoría de las estaciones son repetidores que proveen conexión para los abonados locales.

2.4 WiMAX Forum

El estándar IEEE 802.16 sólo provee las especificaciones de la tecnología, porque para realizar otras tareas se requieren organismos que certifiquen y verifiquen la interoperabilidad de los dispositivos. Es por eso que se formó el grupo de trabajo “*WiMAX Forum*”, cuyo principal objetivo es fomentar el desarrollo y el uso del acceso inalámbrico basado en el protocolo IEEE 802.16.

El Foro *WiMAX* fue creado en Junio del 2001. Los principales miembros de este grupo de trabajo son las empresas que pertenecen al área de telecomunicaciones, así como las que se dedican a fabricar semiconductores. Actualmente, el foro tiene más de 400 integrantes. La tabla 2.2 muestra los nombres de algunas empresas.

Miembros del Foro <i>WiMAX</i>	
Intel Corporation	D-Link
Alcatel	AT&T
Samsung	Nokia
Ericsson	Cisco Systems
Motorola	Siemens SPA
Alvarion	Sony Corporation
NextWave Wireless	Nexcom Telecom
ITA	Mena Telecom
NEC	LG(Electronics Lucent Technologies)
Alvarion	British Telecom
Aperto Networks	Fujitsu
Hitachi, Ltd	SK Telecom
Lenovo	Huawei Technologies
ZTE Corporation	KDDI
Fujitsu	Airspan Networks
Clearwire	Comcast Corporation
Infomark	Hacer
Alpha Networks	ArrayComm
AT4 Wireless	Catón Gíreles Broadband Corp.
RadioFrame	PureWave Networks
Quanta Computer Inc.	Redline Communications
Lenovo	Sandvine
Selex Communications	Annaba
DAMA PERSADA	DesignArt Networks
Telecom Italia	SyChip, Inc.
Sumitomo Electric Industries,Ltd.	Ohi Electric Industry
ETRI	EION Gíreles
Nipón Telegraph and Telephone	E.T. Industries
Nokia Siemens Networks	Telsima
Hulu Sweden AB	Powerwave Technologies

Tabla 2. 3. Miembros del Foro *WiMAX*.

Otra de las tareas importantes del Foro *WiMAX* es la certificación de dispositivos, hasta no hace mucho se tenían dispositivos Pre-*WiMAX*. Los dispositivos Pre-*Wimax* no estaban certificados, pero a principios de 2008 se empezaron a contar con dispositivos totalmente certificados.

2.5 Certificación

La certificación de un dispositivo es garantizar la interoperabilidad de éste con cualquier red *WiMAX*, no importando que sean otros los fabricantes. Esto se debe a que cuando se realiza la certificación, se asegura que dicho aparato cumple con el estándar IEEE 802.16.

Para la certificación se necesita la **conformidad** y la **interoperabilidad**. En resumen, certificación es igual a conformidad más interoperabilidad.

$$\text{Certificación} = \text{Conformidad} + \text{Interoperabilidad}$$

2.5.1 Interoperabilidad

Son pruebas a las que son sometidos los dispositivos para verificar el buen funcionamiento de ellos. Las pruebas básicamente consisten en que estos pueda operar en conjunto, aunque sean de diferentes fabricantes. Una vez demostrado el buen funcionamiento de los dispositivos, las organizaciones pueden hacer la conformidad del aparato.

2.5.2 Conformidad

La conformidad es cuando una empresa certificada se encarga de avalar la calidad de un dispositivo. Ésta la pueden realizar organizaciones, laboratorios independientes, agencias de certificación, entre otros.



Capítulo 3

Descripción del Protocolo IEEE 802.16

3.1 Introducción

WiMAX es una tecnología de acceso inalámbrico, de banda ancha y de largo alcance; diseñada para ser utilizada en áreas metropolitanas MAN (*Metropolitan Area Network*). Además, considera calidad de servicio QoS (*Quality of Service*) que permite la transmisión de datos como son: voz, video, datos, videoconferencia, etc., de una forma confiable.

Por sus características, *WiMAX* es idóneo para ofrecer cobertura en zonas de difícil acceso o rurales, donde no se cuenta con la infraestructura, de esta forma se evita un cableado que puede ser de difícil despliegue, poco rentable y costoso.

3.2 Versiones del protocolo IEEE 802.16

El grupo de trabajo del estándar IEEE 802.16 fue creado en 1999, desde su existencia hasta la fecha se han elaborado diferentes versiones del estándar IEEE 802.16, en cada una de ellas se han hecho mejoras. La siguiente tabla muestra las distintas versiones del estándar IEEE 802.16 y sus características más destacadas, haciendo notar que sólo se comparan las versiones que tienen más difusión.

IEEE	802.16	802.16-2004	802.16e
Espectro	10-66Ghz	<11Ghz	2-6Ghz
Configuración	LOS	NLOS	NLOS
Movilidad	Fijo	Fijo	Móvil
Modulación	QPSK, 16-QAM, 64-QAM	OFDM con 256 subportadoras QPSK, 16QAM, 64QAM	OFDMA con 128, 512, 1024 y 2048 subportadoras QPSK, 16QAM, 64QAM
Ancho de banda	20, 25 y 28 Mhz.	Seleccionable entre 1.25 y 20Mhz.	Hasta 20 Mhz.
Radio de celda típico	2 – 5 Km. aprox.	5 – 30 Km. aprox.	1 – 5 Km. Aprox.

Tabla 3. 1. Características de las versiones del estándar IEEE 802.16.

3.3 Topologías del estándar IEEE 802.16

El estándar IEEE802.16 define dos posibles topologías:

- Topología Punto multipunto PMP (*Point-to-multipoint*)
- Topología *Mesh* o modo *Mesh*

3.3.1 Topología punto multipunto PMP

En la topología punto multipunto, el envío de datos sólo ocurre entre una estación base BS y sus estaciones suscriptoras SS. PMP es una topología centralizada donde la estación base es el centro del sistema.

Las antenas de las estaciones base tienen un ancho de haz determinado, sin embargo no se logra una cobertura de 360 grados, para lograr una cobertura total se necesitaría más de una antena.

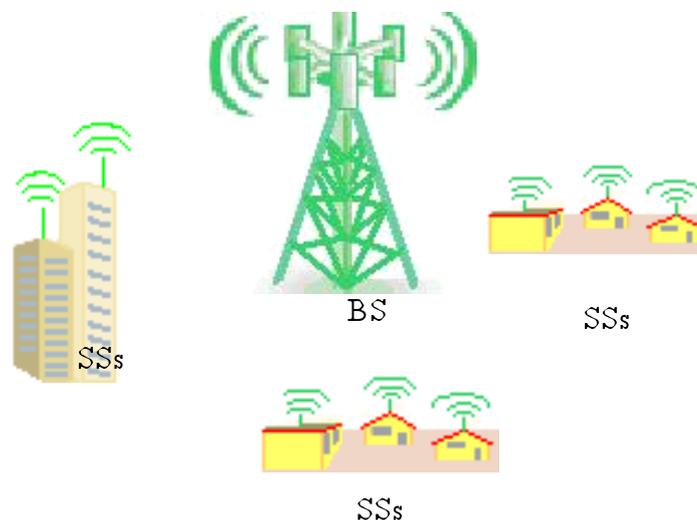


Figura 3. 1. Topología punto multipunto.

3.3.2 Topología Mesh

La topología *Mesh* permite descentralizar a la red, ya que cada elemento de esta última funciona como una estación base, esto quiere decir que una SS se puede conectar a una o más SSs intermedias, y que todos los nodos pueden comunicarse entre sí.

La diferencia principal, comparando la topología *Mesh* con la punto multipunto radica en que en la primera, el tráfico puede ser ruteado a través de las estaciones suscritas. En la otra, el tráfico sólo ocurre entre la BS y la SS.

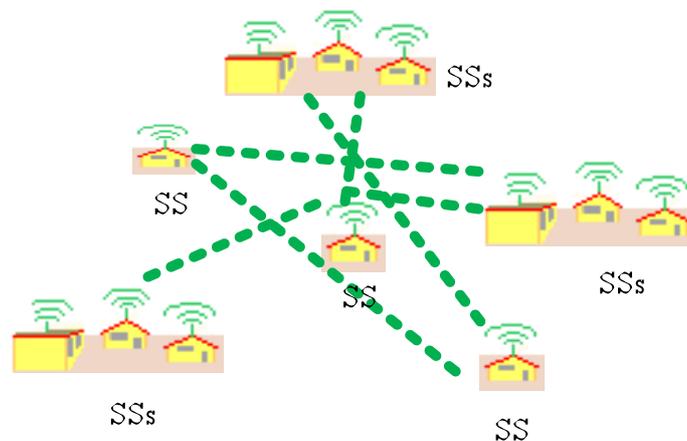


Figura 3. 2. Topología *Mesh*.

3.4 Capa MAC

El protocolo IEEE 802.16 posee características que son soportadas por BWA (*Broadband Wireless Access*), el estándar centra la atención en las capas MAC (Control de acceso al medio) y PHY (física).

La principal tarea de la capa MAC de *WiMAX* es proporcionar una interfaz entre las capas superiores de transporte y la capa física. La capa MAC toma los paquetes que vienen de las capas superiores, llamados unidad de servicio de datos MAC (MSDUs), y los organiza dentro de unidades de datos (MPDUs) para su transmisión aérea.

La capa MAC está compuesta por tres subcapas como se muestra en la Figura 3.3.

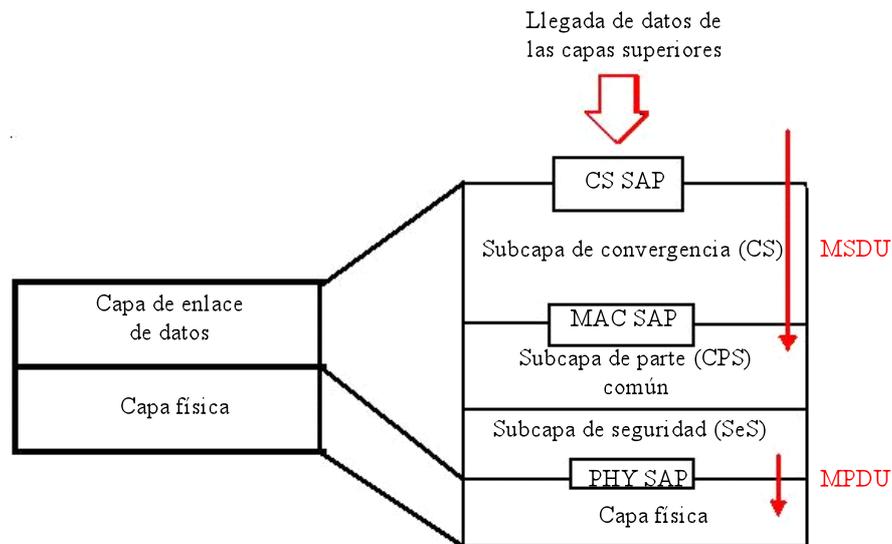


Figura 3. 3. Subdivisión de la capa MAC.

Subcapa de Convergencia (*Convergente Sublayer-CS*)

Los sistemas *WiMAX* deben de soportar la operación con diferentes sistemas, es por eso que la subcapa de convergencia (CS) se encarga de interactuar y transformar los datos que vienen de las redes externas; después pasarlos a la subcapa CPS (*Common Part Sublayer*) convertidos en SDU (*Service Data Units*), que son las unidades de datos que se transfieren entre capas adyacentes. La ubicación de la subcapa CS es sobre la subcapa CPS.

Subcapa de Parte Común (*Common Part Sublayer-CPS*)

La subcapa CPS es la parte principal de la capa MAC y contiene todas las funciones necesarias para realizar el intercambio de datos como lo son: asignación de ancho de banda, servicios de acceso al sistema, establecimiento y mantenimiento de la conexión.

Subcapa de Seguridad (*Security Sublayer-SeS*)

La subcapa MAC contiene otra subcapa llamada de seguridad SeS. Ésta presta los servicios de autenticación, de intercambio seguro de claves y de cifrado. Además, sus dos principales tareas residen en la encriptación y la autenticación de los datos.

3.4.1 Encabezado de la capa MAC

El *frame* genérico MAC se muestra en la figura 3.4.



Figura 3. 4. Formato del *frame* MAC.

El encabezado MAC puede desempeñar dos papeles: ser un encabezado genérico o un encabezado de solicitud de ancho de banda, esto depende del valor que tenga el campo HT (*Header Type*).

3.4.1.1 Encabezado genérico

El encabezado genérico se utiliza para los paquetes que incluyen información de control de usuario, pero también se emplea en funciones de fragmentación, concatenación o empaquetamiento. Los campos del encabezado genérico se muestran en la figura 3.5.

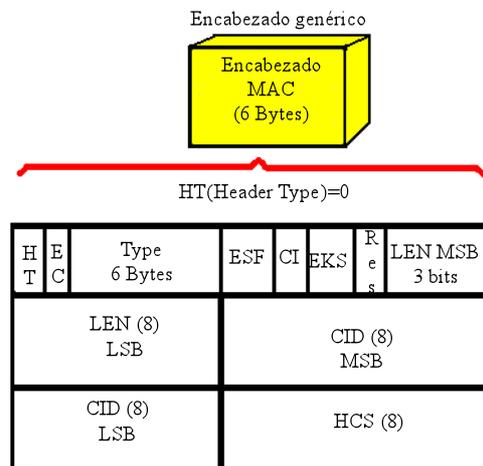


Figura 3. 5. Encabezado genérico.

En donde:

- HT (*Header Type*). Con un valor de cero indica que es un encabezado genérico.
- EC (*Encryption Control*). Indica si el encapsulado se ha increpado.
- Type. Indica el tipo de carga útil incluida en el paquete.
- Res (*Reserved*). Reservados.

- CI (CRC indicador). Indica si se ha empleado la verificación de redundancia cíclica (*Cyclic Redundancy Check*) para el control de errores.
- EKS (*Encryption Key Sequence*). Índice de la llave de cifrado y del vector de inicialización.
- LEN (*Length*). Longitud del paquete con encabezado en Bytes.
- CID (*Connection Identifier*). Utilizado para identificar la conexión generadora del paquete.
- HCS (*Header Check Sequence*). Identifica errores en el encabezado.

3.4.1.2 Encabezado de solicitud de ancho de banda

Este encabezado de solicitud de ancho de banda es únicamente utilizado para las peticiones de las SSs que transmiten datos hacia la BS, estas peticiones son enviadas en el canal de subida (UL, *Uplink*). Figura 3.6

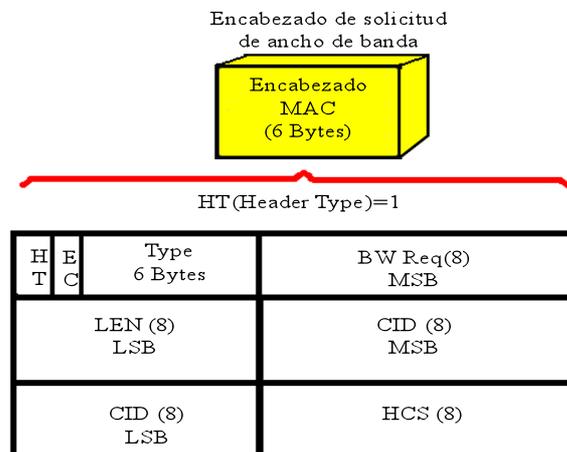


Figura 3. 6. Encabezado de solicitud de ancho de banda.

En donde:

- HT (*Header Type*). Con valor de uno indica que es un encabezado de solicitud de ancho de banda.
- EC (*Encryption Control*). Debe de tener un valor de cero para que la información no sea encriptada.
- *Type*. Indica el tipo de solicitud que se realiza (incremental o agregada).
- BR (*Bytes Request*). Tamaño total de la información que desea transmitirse.
- CID (*Connection Identifier*). Conexión que solicita asignación de ancho de banda.
- HCS (*Header Check Sequence*). Identifica errores en el encabezado.

3.5 Fragmentación, concatenación y empaquetamiento

La capa MAC del estándar IEEE 802.16 está diseñada para soportar varios protocolos de capas superiores, tales como ATM o IP. Cada paquete de información que proviene de estas subcapas es empaquetado, a partir del formato PDU, antes de ser transportado sobre una o más conexiones de acuerdo con el protocolo MAC. Después de ser enviados por la interfaz de aire, los PDUs son reconstruidos para formar un SDU original, de esta manera las modificaciones realizadas por el protocolo de la capa IEEE 802.16 MAC son transparentes para el receptor.

Para obtener un mejor rendimiento del canal inalámbrico, se han incluido funciones que ayudan a disminuir dinámicamente la sobrecarga agregada en las transmisiones. Lo anterior se basa en la manipulación de la carga útil para conformar paquetes de longitud controlada. A continuación se muestra cuáles son estas funciones y en qué consisten.

- **Fragmentación.-** Los paquetes que se exceden en la longitud máxima de transmisión pueden ser divididos en otros paquetes más pequeños. La capacidad para realizar la fragmentación se indica al momento de establecer el enlace.
- **Empaquetamiento.-** Se envía en un solo paquete la información de diversas fuentes que provienen de capas superiores. Está soportado el empaquetamiento de paquetes de longitud fija o variable.
- **Concatenación.-** Diversos paquetes pueden enviarse en una sola entrega, pero cada SS identifica su paquete mediante el identificador de conexión.

El funcionamiento de éstos se da cuando varios paquetes llegan de las capas superiores a la capa MAC. Ésta los clasifica en varias conexiones por medio del CID, posteriormente son encapsulados dentro de los SDUs (*Service Data Units*); una vez realizado este procedimiento los SDUs son fragmentados y empaquetados dentro de los PDUs, estos últimos son enviados a la capa física para su transmisión. Cabe mencionar que la capa MAC soporta la concatenación de PDUs de diferentes conexiones; que son enviados dentro de la misma ráfaga de transmisión.

3.6 Paquetes de control MAC

Los mensajes de control son: Mensaje Descriptor de Canal Descendente (DCD), Mensaje de Mapa Descendente (DL-MAP), Mensaje Descriptor del Canal Ascendente (UCD) y Mensaje de Mapa Ascendente (UL-MAP), y cuentan con un campo en donde se especifica qué tipo de control poseen, para que sean enviados dentro de la carga útil de una MAC PDU.

3.6.1 Mensaje descriptor de canal descendente (DCD)

El DCD es enviado periódicamente por la BS, en él se especifican las características del canal físico de transmisión como:

- **Número de canal de RF (*RF Channel Number*)**. Van de 0 hasta un número ilimitado de canales, siempre y cuando sean soportados por el sistema.
- **Tasa de Símbolo (*Symbol Rate*)**. De 16 a 40 Mbaud.
- **Número de configuración activa (*Number of active PHY Burs profile*)**. De 1 a 13
- **Inicio de la región activa en la trama (*Star 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.

3.6.2 Mensaje de mapa descendente (DL-MAP)

Este mensaje define las características del canal de bajada y son las siguientes:

- **Sincronización física (*PHY Synchronization*)**. Depende de la especificación de la capa física.
- **Contador DCD (*DCD Count*)**. Indica el valor del contador y los cambios del DCD. También describe el perfil de transmisión descendente.
- **Identificador de la Estación Base (*Base Station ID*)**. Tiene 48 bits. La mitad de ellos constituyen un identificador de operación que al combinarse con el identificador de Canal Descendente del mensaje (DCD) permite atender situaciones de borde de sector o de celda.
- **Número de Elementos (*Number of Elements*)**. Indica la cantidad de Elementos de Información (IE, *Information Elements*) que están incluidos en el mensaje.

3.6.3 Mensaje descriptor del canal ascendente (UCD)

La BS envía periódicamente un mensaje UCD en *broadcast*, en él se indican las características del canal ascendente. El UCD contiene los parámetros del EBA (*Exponential Backoff Algorithm*) que se utilizan para la resolución de colisiones.

- **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*).** Especifica el canal ascendente al que se refiere el mensaje UCD.
- **Tipo de modulación:** BPSK, QPSK, 16 QAM o 64 QAM.
- **Otras características:** longitud de preámbulo, codificación, Bytes de información y de paridad.

3.6.4 Mensaje de mapa ascendente (UL-MAP)

Cuando los procesos de inicialización y registro han finalizado, las SSs pueden establecer una o más conexiones con la estación base y en cada una pueden enviarle datos.

La transmisión en el canal UL se hace si las SSs solicitan oportunidad para transferir datos. La BS recibe estas peticiones y determina el número de *slots* que cada estación suscriptora podrá enviar en el canal de subida (UL). Esta información es enviada en *broadcast* en el canal DL por la BS y usa un mensaje UL-MAP al inicio de cada trama DL.

El mensaje UL-MAP proporciona la información de acceso al canal de subida como: identificador del canal de subida, contador UCD, número de elementos, tiempo de inicio de asignación (*Alloc Start Time*) y elementos de información de mapa (IE).

Los IE tienen unos campos donde en ellos es asignado el ancho de banda para el canal de subida. Por cada UL-MAP debe de haber uno o más IE. Los IE constan de parámetros como el CID, UIUC y *offset*.

CID: Indica si la asignación del IE se ha hecho hacia una dirección *Unicast*, *Multicast* o *Broadcast*.

UIUC (*Uplink Interval Usage Code*): Define el tipo de uso para el ancho de banda proporcionado como: solicitud, reservado, mantenimiento, reservación de flujo de datos, IE nulo o vacío.

Offset: Indica el intervalo en *slots*.

En la tabla 3.2 se muestran los IEs que pueden incluirse en un UL-MAP y DL-MAP.

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

Tabla 3. 2. Tipos de IEs de los mensajes de control de UL-MAP y DL-MAP.

3.6.5 Mensaje de solicitud de ranging (RNG-REQ) y respuesta de ranging (RNG-RSP)

El mensaje de solicitud *ranging* es enviado por las SSs a la BS cuando se inicia por primera vez un enlace. Sin embargo, una vez establecido, las SSs tienen que enviar periódicamente mensajes de solicitud de *ranging* para saber si el canal se encuentra en buenas condiciones, y si no hacer los ajustes de potencia en los perfiles de transmisión descendente.

Cuando se recibe un mensaje RNG-REQ, la BS manda un mensaje de respuesta de *ranging* (RNG-RSP), el mensaje RNG-RSP incluye información de ajuste de sincronización, potencia y frecuencia, así como el estado del proceso de *ranging*. Además, puede contener los CID básicos y primarios que indican la dirección MAC de las SSs durante el *ranging* inicial.

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

Las SSs envían los mensajes de REG-REQ hacia la BS para iniciar su registro durante la inicialización del servicio, con el fin de dar a conocer las capacidades particulares de las SSs, como el número de CIDs que puede soportar (al menos tres, correspondientes a las conexiones básica, primaria y secundaria), y la secuencia de la llave HMAC (*Haced Message Authentication Code*).

Una vez que el mensaje REG-REQ es recibido por la BS, ésta envía otro que es REG-RSP que indica si la autenticación del mensaje fue exitosa o no, la versión MAC empleada, el CID para la conexión secundaria con las SSs, el código HMAC y la enumeración de las capacidades de la estaciones suscriptoras son con la finalidad de saber que la BS puede soportar las capacidades que han informado las SSs.

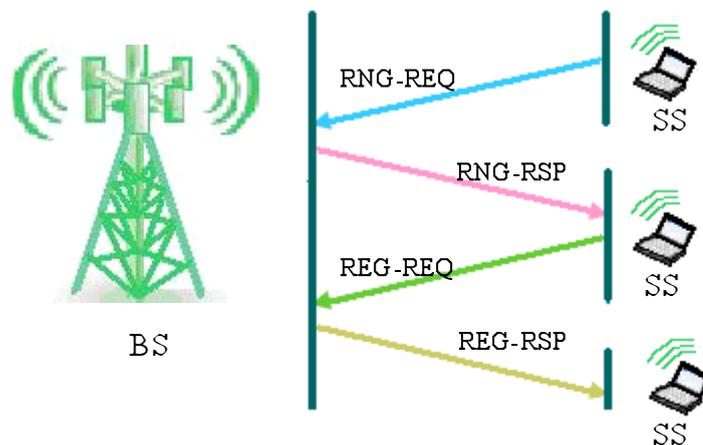


Figura 3. 7. Mensajes entre la BS y SS.

3.7 Servicios de programación de transmisión ascendente

El protocolo IEEE 802.16 ha definido cuatro servicios para la programación de transmisiones en el canal de subida. Con la finalidad de hacer más eficiente el proceso de solicitud y asignación de ancho de banda. Los cuatro servicios son: (*Unsolicited Grant Service*), (*real-time Polling Service*), (*no real-Time Polling Service*) y (*Best Effort*).

Servicio no solicitado (Unsolicited Grant Service-UGS)

Es la clasificación que se le da a los paquetes que deben ser enviados en tiempo real y de forma constante, además deben cumplir con una longitud fija que permite reducir la latencia y el *overhead*, y así satisfacer las demandas de comunicación que se tengan en ese momento. Algunos ejemplos de este tipo de servicios son: Voz sobre IP (VoIP), videoconferencia, T1, E1, etcétera.

En Tiempo Real (Real-time Polling Service)

Está orientado para la transmisión periódica de paquetes de longitud variable en tiempo real, un ejemplo es MPEG. Este servicio ofrece oportunidades periódicas *unicast* a las SSS que especifican la longitud deseada para cada una de las asignaciones.

No En Tiempo Real (Non real-time Polling Service-nrtPS)

Este servicio es parecido al rtPS, pero la diferencia es que la consulta se realiza en espacios de tiempo más grande y no necesariamente periódicos, porque dentro de sus prioridades no está el tiempo real. Además, se enfoca en aplicaciones que si necesitan un gran ancho de banda como: las aplicaciones de juegos a través de Internet y la transmisión de datos vía FTP (*File Transfer Protocol*).

Mejor Esfuerzo (Best Effort-BE)

Son los servicios destinados para transmitir tráfico, mas no imponen rangos máximos de latencia y *overhead*, es decir, aquí no son necesarias las garantías de velocidad de transmisión o de retraso.

Los servicios de programación utilizan tres funciones:

1. ***Piggy Back Request.***- Son todas las solicitudes de ancho de banda que envían las SSs y que aparecen en los encabezados de los paquetes durante una transmisión garantizada, pero si una SS tiene paquetes por enviar, nunca utilizará la región de contención para hacer sus peticiones nuevamente. Este proceso no se aplica para los usuarios con servicio UGS.
2. ***Bandwidth Stealing.***- Es el uso de una porción del ancho de banda asignado a una SS para solicitudes adicionales y se ubica en la parte de envío de datos. Este mecanismo se emplea cuando una SS cuenta con las oportunidades garantizadas para la transmisión de paquetes. A los usuarios con el servicio UGS no se les permite este proceso.
3. ***Polling.***- En este mecanismo, la BS asigna regularmente algunos *minislots* que las SSs pueden usar para hacer solicitudes de ancho de banda.

3.8 Solicitud y asignación de ancho de banda

Una vez explicados los parámetros anteriores, las SSs participan en un mecanismo de solicitud de ancho de banda, con la finalidad de tener acceso al canal inalámbrico. En este mecanismo se le indica a la BS las necesidades de incrementar o disminuir los requerimientos de ancho de banda, a partir del tipo de tráfico generado. Es importante recalcar que lo anterior no aplica para el servicio UGS, debido a que goza de ciertos privilegios que le impiden someterse a este proceso, ya que está forzado a mantener una conexión sin variantes que garantice una óptima comunicación.

Se usa DAMA (*Demand Assigned Multiple Access*) como un mecanismo mediante el cual, las SSs le hacen saber sus requerimientos específicos de ancho de banda a la BS. Cada SSs envía mensajes para poder reservar slots en el canal ascendente UL. Las oportunidades de transmisión están limitadas por la cantidad de tráfico existente en la red y por los parámetros de calidad de servicio.

Las estaciones suscriptoras realizan sus peticiones de las siguientes formas:

Solicitudes.- Son mensajes enviados por las SSs a la BS, en donde se especifica el ancho de banda requerido en Bytes, sin tomar en cuenta el encabezado de la capa física. La transmisión de las solicitudes de ancho de banda puede ser durante el periodo de contención o en otro, siempre que haya sido reservado para la estación suscriptora. Si las solicitudes utilizan el espacio reservado, tendrán que recurrir a los subencabezados de solicitudes *piggy back*, ya que permite optimizar el uso del canal y reduce las colisiones provocadas por el envío múltiple de solicitudes de ancho de banda.

Consulta (*Polling*).- La BS establece consultas periódicas para la transmisión en el canal ascendente; destinadas exclusivamente para que las SSs envíen sus solicitudes de asignación de ancho de banda. Estos periodos se definen mediante los correspondientes IEs que están dentro de los mapas para el canal de subida.

Las oportunidades de transmisión pueden dirigirse sólo a una SS (*Unicast*) o a un grupo de ellas (*Multicast*). Si se trata de un grupo de SSs, todas tendrán que contender por el envío de sus mensajes.

Si es una consulta *Unicast* de la SS, la BS pone en el mensaje de UL-MAP que tiene una oportunidad para ésta y que podrá ser empleada para enviar datos. Cuando la BS no cuenta con el ancho de banda suficiente para atender a todas las SSs, recurre a consultas *Multicast*, es decir, manda oportunidades de solicitud de ancho de banda sólo a un grupo de SSs y que se especifican en sus mapas de canal ascendente.

Como es de esperarse, el grupo de estaciones está expuesto a colisiones. El EBA lo que hace es resolver este problema y al mismo tiempo determina en qué *slots* de contención se debe de volver a transmitir la petición de ancho de banda.

Las colisiones provocan que las SSs agoten su número máximo de posibilidades para enviar su petición. Una vez que éstas se terminan puede considerarse como un fracaso. El éxito se obtiene cuando en un mapa del canal ascendente contiene una reserva para la SS en cuestión.

3.9 Resolución de colisiones

Las colisiones se producen cuando al menos dos o más SSs envían su petición de ancho de banda en el mismo *slot* de contención. Cuando ocurre una, las estaciones que participaron son penalizadas con un tiempo de espera antes de volver a intentar una petición de ancho de banda.

Los tiempos de espera se calculan mediante el EBA, y con base en los parámetros de la ventana de *backoff* inicial y final definidos en los mensajes UCD. El mecanismo de resolución de colisiones mediante el EBA es el siguiente:

Cuando una colisión es detectada, la SS involucrada genera un número aleatorio entre cero y el exponente binario indicado por la ventana de *backoff* inicial, es decir, si el parámetro tiene un valor de 3, la estación suscriptora obtendrá un valor aleatorio entre 0 y 8.

La SS esperará la cantidad de *slots* indicados por el número aleatorio generados anteriormente. Al pasar todos los *slots* de espera, la SS intenta retransmitir, sin estar exenta de una nueva colisión. Y así sucesivamente hasta llegar al intento 16, si no deja de transmitir peticiones de ancho banda.

En el caso de las contenciones para la solicitud de asignación de ancho de banda, la SS determina que la transmisión fue exitosa cuando ésta recibe un UL-MAP que incluye la reservación correspondiente al CID. Al cumplir con la condición anterior, la SS suspende el EBA e inicia la transmisión de su información.

Si llega a ocurrir que el tiempo de espera se agote antes de poder retransmitir, entonces se aplica nuevamente el EBA y el valor de la ventana deberá incrementarse en uno; por lo tanto, el rango de *slots* a esperar se incrementa al doble de su valor anterior. La SS repetirá el proceso anterior tantas veces como sea necesario hasta llegar al valor final de la ventana.

3.10 Modelo Analítico

3.10.1 Describiendo la estrategia

Tomando de referencia a [12] una parte importante del trabajo consistirá en calcular el tiempo de retardo que se origina en la capa MAC de *WiMAX*. Nuestro modelo analítico se enfoca en el tratamiento de las SSs para mejorar la calidad de servicio de tipo BE, en dónde los usuarios finales compiten por el ancho de banda disponible.

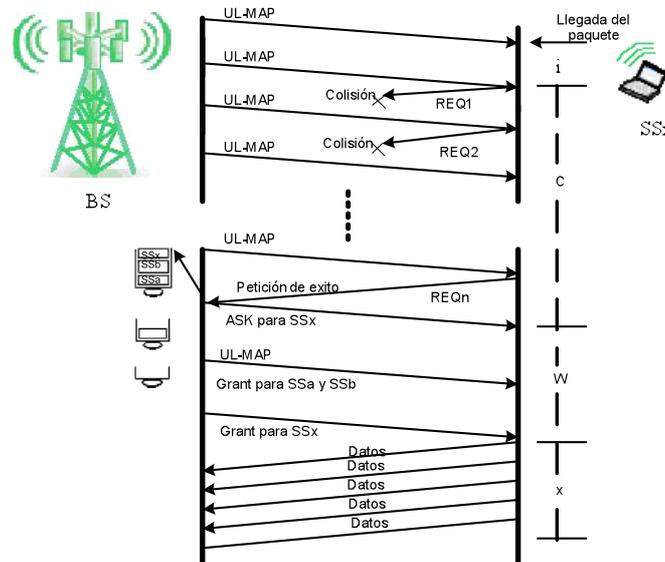


Figura 3. 8. Componentes de retardo en la transmisión de un paquete.

La figura 3.8 presenta la siguiente información: cuando una SS_x está activa crea una serie de eventos para poder transmitir sus datos de tipo BE. Una vez que un paquete llega de las capas superiores, la SS_x tiene que esperar al siguiente UL-MAP que especifica un periodo de contención, a este tiempo le llamaremos i .

Una vez que el UL-MAP llega a la SS_x , ésta selecciona arbitrariamente uno de los *slots* de contención disponibles y transmite una petición de ancho de banda (REQ). Si otra SS elige el mismo *slot* de contención que la SS_x , entonces ocurre una colisión. Ninguna de las dos SSs recibirá una asignación de ancho de banda para transmisión inmediata, ni un mensaje de enterado (ACK) en el siguiente UL-MAP.

De esta forma, la SS_x tiene que volver a transmitir su petición de ancho de banda (REQ) hasta que sea exitosamente recibida por la BS, en este ejemplo, el éxito ocurre en el intento REQ_n . A este tiempo se le llamará c .

Una vez que es recibida la solicitud de ancho de banda de la SS_x , la BS le indica el número de *slots* que debe emplear de acuerdo al tamaño del paquete y por lo tanto, cuantos UL-Frames necesita mandar. Pero si la BS es incapaz de cumplir con el ancho de banda de la SS_x , porque está atendiendo a otras SSs, envía una asignación nula. En ella le informa que su petición fue exitosa pero que no puede satisfacer el REQ enteramente, por lo que tendrá que esperar, a este tiempo de espera se le conoce como W . Por último, el número de *slots* gastados durante la transmisión de paquetes de la SS_x , se le nombrará tiempo X .

La figura. 3.8 muestra la relación entre los hechos descritos anteriormente, y el retraso de los componentes del modelo cuya descripción se muestran en la tabla 3.3. [12] Por lo tanto, el tiempo para transmitir un paquete se puede obtener mediante la adición de todos los componentes de retraso, es decir, $t = i + c + w + x$.

Al tomar la media de los lados de esta ecuación, obtenemos:

$$\bar{t} = \bar{i} + \bar{c} + \bar{w} + \bar{x}. \quad (1)$$

	Definición de retardo (<i>slots</i>)
i	Retardo en <i>slots</i> de un paquete procedente de una capa superior hasta el inicio del bloque de contención, en donde SS_x transmitirá una petición de ancho de banda (REQ).
c	Representa el retardo total en <i>slots</i> que el paquete pasa en contención, el cual inicia en el principio del bloque de contención, aquí la SS_x transmite la primera petición de ancho de banda (REQ) y termina cuando dicha SS_x recibe un mensaje ACK desde la BS (puede ser un “ <i>null grant</i> ”).
W	Tiempo que tarda el algoritmo para conceder la petición de ancho de banda (REQ) a SS_x . Se mide desde que la SS_x está enterada de que tiene una asignación de ancho de banda por parte de la BS. El algoritmo que asigna la programación de las transmisiones (en la BS), atiende las peticiones de ancho de banda usando el método FIFO. Si una petición de ancho de banda no puede ser asignada en el siguiente UL-Frame, entonces se espera a que las solicitudes previas de ancho de banda de otras SSs sean atendidas. En caso de que un REQ sea atendido inmediatamente después de ser recibido, la BS en lugar de responder con un mensaje de “ <i>null grant</i> ” (ACK), responde con una asignación que indica el número de <i>slots</i> que fueron reservados para que la SS transmita; también señala el fin del tiempo de contención “ c ” y entonces “ w ” es igual a cero.
X	<i>Slots</i> que se necesitan para que un paquete sea transmitido desde la SS_x .

Tabla 3. 3. Componentes que forman el retardo en la transmisión de un paquete.

Símbolo	Definición
C	Tamaño de un bloque de contención en <i>slots</i> de un <i>UL-Frame</i>
M	Tamaño total en <i>slots</i> de un <i>UL-Frame</i>
i	Retardo inicial
c	Retardo por contención hasta transmitir un REQ exitosamente
w	Retardo del algoritmo para asignar el ancho de banda a los SSs
x	Retardo por la transmisión de un paquete
t	Tiempo total en un ciclo de transmisión
	$t = i + c + w + x$
$\bar{i}, \bar{c}, \bar{w}, \bar{x}, \bar{t}$	Esperanza matemática de t, i, c, w, x y b respectivamente
\bar{b}	
P_{SC}	Probabilidad de tener una contención exitosa en un <i>UL-Frame</i>
n	Número de SSs conteniendo en el actual <i>UL-Frame</i> .
s	Número de SSs están transmitiendo un REQ exitosamente en el actual <i>UL-Frame</i>
\bar{n}, \bar{s}	Esperanzas matemáticas de n y s respectivamente
\bar{b}	Número esperado de periodos de contención por ciclo t
N	Número máximo de SSs activas
P_C	Probabilidad de que una SS contienda en un periodo de contención
P_S	Probabilidad de que una contención sea exitosa en un <i>minislot</i>
\bar{d}	<i>Minislots</i> disponibles para que una SS transmita por ciclo
γ	<i>Throughput</i> del Sistema
M	Tamaño medio de un paquete en la capa LLC
MAC_OV	Encabezado de capa MAC para el estándar IEEE 802.16
PHY_OV	Encabezado de capa física (PHY) para el estándar IEEE 802.16
K	Mínimo valor entre $(\alpha + EBA_t, EBA_i)$
α	Número de colisiones dadas por la Distribución Geométrica
EBA_i	Valor inicial de EBA
EBA_t	Valor truncado de EBA
b	Slots de espera en caso de colisión
λ	Reduce términos
δ	Reduce términos

Tabla 3. 4. Notación completa de elementos componentes de nuestro modelo matemático.

A partir de los parámetros, el rendimiento de la red normalizada (γ) del canal UL puede ser calculado como la fracción de *slots* gastados en la transmisión de datos por SS, y ésta puede ser escalada al número total de SSs (N), por lo tanto, se puede obtener el rendimiento de la red a partir de la siguiente ecuación:

$$\gamma = N\bar{x}/\bar{t} . \quad (2)$$

Observando la ecuación (2), para el cálculo de (γ) es necesario calcular \bar{x} y \bar{t} . La componente de retardo \bar{x} puede ser obtenida directamente de la distribución de tamaños de paquetes, y teniendo en cuenta que los *slots* pueden ser de tamaño 2, 4, 8, 16, 32 o 64 Bytes. Así, el retardo medio generado por la transmisión de un paquete, dado en *slots* puede ser obtenido por la ecuación (3).

$$\bar{x} = \left\lceil \frac{\bar{m} + MAC_OV + PHY_OV}{slot_size} \right\rceil \quad (3)$$

El valor para el encabezado de la capa de acceso al medio al estándar IEEE 802.16 es de 6 Bytes (*MAC_OV*). Sin embargo, el encabezado de la capa física depende de la técnica de codificación, ver referencia [21], capítulo 8 (páginas 307-630) para obtener los detalles adicionales sobre tasas de codificación y técnicas de modulación aplicables.

En el análisis, el tamaño de los paquetes utilizados fueron fijos (100, 128, 256, 300, 512, 1024 y 1500 Bytes), lo mismo sucedió con los *frames* de 225 y 450 *slots*, es decir, de 1 y 2 [ms] respectivamente.

El cálculo del retardo \bar{i} puede ser estimado mediante.

$$\bar{i} \cong 2M \quad (4)$$

Mientras que el cálculo de \bar{x} e \bar{i} es directo, para determinar los valores de \bar{c} y \bar{w} es más complicado. Ambos procedimientos son explicados en las secciones 3.10.2 y 3.10.3

3.10.2 Calculando el Retardo de Contención \bar{c}

Para simplificar el cálculo, se asume que la distribución geométrica va a calcular el número de intentos fallidos de peticiones de ancho de banda que una SS va a tener, antes de obtener una petición exitosa. De esta forma, dada la probabilidad de éxito en un bloque de contención (P_{SC}), el promedio de *slots* \bar{c} utilizados están dados por el algoritmo EBA. Este algoritmo determina los slots que una SS debe esperar cuando hay una colisión, antes de intentar transmitir de nuevo y están dados por la siguiente ecuación:

$$b = \sum_{\alpha=1}^{16} 2^{\alpha} - 1 \quad (5)$$

$$k = \min(\alpha + EBA_i, EBA_t)$$

Donde k es el valor mínimo, tomado entre $\alpha + EBA_i$ y el EBA_t . El EBA_i y el EBA_t son los valores inicial y truncado del EBA respectivamente. Y α es el número de colisiones que una SS experimenta antes de tener una petición exitosa de ancho de banda, y está dada por la distribución geométrica siguiente:

$$\alpha = \frac{(1 - P_{sc})}{P_{sc}} \quad (6)$$

En un trabajo previo a éste, el retardo era calculado de la siguiente forma:

$$\bar{c} = C + M \frac{(1 - P_{SC})}{P_{SC}} \quad (7)$$

Pero esta ecuación no tomaba en cuenta el algoritmo EBA, pero en este trabajo sí.

La ecuación (5) puede separarse en dos casos: el primero sería $\alpha_n + EBAt \leq EBAt$ y el segundo cuando $\alpha_n + EBAt > EBAt$. Con esto, los *slots* de contención que se dejan pasar cuando surge una colisión, están dados por la ecuación:

$$b = \sum_{\alpha=1}^{\alpha+EBAt \leq EBAt} 2^{\alpha+EBAt} - 1 + \sum_{\alpha > EBAt}^{16} 2^{EBAt} - 1 \quad (8)$$

En los cálculos realizados se consideró el promedio de b; es por ello que se divide entre dos, quedando la ecuación anterior de la siguiente forma:

$$\bar{b} = \sum_{\alpha=1}^{\alpha+EBAt \leq EBAt} \frac{2^{\alpha+EBAt} - 1}{2} + \sum_{\alpha > EBAt}^{16} \frac{2^{EBAt} - 1}{2} \quad (9)$$

Lo que cambia en esta tesis son los parámetros configurables del EBA. El valor de EBAt es de 10 y está configurado por la BS. Como se puede apreciar, el número de *slots* que se dejan pasar cuando un usuario colisiona está dado por potencias de dos, los dos casos que presenta la ecuación (9), pueden ser calculados mediante la ecuación (10).

$$\bar{b} = \begin{cases} 2^{EBAt+\alpha} - 2^{EBAt}, & EBAt+\alpha \leq EBAt \\ 2^{EBAt} - 2^{EBAt-1} + 512(EBAt + \alpha - EBAt), & EBAt+\alpha > EBAt \end{cases} \quad (10)$$

Con el fin de reducir términos, se utilizan las siguientes ecuaciones:

$$\lambda = 2^{EBAt+\alpha} - 2^{EBAt} \quad (11)$$

$$\delta = 2^{EBAt} - 2^{EBAt-1} + 512(EBAt + \alpha - EBAt) \quad (12)$$

Finalmente, al retomar las ecuaciones (11) y (12), \bar{c} es calculada por:

$$\bar{c} = \begin{cases} C + \lambda \left(\frac{M}{C} \right), & EBAi + \alpha \leq EBAi \\ C + \delta \left(\frac{M}{C} \right), & EBAi + \alpha > EBAi \end{cases} \quad (13)$$

C y M se miden *slots*; la primera, representa el tamaño del bloque de contención y la segunda, el número total de *slots* en el UL-Frame.

Haciendo que n y s tomen el valor de la esperanza matemática del total de usuarios, la n representa a los que están conteniendo en ese momento; y la s , a los que ya obtuvieron éxito en su petición y aparecen en un bloque respectivamente.

Entonces se puede estimar la probabilidad de éxito en la contención (P_{SC}) en un UL-Frame, mediante:

$$P_{SC} = \frac{\bar{s}}{\bar{n}}. \quad (14)$$

Ahora se tiene que hacer la estimación de \bar{n} y \bar{s} .

P_{SC} representa la probabilidad de que una SS decida contender en un bloque de contención. Por lo tanto, el valor esperado para número de contendientes en un bloque de contención está dado por:

$$\bar{n} = NP_C \quad (15)$$

Con respecto al número esperado de contendientes exitosos por bloque de contención es:

$$\bar{s} = (NP_C)P_{SC}. \quad (16)$$

Se aprecia que hay t *slots* por cada ciclo de transmisión. Además, un bloque de contención en cada M *slots*. De ahí que, el promedio de bloques de contención b por cada ciclo de transmisión está dado por:

$$\bar{b} = \frac{\bar{t}}{M}. \quad (17)$$

Se asume que el sistema está operando de forma constante, considerando las aseveraciones hechas en los párrafos anteriores. Bajo esta premisa, cada SS activa tiene la misma oportunidad de transmitir cada t *slots* y el parámetro s puede calcularse al dividir el número total de SSs entre el número de bloques de contención por cada ciclo de transmisión, como sigue:

$$\bar{s} = \frac{N}{b}. \quad (18)$$

Una vez que se tienen las ecuaciones anteriores, se puede comenzar a sustituir y desarrollar algunas fórmulas con variables conocidas, con el fin de ir obteniendo resultados tangibles, para esto se toma la ecuación (12) y se sustituye en la ecuación (13), para obtener:

$$\bar{s} = \frac{MN}{\bar{t}}. \quad (19)$$

Tomando las ecuaciones (15) y (19) y sustituyéndolas en la ecuación (14) se tiene:

$$P_C = \frac{M}{P_{SC}\bar{t}}. \quad (20)$$

La P_s mide la probabilidad de éxito que un usuario puede tener en la contención, de acuerdo al promedio de usuarios que están haciendo peticiones de ancho de banda \bar{n} , y para que el éxito ocurra, sólo uno de ellos debe competir en un *slot* dado.

Para calcular lo anterior, se hace uso de la probabilidad binomial. Se utiliza el número de SSs contendientes y el tamaño del bloque de contención como parámetros. La ecuación que representa dicha probabilidad es la siguiente:

$$P_s = \binom{\bar{n}}{1} \frac{1}{C} \left(1 - \frac{1}{C}\right)^{\bar{n}-1}. \quad (21)$$

Ahora, el número esperado de SSs que transmiten un REQ exitosamente en el actual *UL-Frame* puede ser calculado de la siguiente forma:

$$\bar{s} = CP_s. \quad (22)$$

Finalmente de la ecuaciones (22) y (15), P_{SC} puede ser calculada como:

$$P_{SC} = \frac{CP_s}{NP_C}. \quad (23)$$

Para calcular la ecuación (13), se involucra el cálculo de P_{sc} (ya que λ y δ dependen de α) que a su vez depende de cálculo de la P_c y la P_s como se indica en la ecuación (23).

3.10.2.1 Integrando y generalizando el modelo para el retardo de contención

El procedimiento asume que se conoce una estimación inicial para P_{sc} , así como de w , entonces de las ecuaciones (13), (1), (20) y (21) se calcula P_c y P_s . Estos valores se utilizan en la ecuación (23) con el fin de obtener el valor siguiente para P_{sc} . Con este

valor, el proceso puede repetirse haciéndose iterativo a partir de la ecuación (13). Cuando la diferencia entre dos valores consecutivos para P_{sc} está por debajo de un umbral determinado, se detiene este ciclo iterativo. Usando nuevamente la ecuación (13), se puede calcular el valor para el retardo de contención a partir del valor final de P_{sc} .

Se define con subíndice n a la n -ésima iteración. Con esto las ecuaciones (1), (12) y (13) quedan de la siguiente forma:

$$\bar{i}_n = \bar{i} + \bar{c}_n + \bar{w} + \bar{x} \quad (24)$$

$$\lambda_n = 2^{EBAi+\alpha_n} - 2^{EBAi-1} \quad (25)$$

$$\delta_n = 2^{EBAi} - 2^{EBAi-1} + 512(EBAi + \alpha_n - EBAi) \quad (26)$$

$$\text{Donde } \alpha_n = \frac{1 - P_{scn}}{P_{scn}}$$

Usando las ecuaciones (25) y (26) en (13), se obtiene la ecuación (27).

$$\bar{c}_n = \begin{cases} C + \lambda_n \left(\frac{M}{C} \right), & EBAi+\alpha \leq EBAi \\ C + \delta_n \left(\frac{M}{C} \right), & EBAi+\alpha > EBAi \end{cases} \quad (27)$$

Ahora, se procederá a sustituir la ecuación (27) en la ecuación (24) y obtenemos:

$$\bar{i}_n = \begin{cases} \bar{i} + C + \lambda_n \left(\frac{M}{C} \right) + \bar{w} + \bar{x}, & EBAi+\alpha \leq EBAi \\ \bar{i} + C + \delta_n \left(\frac{M}{C} \right) + \bar{w} + \bar{x}, & EBAi+\alpha > EBAi \end{cases} \quad (28)$$

De la ecuación (20) se sabe que $P_{Cn} = M / (P_{scn} \bar{i}_n)$ y combinada con la ecuación (28) resulta:

$$p_{c_n} = \begin{cases} \frac{C}{P_{scn}(\beta + \lambda_n)}, & EBAi+\alpha \leq EBAi \\ \frac{C}{P_{scn}(\beta + \delta_n)}, & EBAi+\alpha > EBAi \end{cases} \quad (29)$$

Donde $\beta = (\bar{i} + C + \bar{w} + \bar{x}) \frac{C}{M}$

Con la ecuación (15) y (29) se estima el promedio de números de usuarios y en la n -ésima iteración es:

$$\bar{n}_n = \begin{cases} \frac{C * N}{P_{SC_n}(\beta + \lambda_n)}, & EBAi + \alpha \leq EBAi \\ \frac{C * N}{P_{SC_n}(\beta + \delta_n)}, & EBAi + \alpha > EBAi \end{cases} \quad (30)$$

De las ecuaciones (21) y (30), el valor de probabilidad de contención exitosa en un *slot* arbitrario en la n -ésima iteración es:

$$P_{S_n} = \begin{cases} \frac{C * N}{P_{SC_n}(\beta + \lambda_n)} \left(\frac{1}{C} \right) \left(1 - \frac{1}{C} \right)^{\frac{C * N}{P_{SC_n}(\beta + \lambda_n)} - 1}, & EBAi + \alpha \leq EBAi \\ \frac{C * N}{P_{SC_n}(\beta + \delta_n)} \left(\frac{1}{C} \right) \left(1 - \frac{1}{C} \right)^{\frac{C * N}{P_{SC_n}(\beta + \delta_n)} - 1}, & EBAi + \alpha > EBAi \end{cases} \quad (31)$$

Finalmente, cuando en las ecuaciones (29), (31) y (23) se reducen a la máxima expresión, se obtiene la siguiente ecuación en diferencias que se empleará para obtener el valor de P_{SC} :

$$P_{SC_{n+1}} = \begin{cases} \left(1 - \frac{1}{C} \right)^{\frac{C * N}{P_{SC_n}(\beta + \lambda_n)} - 1}, & EBAi + \alpha \leq EBAi \\ \left(1 - \frac{1}{C} \right)^{\frac{C * N}{P_{SC_n}(\beta + \delta_n)} - 1}, & EBAi + \alpha > EBAi \end{cases} \quad (32).$$

En resumen, dando \bar{w} y un valor inicial para P_{SC} , se puede iterar la ecuación (32)² hasta obtener un valor coherente de P_{SC} . Con este valor de P_{SC} , se calcula el retardo de contención dado por la ecuación (13), ahora sólo falta calcular el valor de \bar{w} .

² Ver apéndice B

3.10.3 Calculando el retardo de espera \bar{w}

En la sección anterior, el valor para el retardo de espera \bar{w} de una SS fue asumido. Por esta razón es necesario determinar si este valor de \bar{w} requiere ser ajustado.

Ahora, se calculará la media de *slots* disponibles para que cada SS envíe datos en un ciclo de transmisión promedio d y se calcula con la siguiente ecuación:

$$\bar{d} = \frac{\bar{i} - C\bar{b}}{N}. \quad (33)$$

Se sabe que el promedio esperado de *slots* de datos que requiere cada SS es x . Por esta razón, el número esperado de estos *slots* en un ciclo de transmisión debe ser al menos $(N * x)$.

De acuerdo con $d > N * x$, se propone que el valor inicialmente asumido para el retardo de espera w se incremente a:

$$W_{m+1} = W_m + 1 \quad (34)$$

Entonces, se procedería a calcular nuevamente el valor del retardo por contención, que se ha descrito en la sección 3.10.2.1. Pero si es $d < N * x$, se puede tomar el correspondiente valor de w y se procede a calcular la eficiencia del sistema.

Los resultados de los cálculos que se han hecho hasta este momento serán mostrados en el capítulo cinco de este trabajo, en él aparece el modelo matemático de ecuaciones en diferencias.



Capítulo 4

Descripción de WirelessMan OFDMA 802.16

4.1 Introducción

Para el desarrollo de la segunda parte de este trabajo es necesario explicar algunos conceptos respecto a la capa física *WirelessMAN* OFDMA. Con el objetivo de comprenderlos mejor y para ello, es necesario revisar las especificaciones de la capa PHY.

En el estándar IEEE 802.16 se definen cuatro especificaciones de capa PHY. Cualquiera de ellas puede emplearse con la capa MAC y desarrollar un sistema inalámbrico de banda ancha, como lo describe brevemente [23]:

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

4.2 Panorama general de OFDM

OFDM es una técnica basada en la modulación multiportadora, es decir, los datos se transmiten mediante la modulación simultánea de múltiples portadoras de radio frecuencia. El objetivo de la modulación multiportadora es dividir una señal de banda ancha en varias subportadoras paralelas sin que se traslapen, es decir, sin que haya interferencia entre ellas, como lo muestra la figura 4.1.

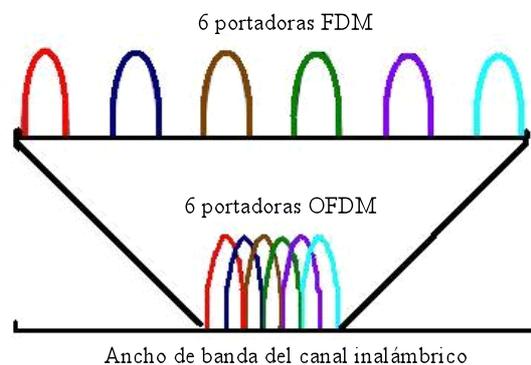


Figura 4. 1. Eficiencia espectral de OFDM respecto de FDM.

Ahora la pregunta es: ¿Cómo es que las sub-portadoras OFDM se pueden superponer sin que haya interferencia entre ellas? A diferencia de las portadoras FDM, las portadoras OFDM son ortogonales entre sí. Esta propiedad se refleja cuando el pico de una subportadora se produce y las otras se encuentran en cero, de esta forma hay un mejor aprovechamiento del canal. Observar la figura 4.2.

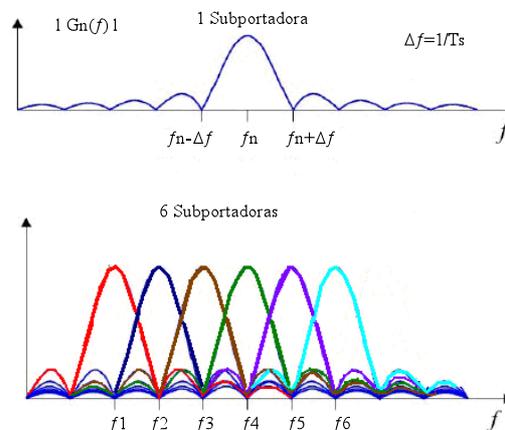


Figura 4. 2. Superposición de sub-portadoras en OFDM.

Todas estas propiedades de OFDM dan como resultado una eficiencia espectral alta. La multiplexación de las sub-portadoras es muy robusta frente a la multi-trayectoria (*multi-path*) y frente a la interferencia de RF, estas dos últimas son muy comunes en los canales de radiodifusión.

Además, OFDM puede recuperar la información, esto se logra al hacer uso de sofisticados mecanismos de entrelazamiento, codificación, *reed solomon*, codificadores convolucionales o turbos códigos que llegan al receptor, aunque esté en distintas señales, amplitudes y con retardos diferentes. Así, se pueden crear redes de radiodifusión de frecuencia única sin que exista interferencia con otras señales de radiodifusión.

Para entender mejor OFDM es necesario analizarlo en el dominio del tiempo como en el dominio de la frecuencia, con el fin de entender de mejor forma algunos conceptos respecto de los símbolos OFDMA.

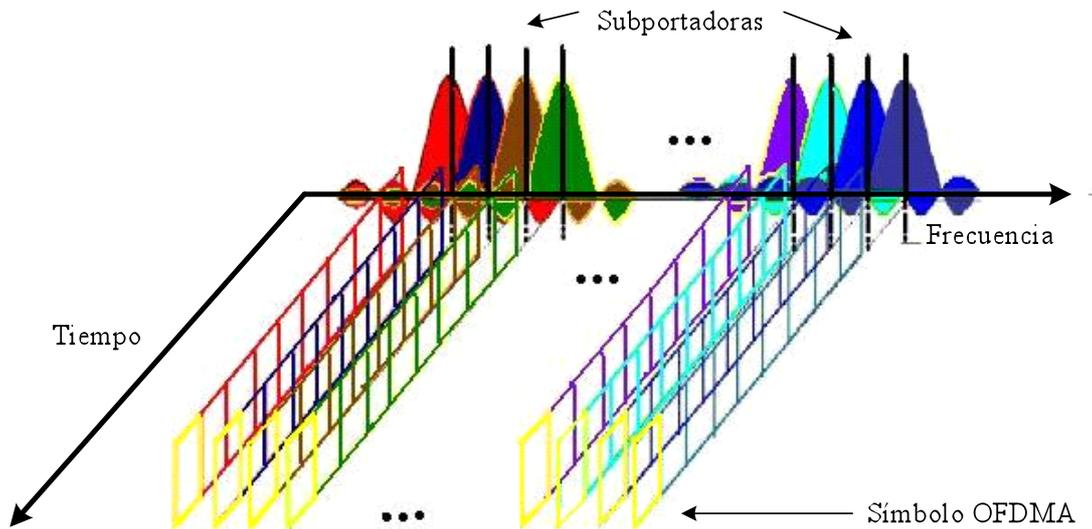


Figura 4. 3. Representación de los símbolos OFDM en el dominio tiempo- frecuencia.

4.2.1 Análisis de OFDMA en el dominio del tiempo

La IFFT (*Inverse Fast Furier Transform*) es empleada para crear los símbolos de OFDMA. La IFFT crea la forma de onda en el dominio del tiempo. La duración del símbolo OFDMA en tiempo es referida como la parte útil del símbolo OFDMA (T_b); por otro lado, para minimizar la interferencia inter-símbolo y los efectos que ocasiona la multi-trayectoria, una porción del símbolo dada por la ecuación ($T_g=(1/N)T_b$) es repetida al inicio. A esta porción se le conoce con el nombre de *Cyclic Prefix (CP)* o tiempo de guarda. Entonces, la duración de un símbolo OFDMA es $T_s = T_b + T_g$.

En la figura 4.4 se observa que los datos pueden ser recuperados correctamente por el receptor, siempre que el tiempo de guarda sea tan grande como el retardo de propagación del canal.

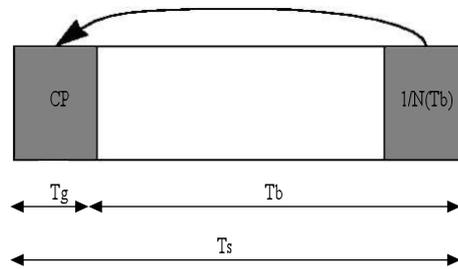


Figura 4. 4. Estructura del símbolo OFDMA en el dominio del tiempo.

Los valores de N en la ecuación $T_g = (1/N) T_b$, se eligen dependiendo de las condiciones del canal. El estándar IEEE 802.16 define los valores de $N=4, 8, 16$ y 32 para la versión fija de *WiMAX*, mientras que para la versión móvil sólo se especifica un valor de $N=8$, para este trabajo usaremos este valor.

4.2.2 Análisis de OFDMA en el dominio de la frecuencia.

Un símbolo OFDMA está formado por un número de subcanales lógicos y a su vez, cada uno de ellos está compuesto por un grupo de subportadoras de datos, las cuales no siempre son consecutivas. El número total de éstas depende del tamaño de la FFT que son 128, 426, 512, 1024 ó 2048. Existen cuatro tipos de subportadoras.

- ❖ **Subportadoras de datos**
- ❖ **Subportadoras piloto (para sincronización)**
- ❖ **Subportadoras nulas (de no transmisión, para las bandas de guarda)**
- ❖ **Subportadoras de frecuencia central-DC (para simplificar conversiones D/A y A/D)**

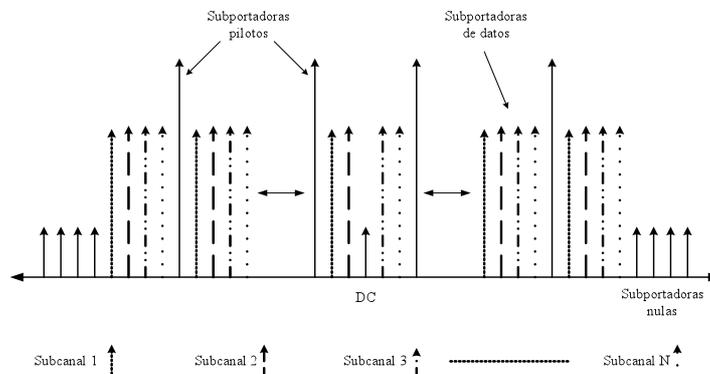


Figura 4. 5. Estructura del símbolo OFDMA en el dominio de la frecuencia.

4.3 Slots OFDMA y regiones de datos

Los datos son transmitidos a través de un conjunto de *slots* OFDMA, al que también llaman *QuantumSymbol*, en la capa PHY. Un *QuantumSymbol* requiere que se dimensione en dos aspectos: en el tiempo (T_s) y en un subcanal lógico. Estas dos dimensiones, puede ser visualizada como un rectángulo, tal como se muestra en la Figura 4.6.

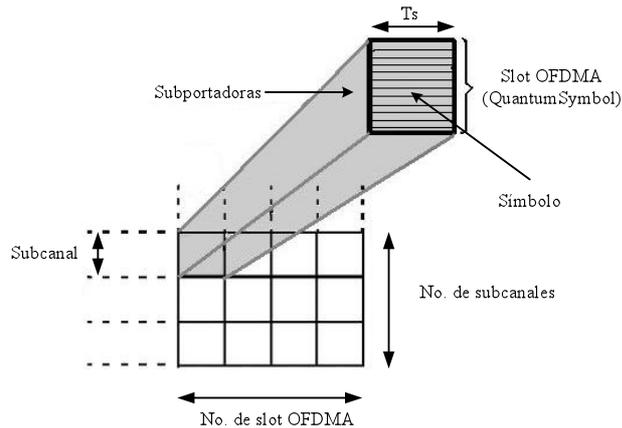


Figura 4.6. Slot OFDMA.

La unidad mínima de datos que se puede enviar a través de OFDMA es un *QuantumMap*, el cual equivale a tres *slots* OFDMA para el canal *Uplink* y dos *slots* OFDMA para el canal *Downlink*. Sin embargo, el estándar IEEE 802.16 especifica que las regiones de datos en el canal *Uplink* no necesariamente deben tener la forma de un rectángulo o cuadrado, mientras que el canal *Downlink* si debe cumplir con esta forma.

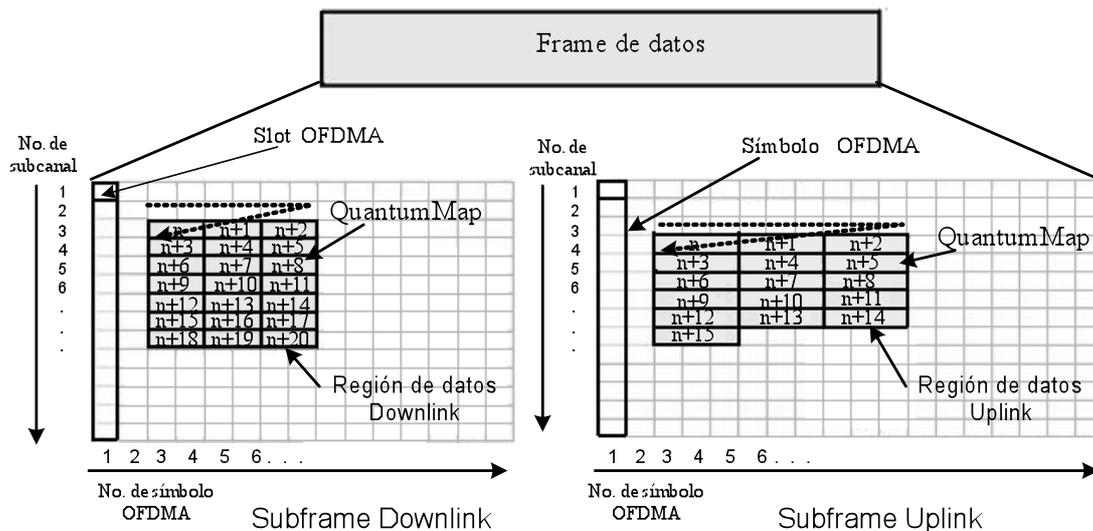


Figura 4. 7. Estructura de un *frame* OFDMA.

4.4 Transmisión de Datos en la Capa PHY

Uno de los desafíos actuales en los sistemas de acceso inalámbrico se presenta en la capa física, ya que este medio sufre de variaciones rápidas y de constante interferencia. El Estándar IEEE 802.16 prevé estas situaciones y define una serie de procedimientos. Estos se deben llevar a cabo antes de poder transmitir los datos en la interfaz inalámbrica. También especifican una codificación del canal para prevenir y detectar los errores de transmisión en el sistema inalámbrico.

Esta codificación del canal consta de cuatro etapas en el lado del transmisor: aleatorización (*Randomizer*), codificación FEC (*Forward Error Correction*), entrelazado (*Interleaver*) y Modulación. Cuando el receptor recibe las señales y las decodifica, realiza un proceso inverso al del transmisor, es decir, primero va la etapa de: Demodulación, des-entrelazado (*De-interleaver*), decodificación FEC y des-aleatorización (*De-randomizer*), como se muestra en la Figura 4.8.

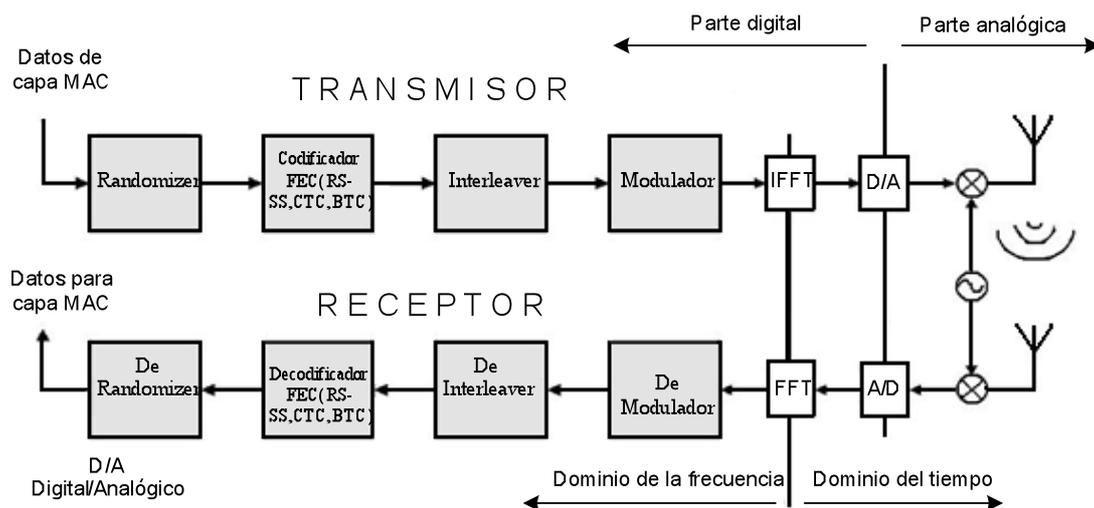


Figura 4. 8. Etapas de codificación en la transmisión de datos en capa PHY basada en OFDMA.

La explicación de estas etapas queda más allá de los objetivos de este trabajo, por esta razón sólo se describirán brevemente.

Randomizer

El objetivo principal del *Randomizer* es brindar protección a los datos a través de incertidumbre teórica en la información, para evitar largas secuencias de unos o ceros consecutivos. Esta aleatorización es llevada a cabo tanto en el canal *Uplink* como en el *Downlink*. Si la cantidad de datos a transmitir es menor que la cantidad de los recursos asignados, el espacio vacío debe completarse con “unos” y es agregado al final del bloque de transmisión.

Codificador FEC

El codificador FEC sirve para agregar redundancia a la información, detectar y corregir las posibles fallas que presenten los datos al ser transmitidos sobre el canal inalámbrico. Para este fin son usados los códigos convolucionales de *Reed-Solomon* (RS-CC), los cuales son obligatorios para los canales *Uplink* y *Downlink*, así lo establece el estándar IEEE 802.16. También pueden ser aplicados códigos de turbo bloques (BTC) y códigos turbo convolucionales (CTC).

Interleaver

La función del *interleaver* es proteger la información contra largas secuencias de errores consecutivos, este tipo de errores son muy difíciles de corregir. El *interleaver* está diseñado para aislar errores de ráfaga y convertirlos en errores aleatorios, con el propósito de diversificarlos y facilitar su corrección.

Modulación

Cuando los datos son codificados, estos deben modularse para ser transmitidos por el canal inalámbrico y pueden utilizar una de las siguientes constelaciones: BPSK, QPSK, 16QAM ó 64QAM. Éstas llegan a modular 1, 2, 4 y 6 *bits* por símbolo respectivamente.

Una constelación es una representación geométrica de señales en un espacio de n dimensiones, en dónde se pueden visualizar todos los posibles símbolos de salida que llega a generar un modulador. Dicho en otras palabras, la secuencia de *bits* es convertida a una secuencia de símbolos representados por valores complejos.

En la Figura 4.9 se muestran las diferentes constelaciones anteriormente mencionadas.

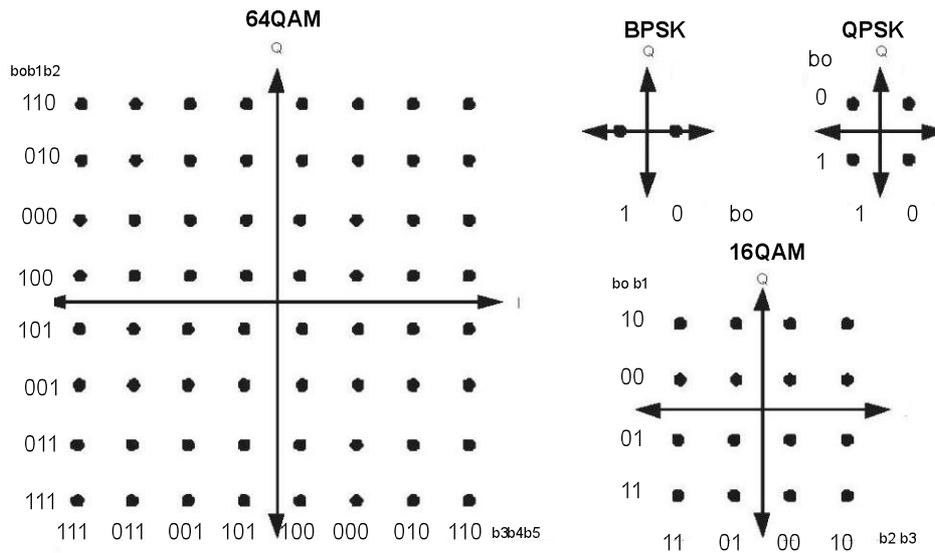


Figura 4. 9. Constelaciones de modulación BPSK, QPSK, 16QAM y 64QAM.

4.5 Cálculo de los parámetros de OFDMA

Una vez descrito brevemente los conceptos respecto de OFMDA, se tienen los elementos necesarios para comprender los cálculos de algunos parámetros de OFDMA que fueron necesarios para la realización de la segunda parte de este trabajo.

El primer parámetro a calcular es la frecuencia de muestreo ($f_s = n \cdot BW$), como se puede observar en la ecuación, ésta depende del ancho de banda del canal BW ; para nuestro caso el ancho de banda es de 20MHz y con un factor n . Para OFDM los posibles valores de n son: $\frac{8}{7}, \frac{86}{75}, \frac{144}{125}, \frac{316}{275}, \frac{57}{50}$. Sin embargo, el valor por default que se utiliza es: $n = \frac{8}{7}$, mientras que para OFDMA el valor utilizado es: $n = \frac{28}{25}$. Entonces, el valor de f_s es:

$$f_s = n \cdot BW = \left(\frac{28}{25}\right) (20 \times 10^6) \quad (35)$$

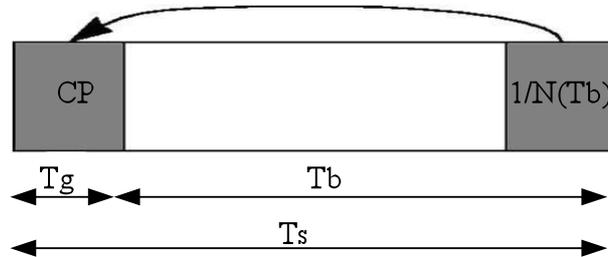
$$f_s = 22.4 \times 10^6 [Hz]$$

Una vez calculada f_s , se procede a calcular la separación entre las sub-portadoras (Δf - aparecen en la Figura 4.2). Δf se calcula con el cociente de la frecuencia de muestreo (f_s) entre el número de puntos de la *Fast Fourier Transform* a utilizar (N_{FFT}). El valor de N_{FFT} para un canal de 20[MHz] es de 2048 puntos. Así, el valor de Δf es:

$$\Delta f = \frac{f_s}{N_{FFT}} = \frac{22.4 \times 10^6}{2048}$$

$$\Delta f = 10.9375 [\text{KHz}] \quad (36)$$

Ahora, se procede a calcular el tiempo útil del símbolo T_b y éste se obtiene a partir del inverso de la separación entre las sub-portadoras (Δf). Por lo tanto:



T_b = Tiempo útil del símbolo

T_g = Tiempo de guarda

T_s = Tiempo total del símbolo

Figura 4. 10. Tiempos del símbolo OFDMA.

$$T_b = \frac{1}{\Delta f} = \frac{1}{10.9375 [\text{KHz}]} \quad (37)$$

$$T_b = 91.42857143 [\mu\text{s}]$$

$$T_g = \frac{1}{n} (T_b) = \frac{1}{8} (91.42857143 [\mu\text{s}]) \quad (38)$$

$$T_g = 11.42857143 [\mu\text{s}]$$

$$T_s = T_b + T_g \quad (39)$$

$$T_s = 102.8571429 [\mu\text{s}]$$

Para calcular el número de símbolos OFDMA que hay en un *frame*, primero se debe obtener la parte utilizable para enviar una señalización y los datos en el *frame*. Ésta porción se calcula de la siguiente forma:

$$\text{frame utilizable} = \text{duracion del frame} - RTG - TTG \quad (40)$$

Donde TTG (*Transmit/receive Transition Gap*) y RTG (*Receive/transmit Transition Gap*) son los tiempos de transición (Transmisión-Recepción) del aparato de radio. Los valores de $TTG = 60 \mu\text{s}$ y $RTG = 105.714285 \mu\text{s}$ fueron tomados del simulador OPNET.

La figura 4.11 sirve para justificar la ecuación (40).

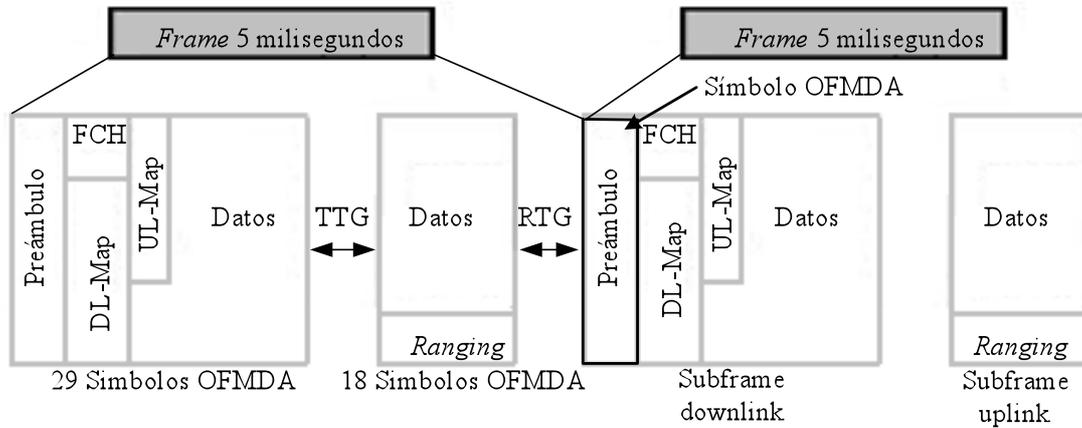


Figura 4. 11. Diagrama de un *frame*.

Una vez obtenida la ecuación anterior, procedemos a calcular el tiempo del *frame* utilizable.

$$\begin{aligned} \text{frame utilizable} &= 5[ms] - 60[\mu s] - 105.714285[\mu s] \\ \text{frame utilizable} &= 4.834285715[ms] \end{aligned}$$

Por último, para obtener el número de símbolos OFDMA que hay en un *frame*, se divide el cociente del *frame* utilizable entre el tiempo total del símbolo T_s .

$$\begin{aligned} OFDMAsymb &= \frac{\text{frame utilizable}}{T_s} = \frac{4.834285715[ms]}{102.8571429[\mu s]} \\ OFDMAsymb &= 47 \text{ símbolos} \end{aligned} \tag{41}$$

Una vez conseguido el número de símbolos OFDMA que hay en un *frame* y para obtener un óptimo rendimiento de éste, son asignados 18 símbolos OFDMA para el *Uplink* y 29 para el *Downlink*. Al último se le asignan más símbolos OFDMA, porque ocupa más recursos para el preámbulo, el FCH (*Frame Control Header*), el UL-MAP y el DL-MAP.

Una vez obtenido el número de símbolos OFDMA que le son asignados al *sub-frame Uplink*, todos los cálculos realizados de aquí en adelante serán para éste.

4.6 Parámetros del canal Uplink

Como ya se mencionó, cada *frame* tiene un dimensionamiento en el dominio del tiempo y de la frecuencia. El estándar IEEE 802.16 define un número de subcanales lógicos, además de la cantidad de subportadoras que la primera debe poseer para un ancho de banda de 20 Mhz. Todos estos valores son mostrados en la Tabla 4.1.

	Sub-Frame	
	Uplink	Downlink
No. de subportadoras	1120	1440
No. de subportadoras en un subcanal lógico	16	24
No. de Subcanales lógicos	70	60
No. de Símbolos OFDMA	18	29

Tabla 4. 1. Características de perfil de capa PHY para un canal de 20 MHz.

En la tabla 4.1 se observa que un *sub-frame Uplink*, para un canal de 20 Mhz, está compuesto por 70 subcanales lógicos (de los cuales el estándar IEEE802.16 establece que 6 u 8 subcanales adyacentes son para *ranging*; en cada subcanal lógico existen 16 portadoras para transmitir datos). En resumen, en un símbolo OFDMA (OFDMA_{symb}) hay 1120 portadoras de datos o 1120 símbolos. No hay que confundir estos símbolos con los símbolos OFDMA.

4.7 Canal de calibración (Ranging)

Son tres las funciones del canal de *Ranging*: *Ranging* inicial, *Ranging* periódicos y peticiones de ancho de banda.

El estándar IEEE802.16 define un canal de *Ranging* a partir de grupo de seis u ocho subcanales adyacentes. Los subcanales son considerados adyacentes si tienen una numeración lógica sucesiva. En el canal de *Ranging*, los usuarios pueden enviar sus peticiones de ancho de banda y lo hacen por medio de códigos CDMA. Cuando un usuario quiere mandar una petición, lo primero que hace es seleccionar aleatoriamente un código CDMA de un conjunto, después hace lo mismo pero con un *slot* de contención del canal de *ranging* para enviar su código CDMA.

Los usuarios colisionan cuando seleccionan el mismo código CDMA y el mismo *slot* de contención; en ese momento se activa el algoritmo EBA que se utiliza para resolver colisiones. Los códigos CDMA son modulados con BPSK (1 *bit* por símbolo), sobre los *slots* de contención.

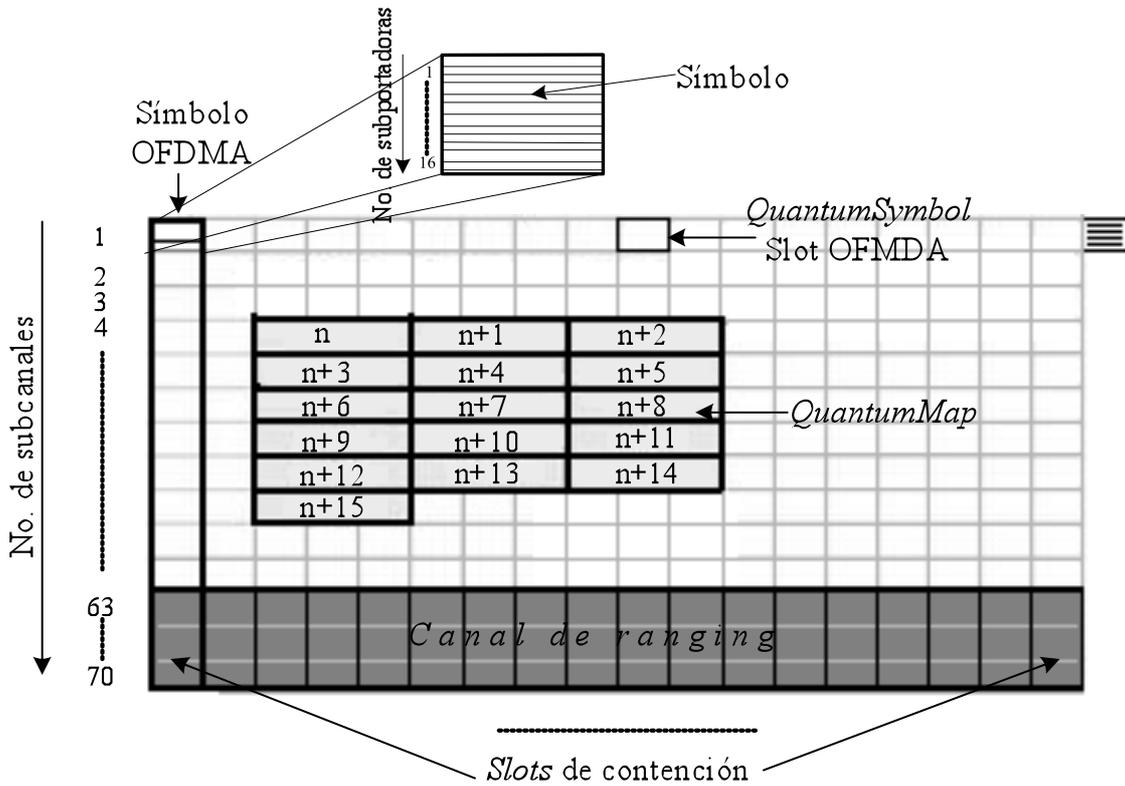


Figura 4. 12. Descripción Detallada de un *Sub-frame Uplink* para un canal de 20 Mhz.

4.8 Códigos CDMA

Los códigos CDMA son generados por el PRBS (*Pseudom-Random-Binary-Sequence*), el cual implementa un polinomio generador $1+X+X^4+X^7+X^{15}$ y debe ser iniciado con la semilla $b_{14} \dots b_0 = 0,0,1,0,1,0,1,1, s_0, s_1, s_2, s_3, s_4, s_5, s_6$; donde s_6 es el *bit* menos significativo de la semilla del PRBS. Del $s_6:s_0 = UL_PermBase$ (*Permutation base for specified UL ASS zone*), donde s_6 es el *bit* más significativo del $UL_PermBase$.

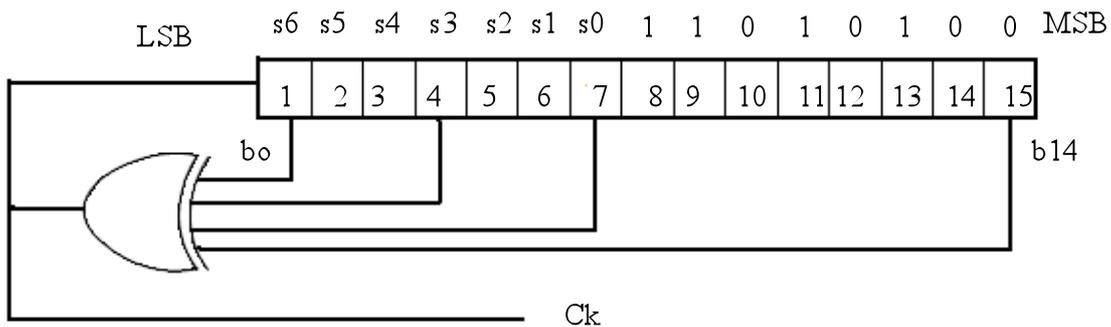


Figura 4.13. Generador de los códigos CDMA.

Los códigos CDMA son obtenidos de la salida del generador PRBS (Ck) y la longitud de cada uno de ellos es de 144 *bits*, los cuales pueden ser truncados en longitud para ciertos canales (128 *bits* para canales de 1.25MHz [19]). El número máximo de códigos CDMA es de 256 y son subdivididos en cuatro grupos:

- Ranging* Inicial
- Ranging* Periódico
- Peticiones de Ancho de Banda
- Para *Handover-Ranging*

4.9 Slot de contención

Los *slots* de contención se encuentran en el canal de *Ranging*. Se definen a partir de un grupo de subcanales lógicos adyacentes (6 u 8 subcanales) y por la duración de un símbolo OFDMA. La estructura de un *slot* de contención se muestra en la figura 4.13.

4.10 Describiendo la estrategia para calcular la eficiencia de una red WiMAX

En las secciones anteriores se explicaron los parámetros necesarios de OFDMA, con la finalidad de comprender el modelo analítico de ecuaciones en diferencias que se obtendrá en esta sección para OFDMA.

En el capítulo tres de este trabajo, se explicó de manera detallada la obtención del modelo analítico en ecuaciones en diferencias para *single carrier* (ecuación 32 del capítulo tres). Los parámetros del modelo analítico obtenido para *single carrier* están en términos de M , C , i , x , w , EBA_i y EBA_t .

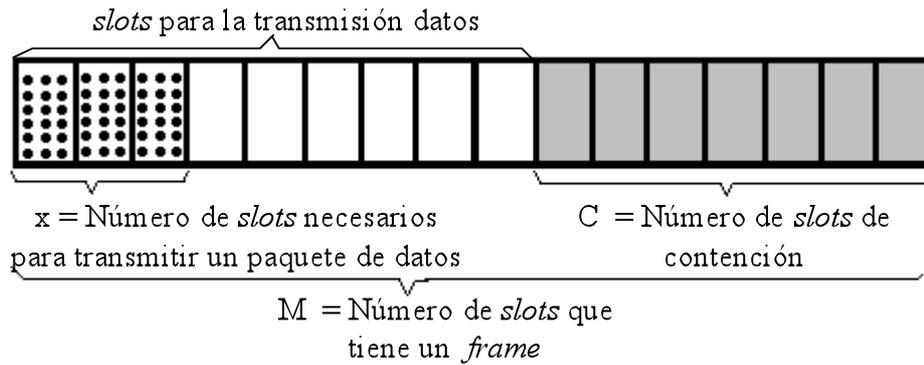


Figura 4. 14. *Frame* de *Single Carrier*.

Como primer paso se tiene que hacer la analogía con el modelo analítico anterior y se procede a obtener el número de *slots* que hay en un *frame* OFDMA.

El estándar define la unidad mínima de datos para un *sub-frame Uplink*, esta unidad es un *QuantumMap* (compuesto por tres *slots* OFDMA) y sería como el *slot* de datos en *single carrier*. La figura 4.15 lo demuestra.

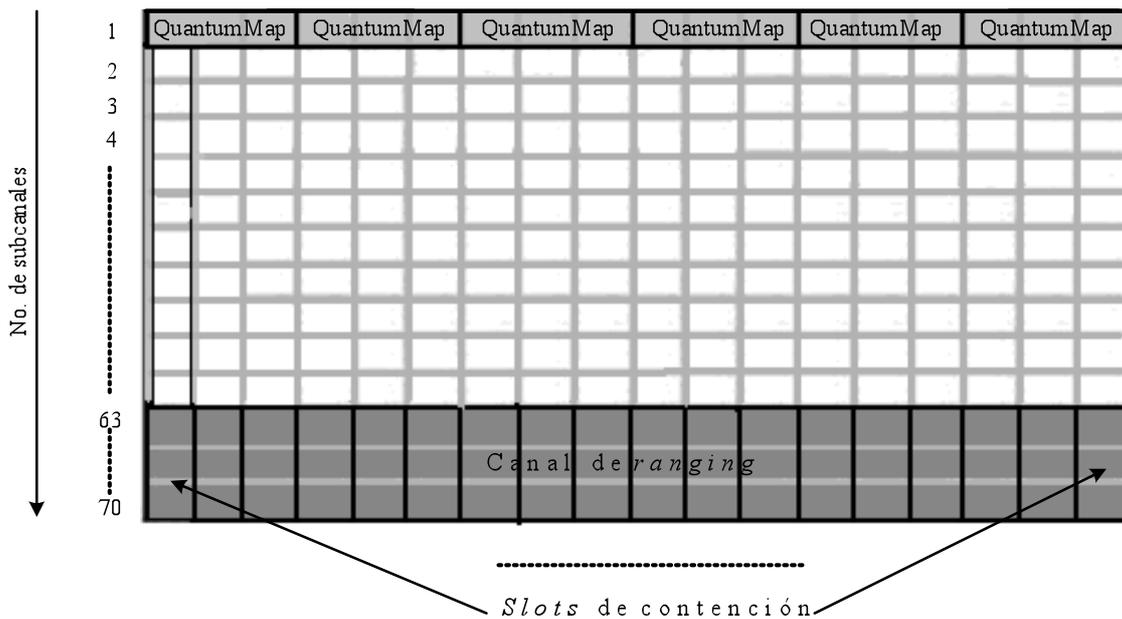


Figura 4. 15. Visualización de los *QuantumMaps* y los *slots* de contención.

Como se observa en la figura 4.15, por cada subcanal lógico se tienen 6 *QuantumMap*. Por lo tanto, en la región de datos tendríamos 372 *QuantumMaps* o 372 *slots* de Datos (6 *QuantumMaps* por 62 subcanales lógicos). Ahora, sólo falta agregar los 18 *slots* de contención (*C*) que tiene el *sub-frame Uplink* y obtener el total de *slots* (*M*) que tiene un *frame* OFDMA.

$$\begin{aligned}
C &= 18 \\
M &= 372 + C \\
M &= 372 + 18 \\
M &= 390 \text{ slots en un sub-frame Uplink OFDMA}
\end{aligned}
\tag{42}$$

Sólo falta calcular los parámetros x e i .

Si se quiere transmitir un paquete de datos se debe calcular el número necesario de *QuantumMaps*, por lo tanto, es primordial conocer el tamaño del paquete, la codificación y el tipo de modulación usada.

Para saber el tamaño del paquete, se usará el paquete de VoIP que produce un codificador G711, el tamaño es de 80 Bytes. Cuando pasa por todas las capas y llega hasta la capa MAC es de 126 Bytes. La figura 4.16 muestra todos los encabezados que se le fueron agregando en su recorrido, hasta llegar a la capa MAC.

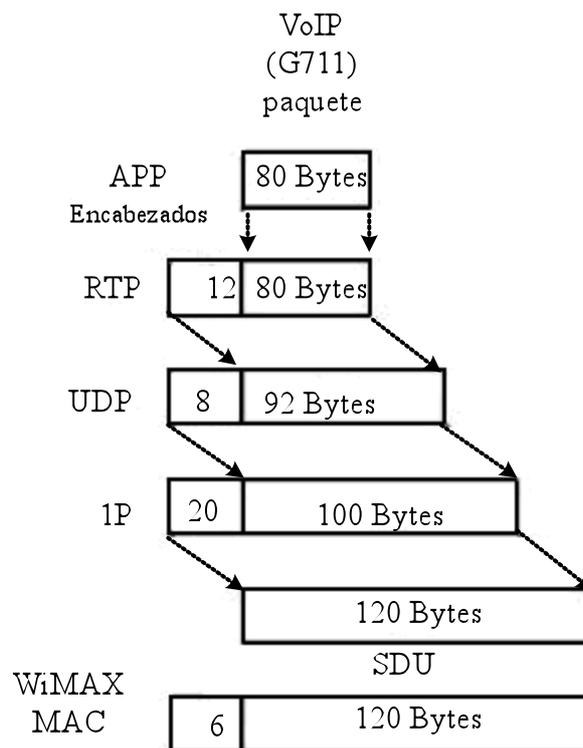


Figura 4.16. Tamaño de un paquete de VoIP hasta llegar a la capa MAC.

Una vez obtenido el tamaño del paquete en la capa MAC, se procede a calcular el número de *QuantumMaps* (X) que se necesitan para poder transmitir dicho paquete. Para este fin se emplea la siguiente ecuación:

$$X = \left\lceil \frac{\text{Tamanodelpaquete} * 8}{\text{Modulacion}(\text{Codificacion})(48)} \right\rceil \quad (43)$$

El resultado se redondea hacia arriba, ya que no es posible enviar fracciones de *QuantumMaps*.

Si a la ecuación (43) se redondea hacia arriba y se multiplica por 48, obtenemos el número de símbolos que el paquete requiere para ser transmitido.

Como se puede apreciar, el valor de X depende de tres parámetros importantes: el tamaño del paquete en Bytes, el tipo de modulación y codificación usada.

Tomando el promedio de varios experimentos realizados con los programas, se observa que el retardo promedio i puede ser muy bien aproximado con la siguiente ecuación:

$$i = 1 * M \quad (44)$$

Los parámetros de EBA_i, de EBA_t y de w son calculados de igual forma que en el capítulo tres.

Ahora, se procederá a obtener el modelo de ecuaciones en diferencias. El procedimiento es similar que en el capítulo tres, a excepción de los códigos CDMA empleados para las peticiones de ancho de banda que han sido enviados por las SSs hacia la BS. Por lo tanto, a la ecuación (21) se le hará una pequeña modificación que es:

$$P_S = \binom{\bar{n}}{1} \frac{1}{C * Cod} \left(1 - \frac{1}{C * Cod} \right)^{\bar{n}-1} \quad (45)$$

La variable *Cod* hace referencia al número de códigos utilizados para enviar peticiones de ancho de banda. El cual fue configurado con el valor de 64.

Al mismo tiempo, el número esperado de SSs que transmiten un REQ exitosamente en el actual *UL-Frame* puede ser calculado de la siguiente forma:

$$\bar{s} = C * Cod * P_S. \quad (46)$$

Ahora, sustituyendo las ecuaciones (45), (29), (30) y (46) en (23). Se procede a realizar operaciones de álgebra y se obtiene un modelo matemático de ecuaciones en

diferencias³, con el fin de calcular la eficiencia de un sistema basado en la capa PHY *WirelessOFDMA*.

$$P_{SC_{n+1}} = \begin{cases} \left(1 - \frac{1}{C * Cod}\right) \frac{C * N}{P_{SC_n}(\beta + \lambda_n)}^{-1}, & EBAi + \alpha \leq EBA_t \\ \left(1 - \frac{1}{C * Cod}\right) \frac{C * N}{P_{SC_n}(\beta + \delta_n)}^{-1}, & EBAi + \alpha > EBA_t \end{cases} \quad (47)$$

Los resultados obtenidos serán mostrados en el capítulo 5.

³ Ver apéndice C



Capítulo 5

Resultados Obtenidos

Esta sección está dividida en dos. La primera parte muestra los resultados usando la capa PHY *Single Carrier* y la segunda presenta los resultados usando la capa PHY *WirelessMAN OFDMA*.

5.1 Resultados para Single Carrier

5.1.1 Análisis y resultados con paquetes de tamaño fijo 300 Bytes y frames de 2 milisegundos

Una vez obtenido el modelo matemático basado en ecuaciones en diferencias, se cuenta con una herramienta teórica que puede determinar el valor de las variables del ciclo de transmisión de un paquete en una red, basada en IEEE 802.16.

En esta sección, los resultados numéricos se obtendrán de manera teórica, los cuales serán comparados con el simulador *OPNET Package v.11* que se basa en el protocolo IEEE 802.16. Todo con el propósito de comparar el modelo teórico obtenido y poder observar su confiabilidad, al mismo tiempo, se realizará una comparación con el trabajo [7].

Para el modelo de simulación, se hizo uso de una red con las siguientes características:

- 100 SSs distribuidas en forma aleatoria en una célula con radio de 5km.
- El tamaño de los slots fue configurado en 16 Bytes.
- *UL-frame* configurado con $M=450$ *minislots*.
- Todas las SSs usan tráfico del tipo BE.

El tráfico utilizado por las SSs activas fue *Constant Bit Rate* (CBR), este último creó paquetes de 300 Bytes en la capa MAC; con un tiempo constante de llegadas que tienen un valor $\bar{\tau}$. Cuando el paquete es codificado en la capa PHY, se transforma en 21 *slots* ($\bar{x}=21$). Para todo esto se usa *Reed Solomon paridad* de 10 Bytes, un *codeword* de 255 Bytes, un preámbulo de 6 Bytes y una banda de guarda de 4 Bytes.

La simulación fue hecha para 30, 51 y 72 *slots* de contención. La siguiente tabla muestra todos los parámetros configurados.

TABLA PARÁMETROS DE SIMULACIÓN	
Parámetros	Valor
<i>Slots</i> de contención en un <i>UL-frame</i> (<i>C</i>)	30, 51 y 72
Tamaño del <i>UL slot</i>	16 Bytes
Duración del <i>UL-frame</i>	2 ms
<i>Slot</i> por <i>UL-frame</i> (<i>M</i>)	2 ms / 450 <i>slots</i>
Tiempo de simulación por cada corrida	60s
Distancia de cobertura de la BS	0.1 - 5 km
<i>Reed Solomon</i> (corto <i>grants</i> /largo <i>grants</i>)	6 Bytes/ 10 Bytes
Límite entre los cortos y largos <i>grants</i>	245 Bytes
Máximo número de SSs en la red (<i>N</i>)	100
Tipo de tráfico	<i>Constant Bit Rate</i>
Tamaño del paquete / \bar{x}	300 Bytes / 21 <i>slots</i>

Tabla 5. 1. Parámetros de configuración para la simulación.

El modelo teórico fue configurado con una probabilidad inicial de contención exitosa ($P_{sc}=0.5$) y con un retardo inicial de $W_0=1$. En la parte del *EBA*, el *EBA_t* y el *EBA_i* fueron configurados con los valores 10 y 5 respectivamente.

Se analizó el rendimiento de la red en función del número SSs activas. Las figuras 5.1, 5.2 y 5.3 muestran el rendimiento máximo del sistema en función del número de SSs. En las figuras se incluyen los resultados de [12], con el fin de observar y comparar el impacto que tiene el rendimiento de la red, una vez que se implementa el *EBA* en la capa MAC. Los *slots* de contención son el parámetro de variación.

Para un pequeño número de *slots* de contención ($C=30$), se observa que la eficiencia del sistema es estable y aproximadamente del 50%. Lo anterior sucede cuando se tienen 44 SSs activas. Comparando con [12], se observa una diferencia considerable en la eficiencia del sistema, esto se debe a la implementación del *EBA* en la capa MAC, como explicamos anteriormente el *EBA* impide que los usuarios tengan colisiones frecuentes y de esta forma la eficiencia de la red mejora considerablemente.

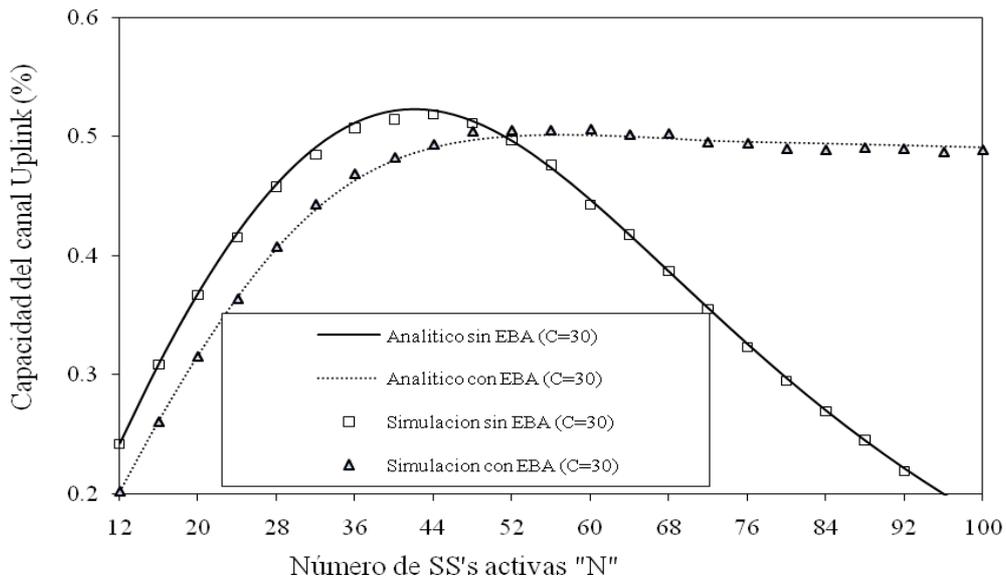


Figura 5. 1. Capacidad del canal *Uplink* con $c=30$ para un *subframe* 2 ms.

Incrementando C a 51 *slots* de contención, se observa en la figura 5.2 que la eficiencia del sistema se incrementa considerablemente cerca del 87%, en esta simulación apenas y se alcanza a notar el beneficio del EBA, esto se debe a que los *slots* de contención se incrementaron reduciendo considerablemente el número de colisiones de las SSs.

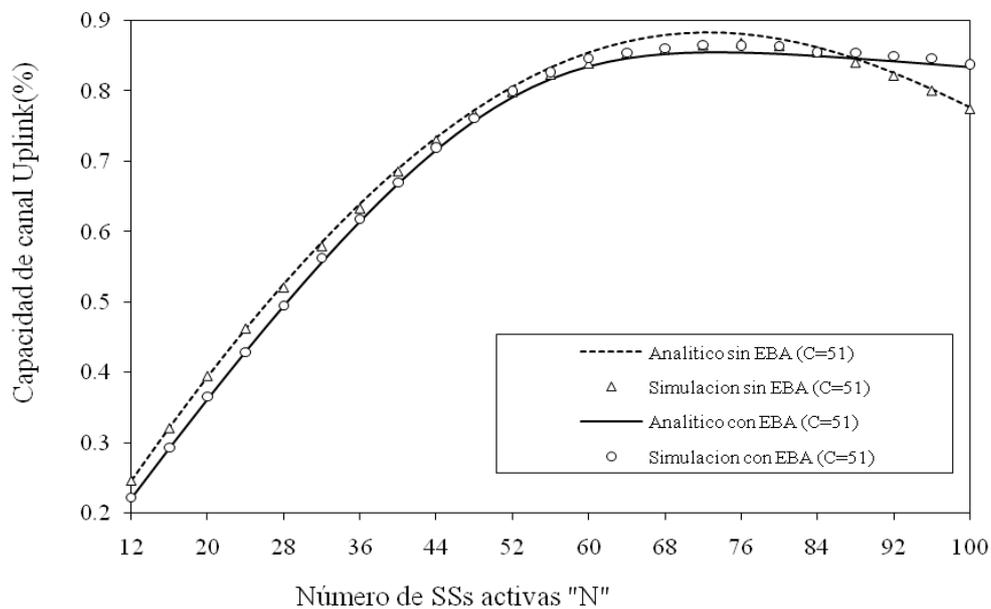


Figura 5. 2. Capacidad del canal *Uplink* con $c=51$ para un *subframe* 2 ms.

En la figura 5.3 se puede observar que cuando $C=72$, los dos modelos analíticos (con y sin EBA [12]) obtienen los mismos resultados, ya que se tienen más *slots* de contención en el *frame* y por lo tanto, la probabilidad de colisión tiende a cero cuando las SSs envíen sus peticiones de ancho de banda hacia la BS. La eficiencia del sistema está por arriba del 80%.

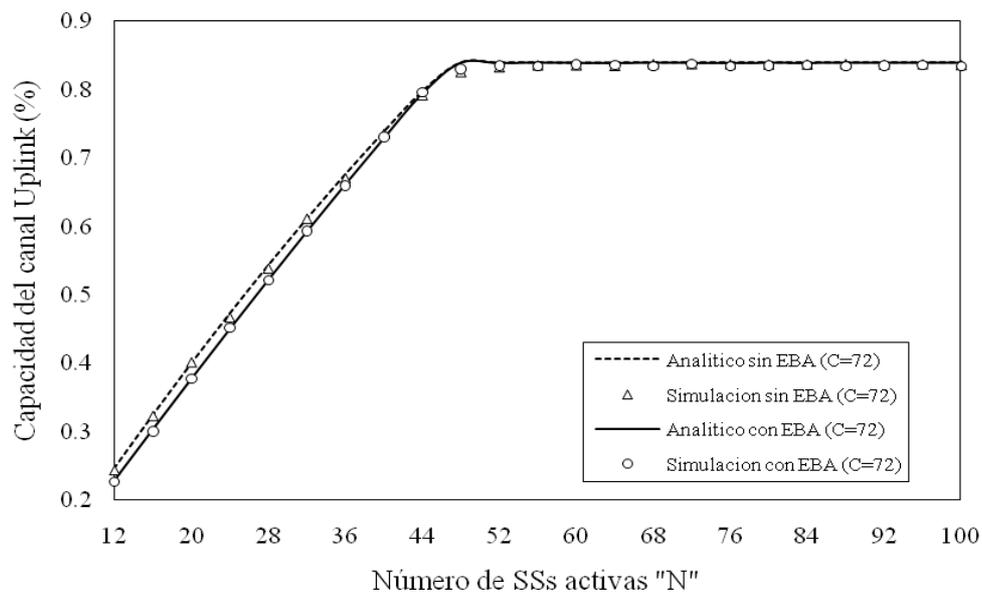


Figura 5. 3. Capacidad del canal *Uplink* con $c=72$ para un *subframe* 2 ms.

Los valores obtenidos con el simulador y con el modelo analítico son aceptables, en la gráfica 5.4 se aprecia la desviación entre ambos modelos; la mayor desviación que tenemos es de 1.5%.

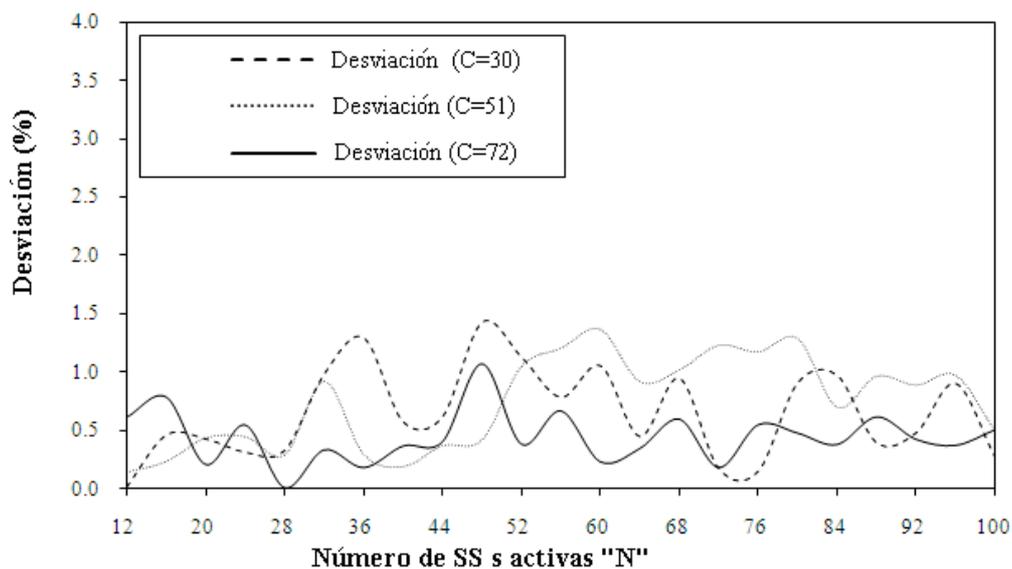


Figura 5. 4. Desviación del Modelo Teórico vs Modelo de Simulación.

Otro dato importante que debe considerarse al momento de diseñar una red, es el retardo presente en el ciclo de transmisión.

En las figuras 5.5(a) y 5.5(b) se muestra el retardo en *slots* y en milisegundos en un ciclo de transmisión respectivamente, para la misma cantidad de *slots* de contención y de tamaño de paquete que es de 300 Bytes.

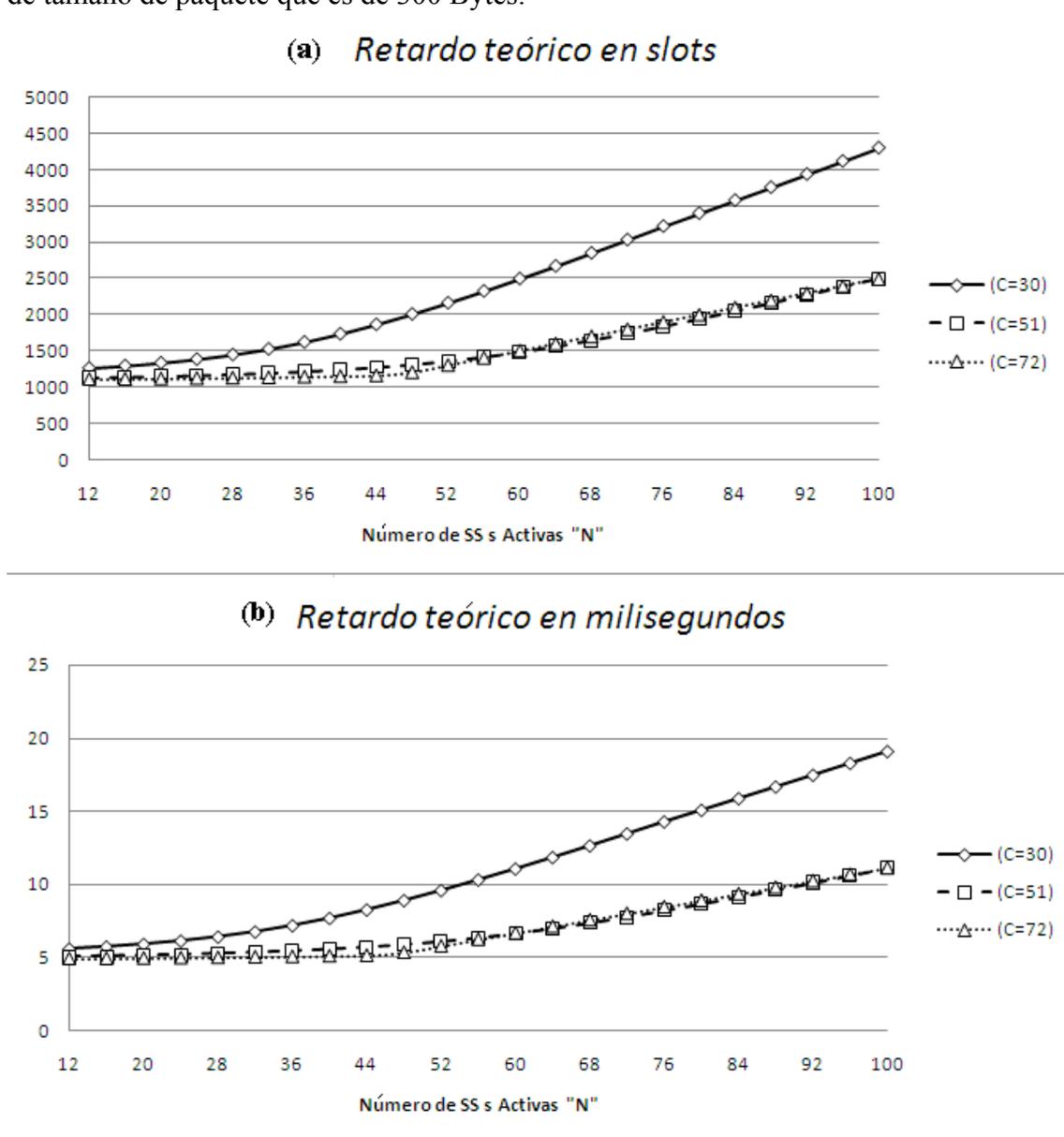


Figura 5. 5. Retardo para un *subframe* de 2 ms.

Se observa en las gráficas que para el frame con $C=30$ hay un incremento significativo, porque cuando el número de usuarios va aumentando, los treinta *slots* de contención llegan a ser un poco insuficientes para el número de usuarios activos y se empieza a producir colisiones. Esto se traduce en un dramático incremento en el retardo.

Por el contrario, para el *frame* con (C=51) y (C=72) casi no hay colisiones, a pesar del número de usuarios utilizados en el modelo analítico (100 en este caso) y esto se traduce en pequeños incrementos en el retardo.

Para la conversión de *slots* a milisegundos, se procede a dividir la duración del *frame* 2[ms] entre el número de *slots* en el *frame* (450 *slots*). Una vez realizado esto, se obtiene que cada *slot* tiene una duración de 4.4 [μs]. Ahora, sólo hay que multiplicar este tiempo por el número de *slots* que hay en cada ciclo de transmisión, de esta manera obtenemos el retardo en milisegundos.

Se anexan, con fines ilustrativos, los resultados numéricos de las gráficas anteriormente obtenidas (gráficas de eficiencia y retardo). Debido a la extensión de los datos y a la cantidad de variantes que se irán aplicando posteriormente al modelo analítico de ecuaciones en diferencias, éste será el único caso en el cual se mostrarán los resultados teóricos completos (tablas 5.2 y 5.3). En los demás experimentos sólo se mostrarán las gráficas.

	C=30		C=51		C=72	
	Analítico	Simulación	Analítico	Simulación	Analítico	Simulación
12	0.2016755	0.2017027	0.2224191	0.2221	0.22846	0.22708
16	0.2616495	0.260456	0.2937962	0.2931	0.30315	0.3008
20	0.3164803	0.31514	0.3633927	0.36499	0.37697	0.37776
24	0.364991	0.36386	0.4308798	0.42896	0.44982	0.45227
28	0.4060121	0.407344	0.4958221	0.49437	0.52157	0.52163
32	0.4387469	0.4430907	0.5576816	0.56287	0.59206	0.59404
36	0.4630977	0.4691587	0.615757	0.6176	0.66111	0.65991
40	0.4799099	0.4826733	0.6691973	0.67049	0.72848	0.73115
44	0.4906144	0.4936493	0.7170059	0.71967	0.79385	0.79706
48	0.4968747	0.504056	0.7581371	0.76135	0.8394	0.83057
52	0.4999676	0.5056707	0.791698	0.8001	0.83912	0.83593
56	0.5011334	0.5050827	0.817332	0.82729	0.83991	0.83438
60	0.5008393	0.5061653	0.8352359	0.84679	0.83957	0.83764
64	0.4997474	0.5019933	0.8465516	0.8544	0.83925	0.83637
68	0.4981189	0.5028707	0.8526618	0.86145	0.83985	0.8349
72	0.4962384	0.4953947	0.8549149	0.86556	0.83952	0.83798
76	0.4952314	0.4944987	0.8546508	0.86479	0.83921	0.83466
80	0.4945916	0.4901493	0.8527471	0.86387	0.8397	0.83573
84	0.4938824	0.4891413	0.8497723	0.85577	0.8394	0.83624
88	0.4930481	0.49112	0.8461373	0.85439	0.83983	0.83472
92	0.4923688	0.490028	0.8423035	0.84986	0.83954	0.83601
96	0.4914772	0.487088	0.8381354	0.84637	0.83992	0.83682
100	0.4906517	0.4893373	0.8339118	0.83812	0.83964	0.83544

Tabla 5. 2. Eficiencia Normalizada del Sistema con paquetes fijos de 300Bytes y *frames* de 2 milisegundos con EBA.

	<i>Retardo en Slots</i>			<i>Retardo en milisegundos</i>		
	C=30	C=51	C=72	C=30	C=51	C=72
12	1258.1331	1135.5958	1103.8829	5.5917026	5.0470923	4.9061461
16	1290.5736	1145.1181	1108.203	5.7358827	5.0894139	4.9253465
20	1330.7234	1156.058	1112.9654	5.9143262	5.1380358	4.9465128
24	1380.8887	1168.7306	1118.2429	6.1372832	5.1943583	4.9699684
28	1443.7499	1183.5872	1124.1173	6.4166662	5.2603877	4.9960771
32	1522.0097	1201.1948	1130.7155	6.7644875	5.3386434	5.0254024
36	1617.6001	1222.2833	1138.1681	7.189334	5.4323703	5.058525
40	1730.8498	1247.8553	1146.6676	7.6926657	5.5460237	5.0963006
44	1860.5172	1279.1168	1156.4441	8.2689654	5.6849637	5.1397515
48	2004.0205	1317.5134	1200.3817	8.9067577	5.8556153	5.3350297
52	2158.7392	1364.462	1300.3867	9.5943964	6.0642754	5.7794964
56	2322.5136	1421.2186	1400.3914	10.322283	6.316527	6.223962
60	2492.5886	1488.3359	1500.396	11.078172	6.6148263	6.6684265
64	2668.7037	1565.4073	1600.4003	11.860905	6.9573658	7.1128903
68	2848.3488	1651.1606	1700.4045	12.659328	7.3384918	7.5573532
72	3032.3804	1744.1231	1800.3965	13.477246	7.7516582	8.0017621
76	3217.5305	1842.6843	1900.3988	14.300135	8.1897081	8.446217
80	3396.5886	1945.4829	2000.4011	15.095949	8.6465906	8.8906713
84	3575.8739	2052.0136	2100.4032	15.892773	9.1200604	9.3351251
88	3755.9249	2161.0277	2200.4052	16.692999	9.6045678	9.7795784
92	3936.8244	2272.0588	2300.407	17.496997	10.098039	10.224031
96	4118.5399	2384.8435	2400.4089	18.304622	10.599305	10.668484
100	4301.04	2499.0074	2500.4106	19.115733	11.1067	11.112936

Tabla 5. 3. Retardo en *slots* y milisegundos de una red *WiMAX*, manteniendo el tamaño del paquete en 300 Bytes y variando los *slots* de contención con EBA.

5.1.2 Análisis y resultados con paquetes de tamaño variable y frames de 2 milisegundos

En la parte anterior del trabajo, se ha estudiado el comportamiento de una red *WiMAX* variando el número de *slots* de contención, pero en esta parte se procedió a hacer un estudio más detallado de la red, por eso el tamaño de los paquetes se variaron y fueron de: 100, 128, 256, 300, 512, 1024 y 1500 Bytes.

La idea de este estudio fue tener en una sola gráfica el comportamiento del sistema cuando son transmitidos paquetes de diferente tamaño, pero con un número de *slots* de contención fija (C=30, C=51 y C=72).

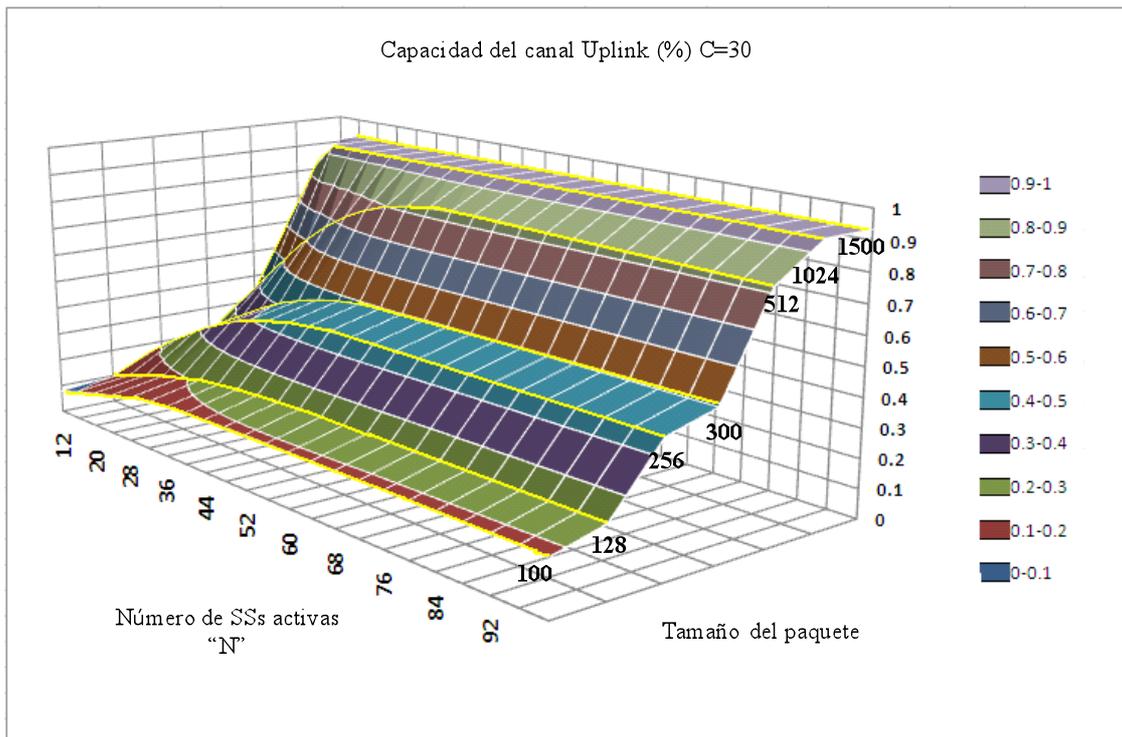


Figura 5. 6. Capacidad del canal *Uplink* con $c=30$ variando el tamaño del paquete.

La figura 5.6 muestra la eficiencia del sistema para $C=30$. Se observa que ésta es muy parecida para paquetes grandes (1024 y 1500 Bytes), mientras que para paquetes de 512 Bytes y menores, la eficiencia del sistema es muy similar, es decir, comienzan con poca eficiencia pero se va incrementando hasta llegar a un punto donde es máxima (este punto varía dependiendo del tamaño del paquete). Una vez llegado a este punto, la eficiencia del sistema se mantiene debido a la implementación del EBA para resolver colisiones. En [12] cuando la eficiencia llegaba a su punto máximo, después comenzaba a descender debido a la cantidad de colisiones producidas y porque no fue implantado el algoritmo EBA para resolverlas.

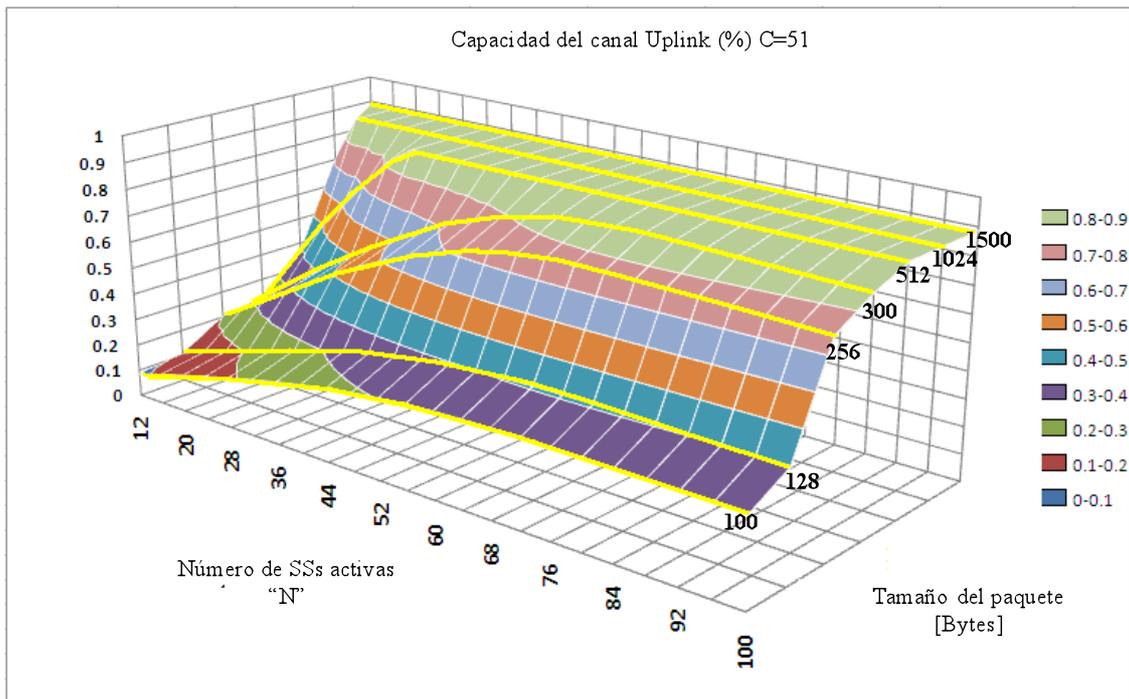


Figura 5. 7. Capacidad del canal *Uplink* con $c=51$ variando el tamaño del paquete.

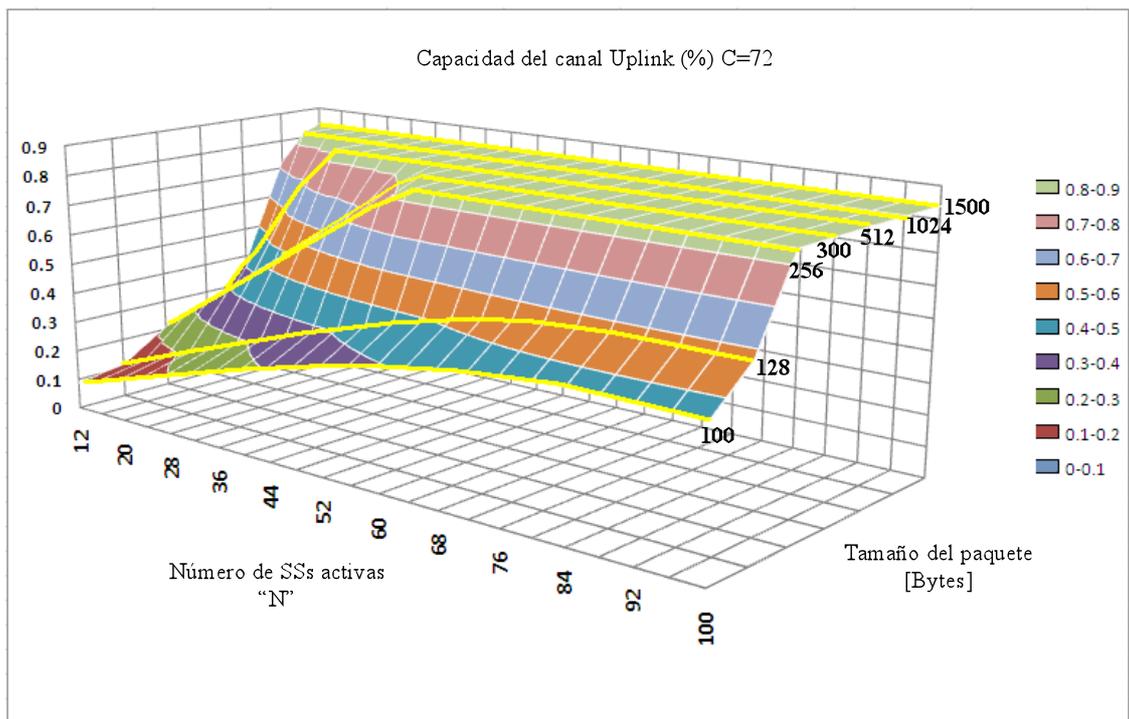


Figura 5. 8 Capacidad del canal *Uplink* con $c=30$ variando el tamaño del paquete.

En la figura 5.7, la eficiencia del sistema para $C=51$ tiene un comportamiento parecido a la figura 5.6, la discrepancia es que la eficiencia es mejor con paquetes de 300 Bytes en adelante. En la figura 5.8, el sistema con $C=72$ muestra que aunque se tengan paquetes pequeños (256 Bytes en adelante) la eficiencia del sistemas es óptima.

En conclusión, podemos decir que si se aumenta el número de *slots* de contención, la eficiencia del sistema será muy buena para los paquetes de tamaño pequeño; por el contrario, si los *slots* de contención son pocos y el tamaño del paquete es pequeño, la eficiencia del sistema no será la adecuada. En general, si ocupamos tamaños grandes de paquetes siempre tendremos una eficiencia óptima en el sistema, independientemente de los *slots* de contención que se tengan.

La Figura 5.9 muestra el retardo que genera los diferentes tamaños de paquetes en un ciclo de transmisión; se puede concluir que aunque la eficiencia del sistema es muy buena y constante con paquetes de tamaño grande, el retardo aumenta considerablemente.

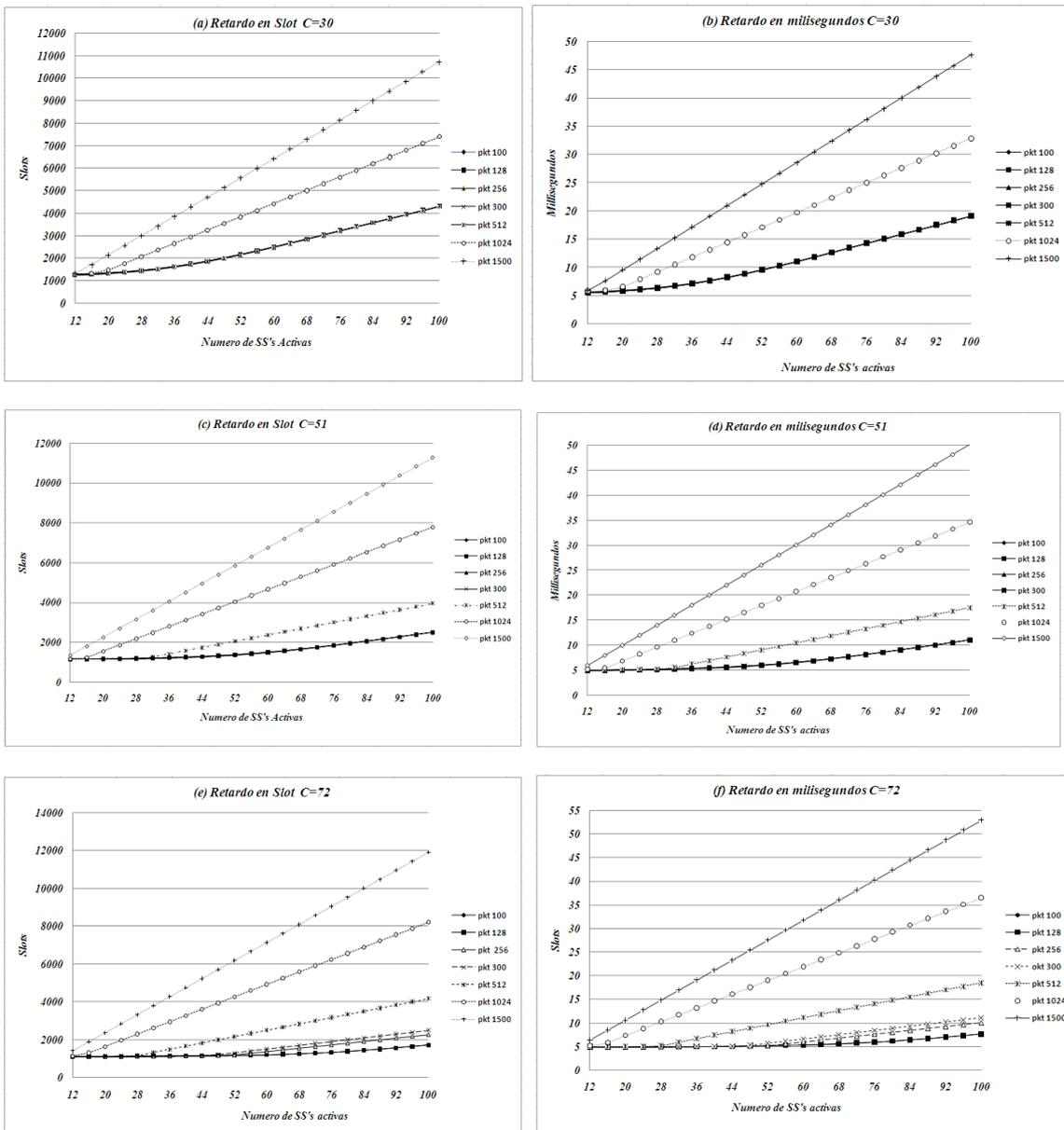


Figura 5. 9. Retardo en *slots* y milisegundos.

5.1.3 Análisis y resultados con paquetes de tamaño variable y frames de 1 milisegundo

En la figura 5.10 se muestra que el único parámetro modificado fue el tamaño del *frame* ($M=225$), este valor corresponde cuando tienen una duración de 1[ms].

Las figuras 5.9, 5.10 y 5.11 muestran los resultados de los escenarios una vez reproducidos con el nuevo valor de M .

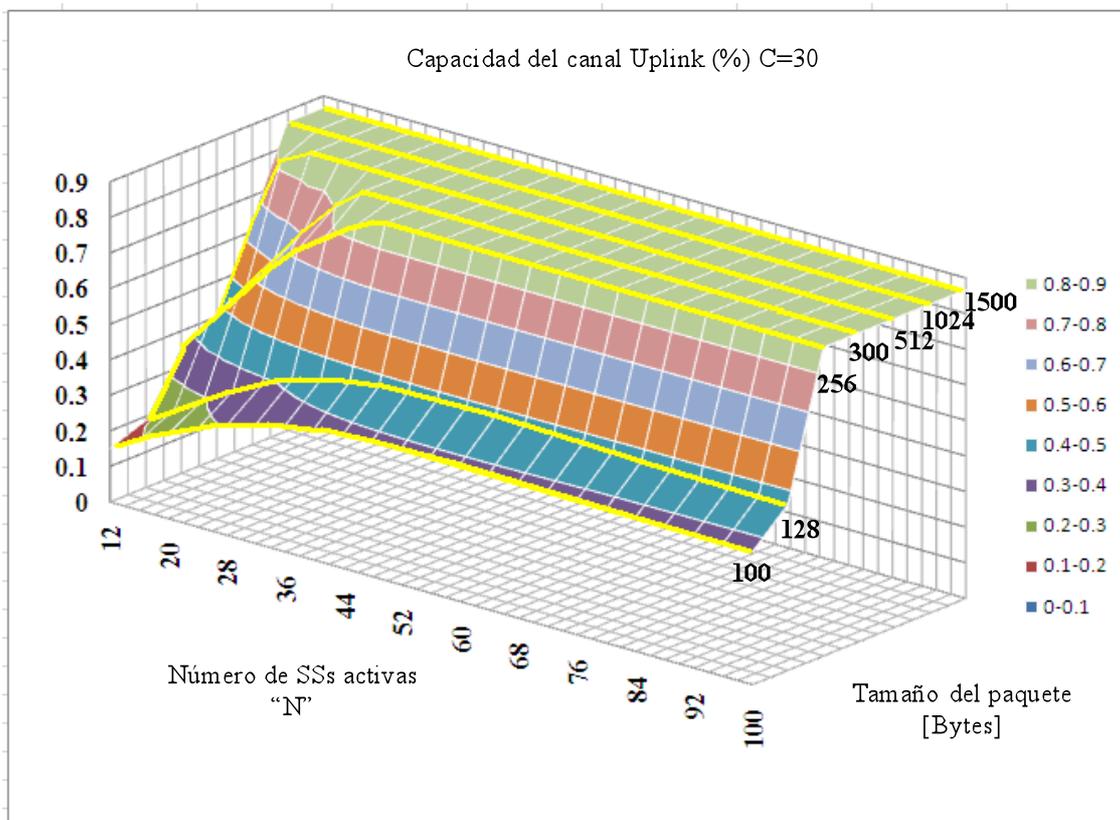


Figura 5. 10. Capacidad del canal *Uplink* con $C=30$ variando el tamaño del paquete.

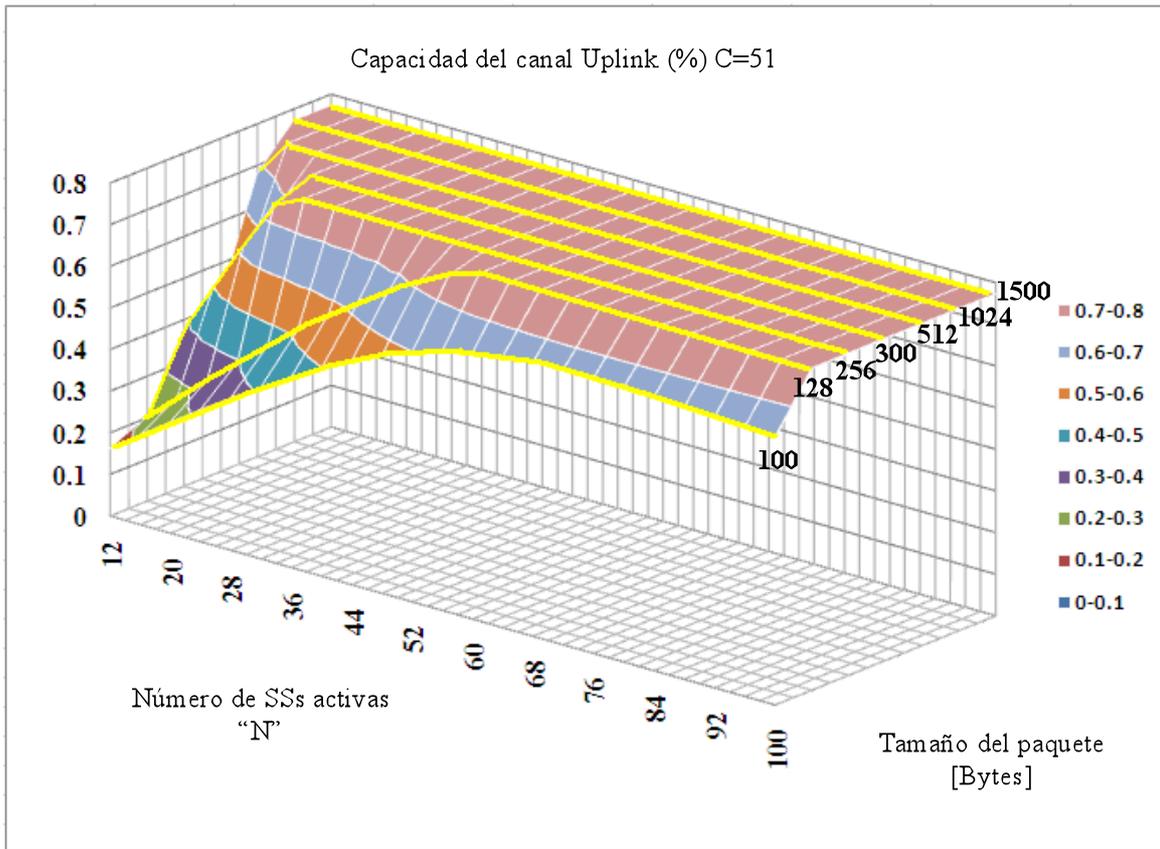


Figura 5. 11. Capacidad del canal *Uplink* con $C=51$ variando el tamaño del paquete.

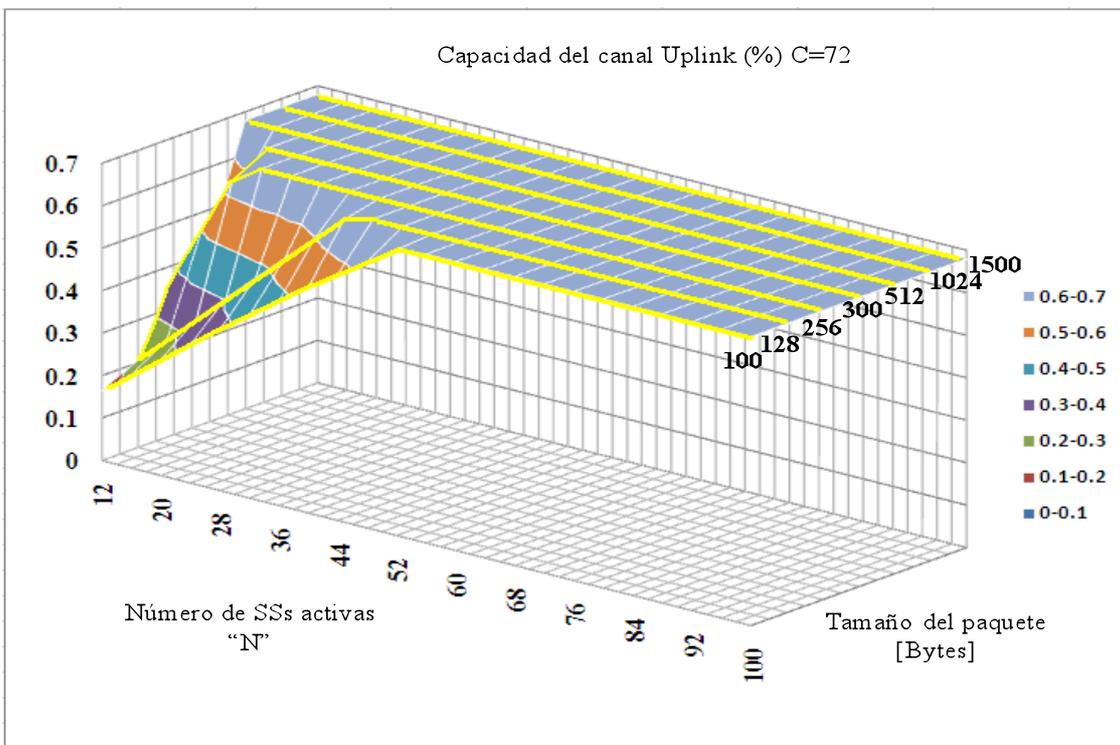


Figura 5. 12 Capacidad del canal *Uplink* con $c=30$ variando el tamaño del paquete

Como se puede apreciar en las gráficas 5.10, 5.11 y 5.12, la eficiencia del sistema se logra más rápido con paquetes de tamaño pequeño, la razón es porque en un *frame* de 1 [ms] se desperdician menos *slots* de datos que cuando son enviados paquetes grandes. Para explicar lo anterior se tiene el siguiente ejemplo:

Se tiene un *frame* de 2[ms] que tiene un total de 450 *slots* ($M=450$). Una parte de ellos son para el bloque de contención ($C=30$, $C=51$ y $C=72$), si enviamos un paquete de 300 Bytes se ocupan 21 *slots* de datos, por consiguiente son desperdiciados 429 *slots*. Pero cuando se envía la misma cantidad de *slots* en un *frame* de de 1[ms], sólo son desperdiciados 204. En conclusión, en *frames* de 1 [ms] es más rápido alcanzar una mejor eficiencia con paquetes pequeños, ya que se hace un menor desperdicio de recursos.

Las graficas 5.13. Muestran los retardos para un *frame* de un milisegundo variando los *slots* de contención.

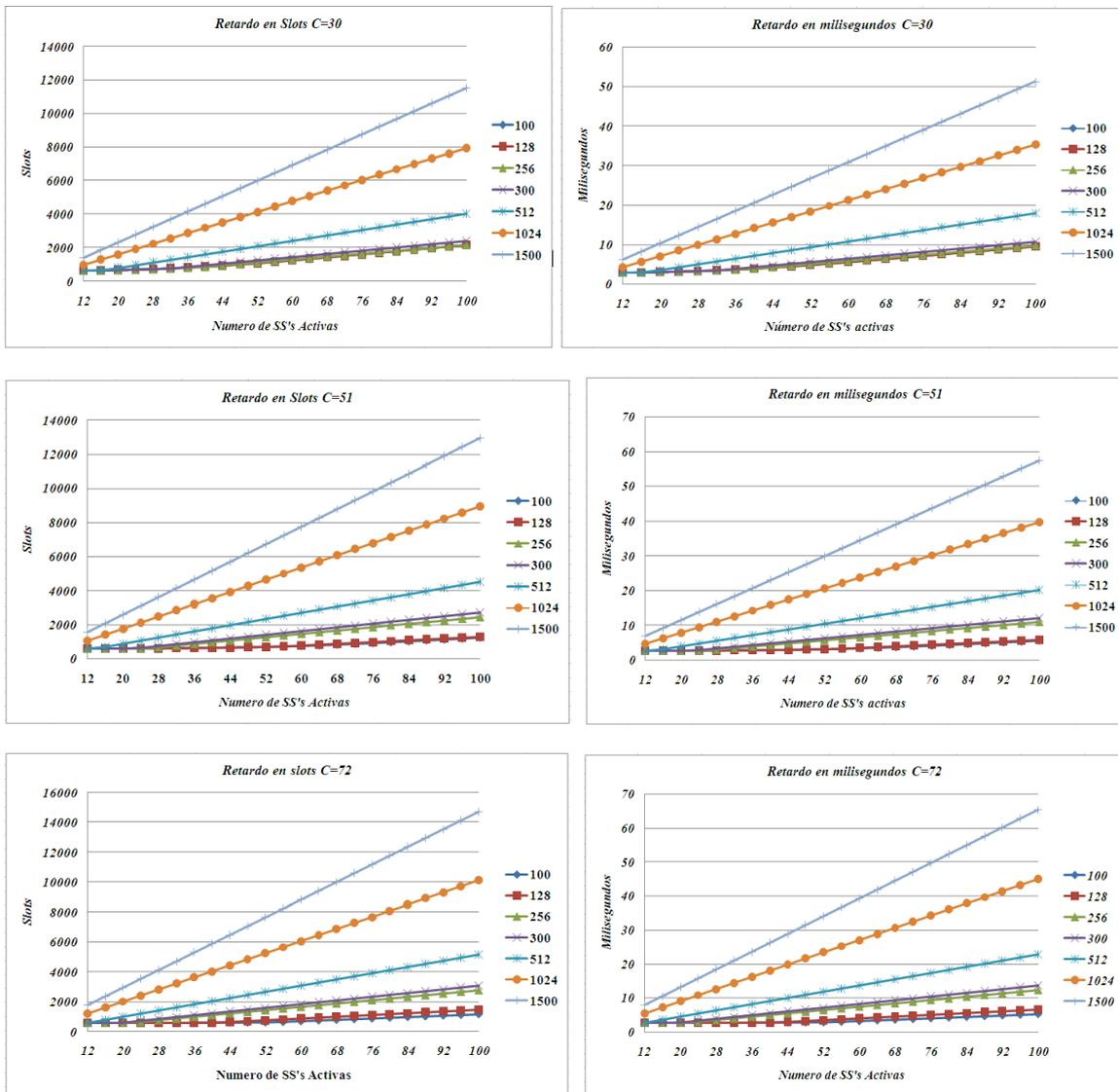


Figura 5. 13. Retardo en *slots* y milisegundo.

5.2 Resultados para WirelessMAN OFDMA

5.2.1 Throughput para un paquete VoIP G711 con 64QAM3/4

Para poder comparar el modelo teórico obtenido (ecuación 47, ver apéndice C) para la capa PHY WirelessMAN OFDMA, primero se procederá a calcular el *throughput* de un sistema WiMAX móvil en forma directa y después será comparado con el modelo teórico.

En los cálculos realizados siempre se utilizó un paquete de VoIP G711 que al emplearlo en la ecuación (43), muchas veces tenía la siguiente repercusión: al tener que redondear hacia arriba se perdía un determinado número de símbolos en el *QuantumMap*, esta pérdida se ve reflejada en el *throughput* del sistema.

A continuación se explicará detalladamente el cálculo del *throughput* en forma directa para un paquete de VoIP usando una Modulación de 64QAM y una codificación de 3/4.

Primero se calcula el número de *QuantumMaps* que son necesarios para transmitir un paquete de VoIP con la ecuación (43), una vez calculado este parámetro se multiplica por 48 (es el número de símbolos que hay en un *QuantumMap*) para obtener el número de símbolos que son requeridos para transmitir un paquete VoIP. Una vez hecho esto, se procede a realizar nuevamente el cálculo con la ecuación (43), pero ahora sin redondear (sin cuantificar); esto se realiza con el fin de saber cuántos símbolos son desperdiciados cuando se cuantifica. La tabla 5.4 muestra el resultado de dichos cálculos.

	Símbolos
Con cuantificación	240
Sin cuantificar	224

Símbolos desperdiciados → 16

Tabla 5. 4. Cálculo de los símbolos con y sin redondeo en la ecuación 43.

Entonces, cada paquete de VoIP modulado y codificado con 64QAM_{3/4} desperdicia 16 símbolos al ser cuantificado, el número de usuarios que se pueden transmitir en un *sub-frame Uplink* varía si el paquete se cuantifica o no.

El número total de símbolos para transmitir datos en el *sub-frame Uplink* es de 17856 símbolos considerando la figura 4.16. Ahora, para calcular el número máximo de usuarios se hace lo siguiente: se divide el número total de símbolos entre el número de símbolos que se tienen con y sin cuantificar del paquete VoIP; el resultado se multiplica por dos (un paquete de VoIP es generado cada 10 [ms] y la duración del *frame* es de 5[ms]).

La tabla 5.5. Muestra el máximo de usuarios en ambas formas.

	No. de usuarios máximo
paquete cuantificado	148
paquete no cuantificado	158

Tabla 5. 5. Número máximo de usuarios empleando 64QAM_{3/4}.

El número 148 representa el valor real del máximo de usuarios, pero primero se obtendrá el *throughput* con 158 usuarios, para comparar cuánto se desperdicia al cuantificar.

Para obtener el *throughput* del sistema, se multiplica el tipo de modulación empleada por el número de símbolos del paquete (con y sin cuantificar), el resultado se vuelve a multiplicar por el número de usuarios que en ese momento estén activos en la red y se divide entre 10[ms] que es el tiempo de un paquete VoIP.

$$\text{Throughput} = \frac{(\text{Modulacion}) \times (\text{No. de simbolos del pkt}) \times (\text{No. de usuarios})}{10 \times 10^{-3}} \quad (48)$$

Con la ecuación (48) se tiene una forma más simple de calcular el *throughput* del sistema y a su vez, sirve para compararlo con el que generó el modelo matemático de ecuaciones en diferencias (ecuación 47). La finalidad de todo esto es comprobar si este modelo es aceptable.

Ahora, se debe imaginar que: los 70 subcanales lógicos del *sub-frame Uplink* (no existe la región de *ranging*) son para transmitir datos, entonces el *throughput* máximo que puede generar la red para paquetes de VoIP estaría dado por la ecuación de abajo.

$$\begin{aligned} \text{Throughput máximo} &= (70)(16)(18)(6)(200) \\ \text{Throughput máximo} &= 24192000 \text{ [bits/seg]} \end{aligned} \quad (48)$$

Aquí, el número 70 hace referencia a los subcanales lógicos; el 16, al número de subportadoras que hay en un subcanal lógico; el 18, al número de Símbolos OFDMA que hay en un *sub-frame Uplink*; el 6, al tipo de modulación usada (64QAM para este caso) y el 200, al número de *sub-frames Up Link* que hay en un segundo.

Por otro lado, la pérdida por cuantificación es notoria sólo en algunas circunstancias, todo depende del tamaño del paquete en Bytes, el tipo de modulación y codificación empleada. En ocasiones el paquete no da un número entero de *QuantumMaps* y al redondear hacia arriba para no tener fracciones de estos, se produce la pérdida. Es lógico que si no se cuantifica cabrían un mayor número de usuarios en el *sub-frame Uplink*.

El factor de cuantificación Q es calculado mediante la ecuación:

$$Q = \frac{\text{Pkt en simbolos sin redondear} * 100}{\text{pkt en simbolos redondeado}} - 100 \quad (49)$$

Haciendo uso de los valores de la tabla 5. 4 con 158 usuarios se tiene que el valor de Q es:

$$Q=7.1428571$$

Al multiplicar el factor Q por el *throughput* de paquetes sin cuantificar obtenemos como resultado: el *throughput* de paquetes cuantificados. Como lo muestra la figura 5.14.

Ahora, el modelo matemático de ecuaciones en diferencias sólo calcula la eficiencia del sistema. Para conseguir el *throughput* fue necesario obtener del programa el retardo total de cada ciclo de transmisión t , el valor de t se divide entre M , para saber el número de *sub-frames Uplink* que fueron usados en ese ciclo de transmisión. Una vez obtenido el número de *sub-frames Uplink* se multiplica por la duración del *frame* que es de 5[ms], de esta forma se obtiene el tiempo en segundos para cada ciclo de transmisión t . Pero falta calcular los *bits* transmitidos; el tamaño del paquete VoIP en

bits es dividido entre la multiplicación de la modulación por la codificación, como lo muestra la siguiente ecuación:

$$\text{Bits transmitidos} = \frac{\text{tamano del paquete VoIP} * 8}{(\text{Modulacion})(\text{Codificacion})} \quad (50)$$

Una vez obtenidos los *bits* transmitidos por usuario, éste se multiplica por la modulación y el número de usuarios activos en ese momento en la red, después se divide entre el valor *t* calculado en segundos para el mismo número de usuarios.

$$\text{Throughput} = \frac{(\text{Bits transmitidos})(\text{No. de usuarios en la red})(\text{Modulacion})}{t} \quad (51)$$

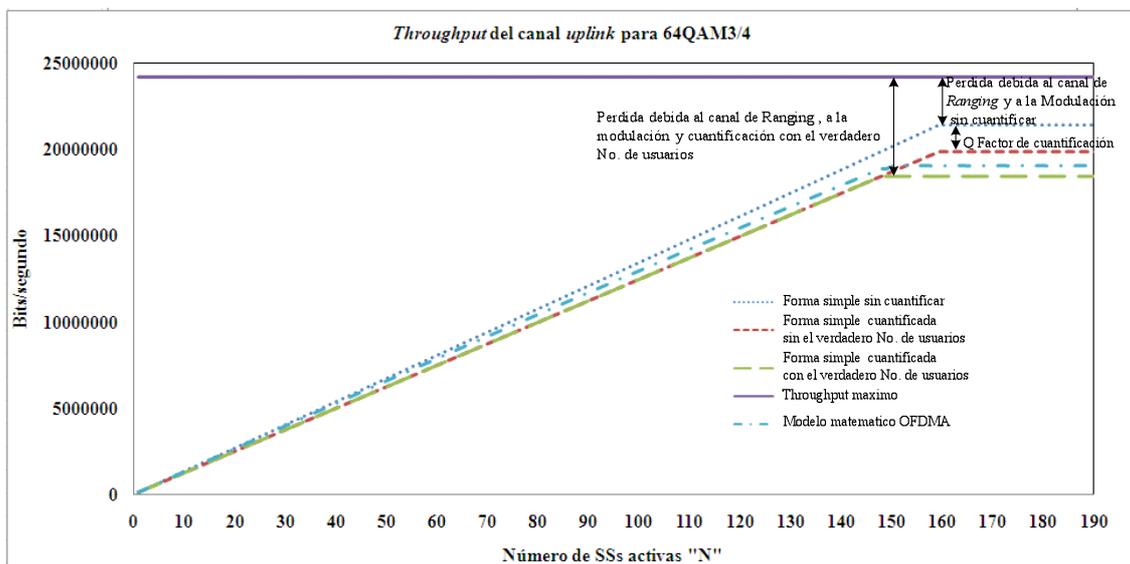


Figura 5. 14. Gráfica del *throughput* para un paquete VoIP usando 64QAM3/4.

La gráfica 5.13 muestra como el *throughput* es afectado por la cuantificación de los paquetes VoIP y por el canal de *ranging*. El *throughput* desciende por el canal *ranging* debido a que no todos los *slots* OFDMA que forman el *sub-frame Uplink* son usados para enviar datos, ya que una parte de éstos se emplean para enviar peticiones de ancho de banda, como consecuencia se presenta una disminución en el *throughput*.

La tabla 5.3 presenta los valores numéricos de la forma simple junto con el del modelo matemático de la gráfica 5.14. Todos los cálculos de este apartado serán repetidos para los diferentes tipos de modulación y codificación, de aquí en adelante ya no serán presentadas las tablas con los valores numéricos de lo que se ha explicado, únicamente se utilizarán gráficas.

	Forma Simple sin Cuantificar	Forma Simple con Cuantificación	Forma Simple con No. verdadero de usuarios	Throughput máximo	Modelo Matemático OFDMA
1	134400	124800	124800	24192000	133339.269
5	672000	624000	624000	24192000	665922.306
10	1344000	1248000	1248000	24192000	1329905.92
15	2016000	1872000	1872000	24192000	1991944.86
20	2688000	2496000	2496000	24192000	2652033.16
25	3360000	3120000	3120000	24192000	3310164.87
30	4032000	3744000	3744000	24192000	3966334.06
35	4704000	4368000	4368000	24192000	4620534.81
40	5376000	4992000	4992000	24192000	5272642.41
45	6048000	5616000	5616000	24192000	5922838.29
50	6720000	6240000	6240000	24192000	6571035.58
55	7392000	6864000	6864000	24192000	7217227.07
60	8064000	7488000	7488000	24192000	7861405.55
65	8736000	8112000	8112000	24192000	8503563.84
70	9408000	8736000	8736000	24192000	9143694.79
75	10080000	9360000	9360000	24192000	9781791.28
80	10752000	9984000	9984000	24192000	10417846.2
85	11424000	10608000	10608000	24192000	11051852.4
90	12096000	11232000	11232000	24192000	11683803
95	12768000	11856000	11856000	24192000	12313690.9
100	13440000	12480000	12480000	24192000	12941509
105	14112000	13104000	13104000	24192000	13567250.5
110	14784000	13728000	13728000	24192000	14190908.4
115	15456000	14352000	14352000	24192000	14812475.8
120	16128000	14976000	14976000	24192000	15431945.9
125	16800000	15600000	15600000	24192000	16049311.8
130	17472000	16224000	16224000	24192000	16664566.8
135	18144000	16848000	16848000	24192000	17277704
140	18816000	17472000	17472000	24192000	17888716.9
145	19488000	18096000	18096000	24192000	18497598.6
148	19891200	18470400	18470400	24192000	18861902
150	20160000	18720000	18470400	24192000	18983165.2
155	20832000	19344000	18470400	24192000	19034609.7
158	21235200	19896685.7	18470400	24192000	19028787.9
160	21427200	19896685.7	18470400	24192000	19044821.7
165	21427200	19896685.7	18470400	24192000	19028257.5
170	21427200	19896685.7	18470400	24192000	19033052.8
175	21427200	19896685.7	18470400	24192000	19037585.9
180	21427200	19896685.7	18470400	24192000	19041877.7
185	21427200	19896685.7	18470400	24192000	19045946.8

Tabla 5. 6. Muestra los resultados teóricos y analíticos de 64QAM3/4.

5.2.2 Throughput para un paquete VoIP G711 con 64QAM2/3

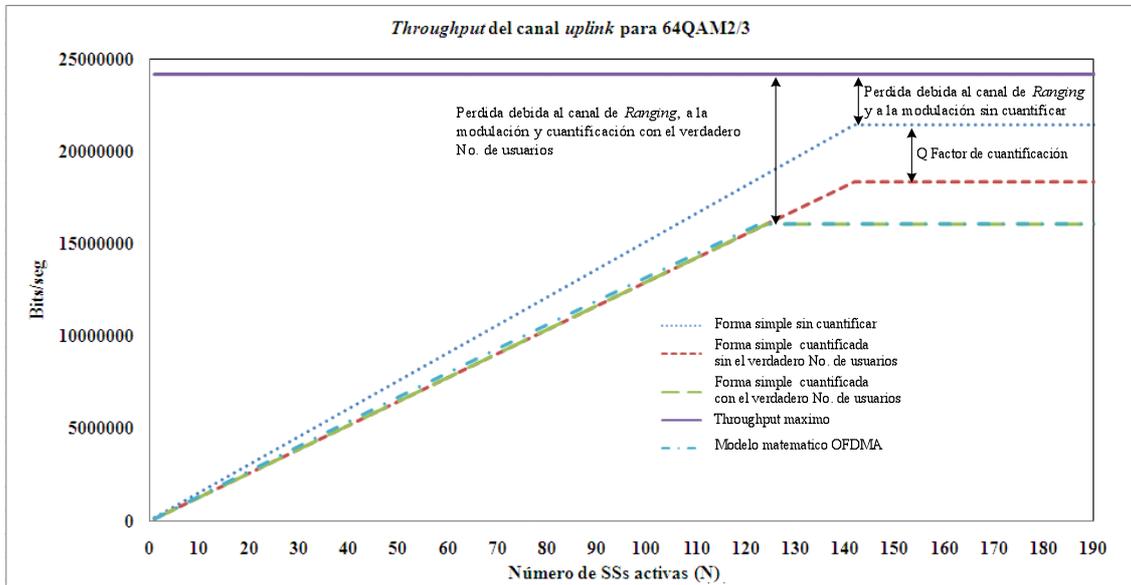


Figura 5. 15. Gráfica del *throughput* para un paquete VoIP usando 64QAM2/3.

En la figura 5.15 se observa que la pérdida por la cuantización y por el canal de *ranging* es mayor en comparación de 64QAM3/4. Esto se debe principalmente a que se desperdicia $\frac{3}{4}$ de un *QuantumMap* por usuario al momento de redondear (43), y éste se ve reflejado en un menor número de usuarios. También se aprecia en las gráficas que los cálculos de la forma simple y del modelo matemático de ecuaciones en diferencias son muy similares.

	Símbolos por paquete	QuantumMaps por paquete	Símbolos totales en un subframe	No. de Usuarios
Sin Cuantificar	252	5 $\frac{1}{4}$	17856	141.71429
Cuantificado	288	6	17856	124
desperdiciado	36	3/4		

Tabla 5. 7. Cálculos para 64QAM2/3 con y sin cuantificar.

5.2.3 Throughput para un paquete VoIP G711 con 16QAM3/4

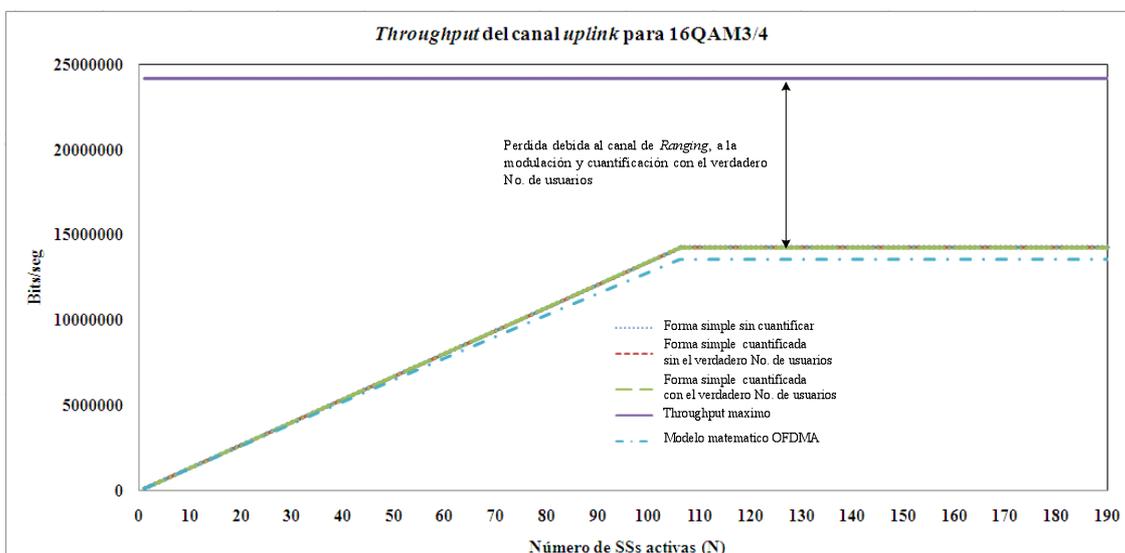


Figura 5. 16. Gráfica del *throughput* para un paquete VoIP usando 16QAM3/4.

La tabla 5.8 ayudará a entender mejor la figura 5.16. En ésta se observa que el factor Q no aparece y se debe a que al momento de calcular los *QuantumMaps* dio un número entero. Por esto, no fue necesario redondear hacia arriba, porque el número de usuarios fue el mismo para ambos casos. Lo anterior justifica las tres gráficas empalmadas. El menor número de usuarios es porque se utilizó una modulación diferente 16QAM3/4 (4 *bits* por símbolo). El modelo matemático de ecuaciones en diferencias tiene una pequeña variación que es aceptable.

	Símbolos por paquete	QuantumMaps por paquete	Símbolos totales en un subframe	No. de Usuarios
Sin Cuantificar	336	7	17856	106
Cuantificado	336	7	17856	106
desperdiciado	0	0		

Tabla 5. 8. Cálculos para 16QAM3/4 con y sin cuantificar.

5.2.4 Throughput para un paquete VoIP G711 con 16QAM1/2

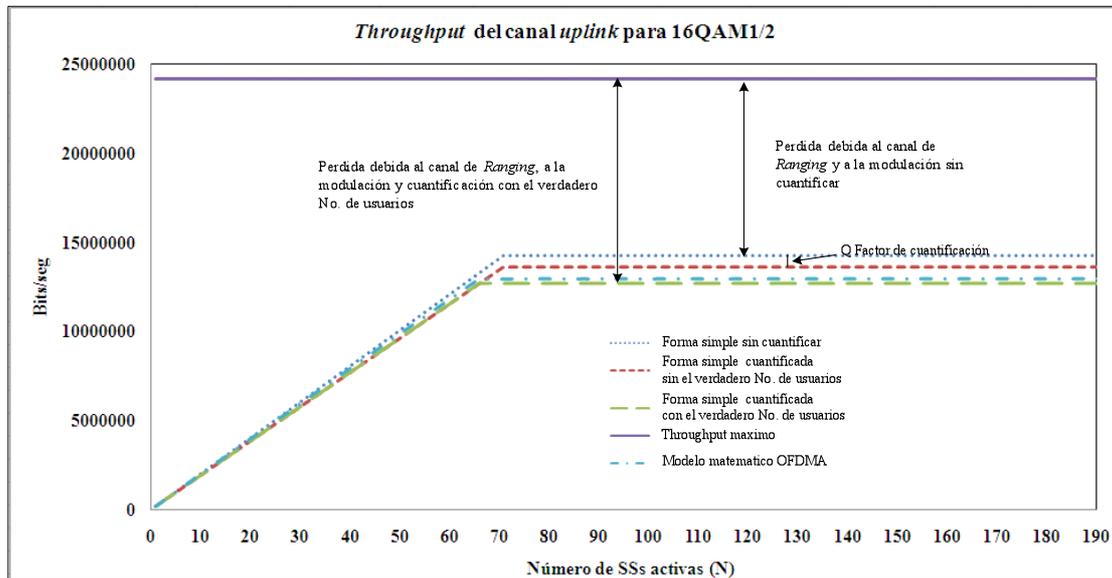


Figura 5. 17. Gráfica del *throughput* para un paquete VoIP usando 16QAM1/2.

La tabla 5.9 nos indica que son desperdiciados 24 símbolos por paquete codificado, ésta es una gran pérdida, sin embargo en el número de usuarios no hay una gran diferencia cuando se cuantifica o no, como en el caso de 64QAM2/3 que también se desperdician muchos símbolos. Esto se debe a que el paquete utiliza muchos *QuantumMaps* para poder ser enviado, pero en el número de usuarios no hay tanta diferencia a pesar de los 24 símbolos desperdiciados. El factor de Q es pequeño por la misma razón, así el modelo matemático de ecuaciones en diferencias y la forma analítica presentan muy poca variación en los resultados.

	Símbolos por paquete	QuantumMaps por paquete	Símbolos totales en un subframe	No. de Usuarios
Sin Cuantificar	504	10 1/2	17856	70
Cuantificado	528	11	17856	66
desperdiciado	24	1/2		

Tabla 5. 9. Cálculos para 16QAM1/2 con y sin cuantificar.

5.2.5 Throughput para un paquete VoIP G711 con QPSK3/4

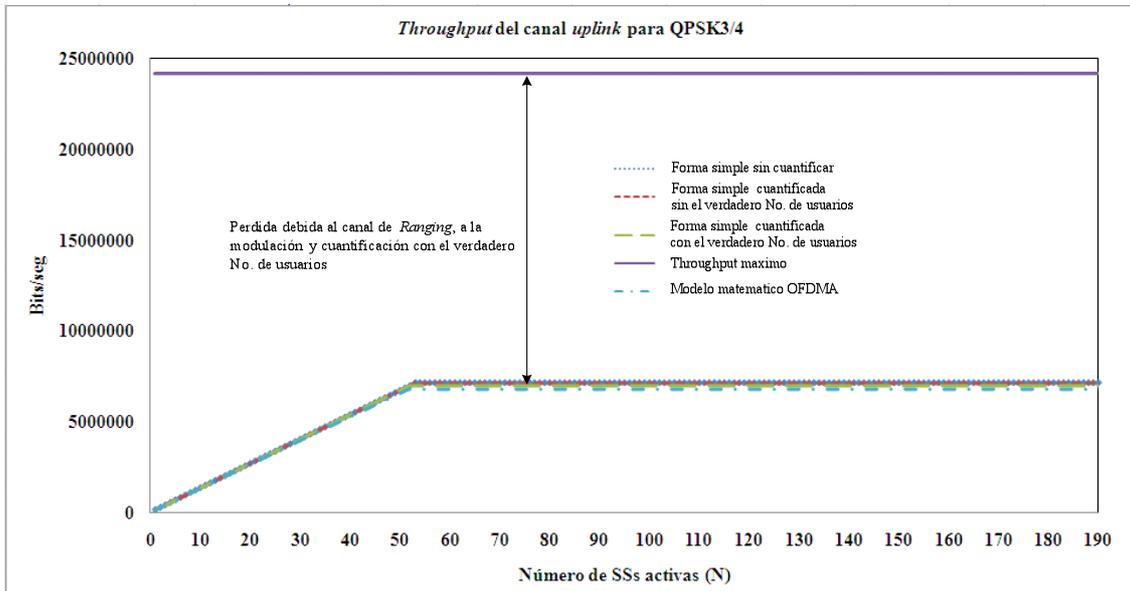


Figura 5. 18. Gráfica del *throughput* para un paquete VoIP usando QPSK3/4.

El *throughput* del sistema baja radicalmente debido a la modulación empleada (2 *bits* por símbolo). Las tres gráficas obtenidas analíticamente aparecen empalmadas y es porque al modular y codificar el paquete, se arroja un número entero de *QuantumMaps*. Los resultados que se obtienen a través del modelo matemático de ecuaciones en diferencias y los que se hicieron de forma analítica son muy similares.

	Símbolos por paquete	QuantumMaps por paquete	Símbolos totales en un subframe	No. de Usuarios
Sin Cuantificar	672	14	17856	52
Cuantificado	672	14	17856	52
desperdiciado	0	0		

Tabla 5. 10. Cálculos para QPSK3/4 con y sin cuantificar.

5.2.6 Throughput para un paquete VoIP G711 con QPSK1/2

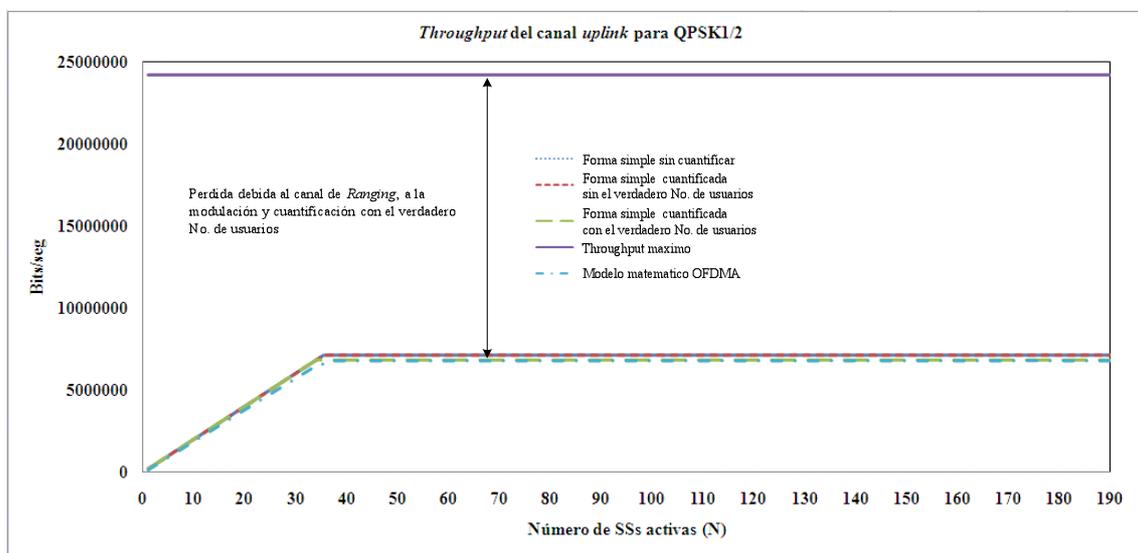


Figura 5. 19. Gráfica del *throughput* para un paquete VoIP usando QPSK1/2.

Al utilizar QPSK1/2 obtenemos un número entero de *QuantumMaps*, pero el número de ellos aumentó respecto de QPSK3/4, esto se debe al tipo de codificación empleada. Como resultado del aumento de los *QuantumMaps* se presenta un menor número de usuarios que los que se encuentren usando QPSK3/4.

En la tabla 5.11 se observa que no hay desperdicio de símbolos ni de *QuantumMaps*, por eso las tres gráficas obtenidas analíticamente están empalmadas. Al mismo tiempo, el modelo de ecuaciones en diferencias presenta buenos resultados que se muestran en la figura 5.19.

	Símbolos por paquete	QuantumMaps por paquete	Símbolos totales en un subframe	No. de Usuarios
Sin Cuantificar	1008	21	17856	34
Cuantificado	1008	21	17856	34
desperdiciado	0	0		

Tabla 5. 11. Cálculos para QPSK1/2 con y sin cuantificar.

5.2.7 Análisis de todos los resultados

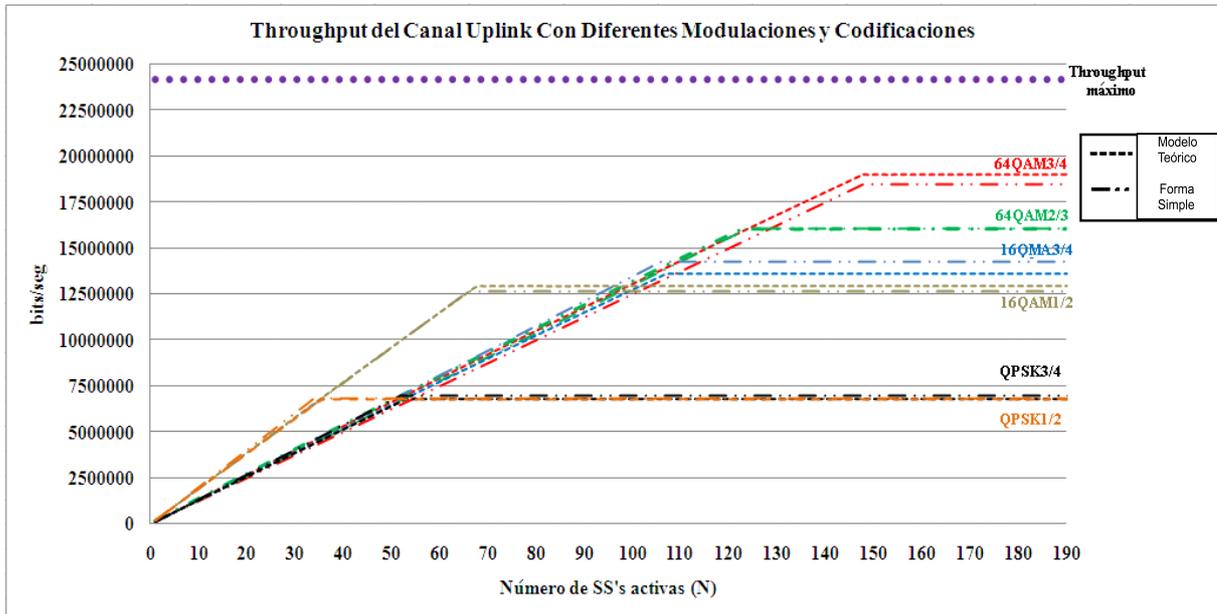


Figura 5. 20. Gráfica del *throughput* para todas las modulaciones.

La figura 5.20 presenta los resultados del modelo matemático basado en ecuaciones en diferencias y los que se obtuvieron de forma simple. Además se ven las pérdidas que producen el canal de *ranging* y la cuantificación (modulación y codificación). De igual forma, se observa que el número de usuarios varía de acuerdo a la codificación y la modulación usada.

La figura 5.21 muestra la desviación estándar para QPSK1/2, QPSK3/4, 16QAM3/4 y 16QAM1/2, en este tipo de modulaciones se produce la menor variación de los resultados obtenidos mediante la forma simple y por el modelo matemático. Mientras que para 64QAM3/4 y 64QAM3/4 se presentan las más amplias variaciones; por otra parte, la desviación estándar más grande una vez que se ha llegado al número máximo de usuarios es de casi el 5%, por lo tanto, se puede decir que el modelo matemático basado en ecuaciones en diferencias es confiable.

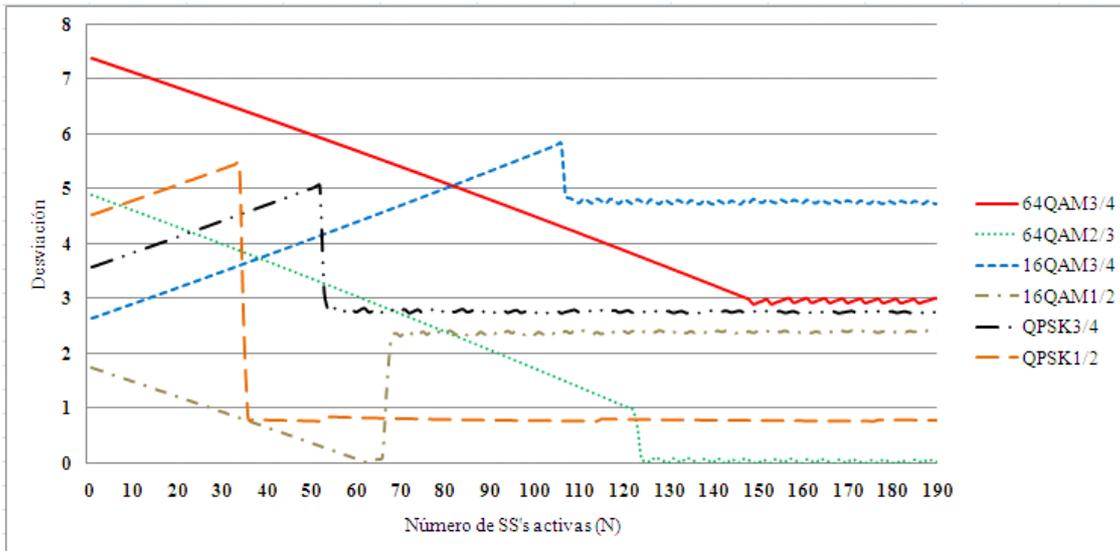


Figura 5. 21. Desviación estándar del modelo matemático y la forma simple.

5.2.8 Eficiencia del Sistema

Una vez considerando el modelo matemático como confiable, se procede a calcular la eficiencia que tiene el sistema con diferentes tipos de modulación y codificación. La figura 5.22 muestra la ventaja de usar la capa PHY *WirelessMAN OFDMA*, ya que no importa qué tipo de modulación y codificación se use, puesto que la eficiencia máxima del sistema siempre está arriba del 90%.

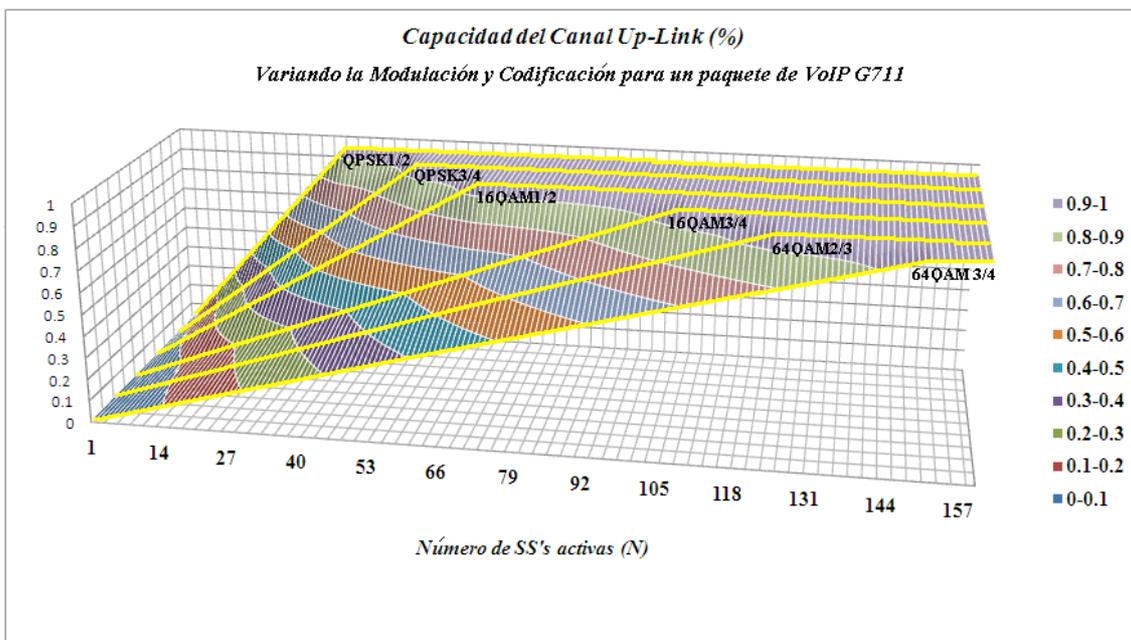


Figura 5. 22. Eficiencia del canal *Uplink* con diferentes modulaciones y codificaciones.

La figura 5.23 muestra los retardos en milisegundos y en slots para los diferentes tipos de modulación y codificación para un paquete VoIP

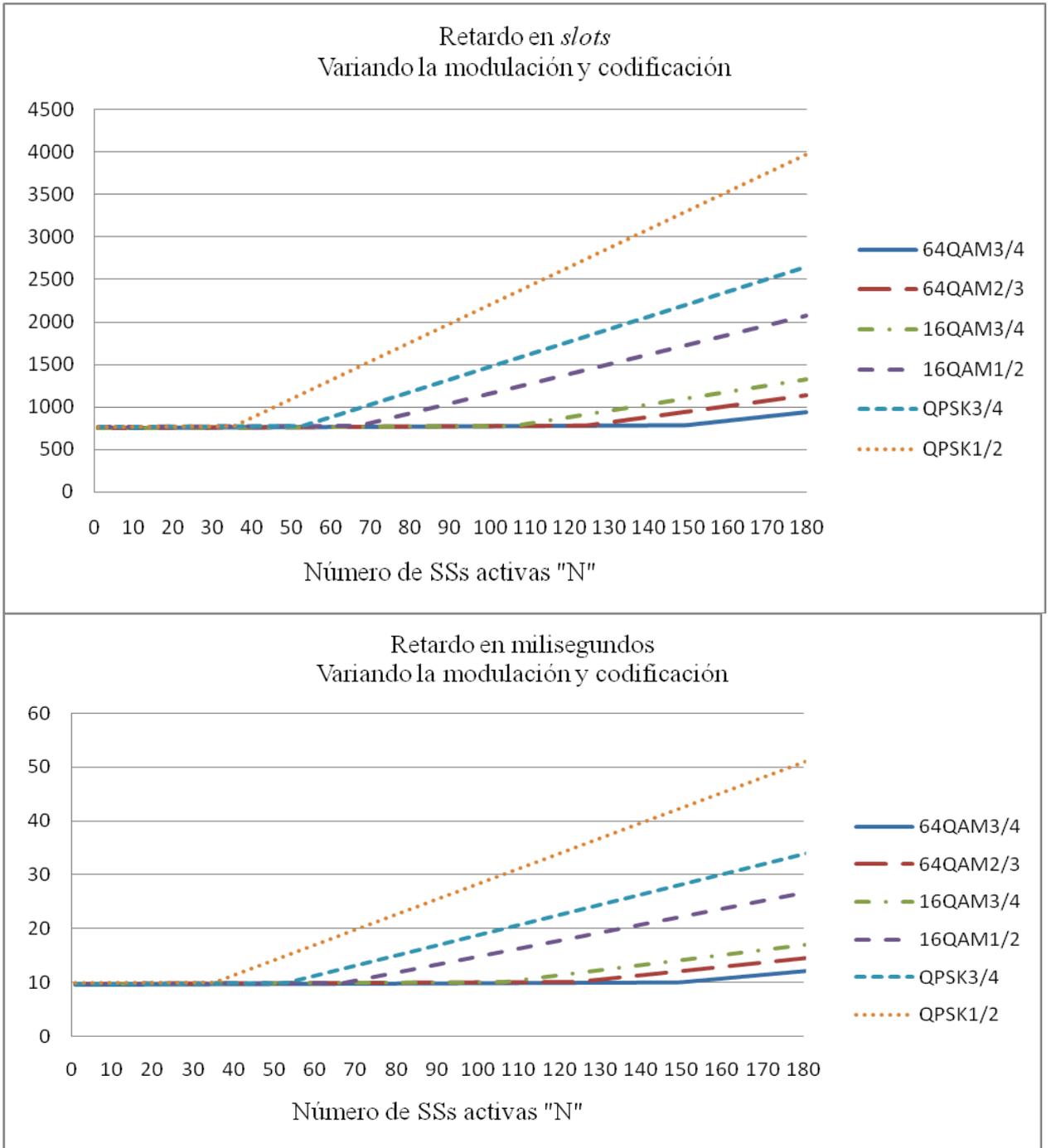


Figura 5.23. Retardo en slots y milisegundos

CONCLUSIONES

La mayoría de las redes utilizan un algoritmo de resolución de colisiones, el cual es importante, ya que impide que la eficiencia de una red empiece a decaer cuando se llega a un número máximo de usuarios que una red puede soportar.

La tecnología *WiMAX* no es la excepción porque también implementa un algoritmo para resolver este tipo de problemas, dicho algoritmo es el EBA. Por otra parte existen herramientas que nos ayudan a simular redes *WiMAX* para observar cómo se comportaría la red, es decir, el número máximo de usuarios, la eficiencia, el *throughput*, el retardo total en la transmisión, etcétera. Pero este tipo de simuladores muestra una complejidad en su manejo, porque su código de programación es difícil de comprender y extenso.

A partir de lo que se acaba de mencionar y después de haber analizado a fondo los antecedentes del sencillo modelo matemático obtenido por M.I. Javier Chapa en su trabajo de tesis *Análisis del comportamiento Dinámico de Redes Inalámbricas de Banda Ancha Fijas Basadas en el Estándar IEEE 802.16*, el cual no presentaba la implementación del EBA, entonces el primer objetivo consistió en implementar el EBA a dicho modelo.

Una vez hecha esta mejora se procedió a comparar el nuevo modelo matemático con el simulador Opnet, en ambas formas se configuraron los mismos parámetros y se obtuvieron valores muy similares en la eficiencia del sistema, teniendo una desviación máxima del 1.5% por lo que se puede confirmar contundentemente que los resultados del modelo matemático son confiables.

Una vez cumplido el primer objetivo se procedió a realizar estudios más detallados del comportamiento de una red inalámbrica de banda ancha basada en el estándar IEEE 802.16 versión fija, variando diferentes parámetros como lo son:

- A) Los *slots* de contención
- B) El tamaño del paquete
- C) El número de usuarios en la red
- D) Variando el tamaño del *UL-frame* (1 y 2 milisegundos)

Todo esto con la finalidad de dar una opinión técnica y decidir cuáles son la mejor opción para que una red inalámbrica tenga mejor eficiencia, un mayor número de usuarios, el menor retardo, entre otras características.

Con el fin de mostrar claramente los resultados obtenidos por el modelo teórico, se utilizaron gráficas tridimensionales en donde se muestran todos los escenarios posibles. Donde se puede apreciar que la eficiencia del sistema no sólo depende de los *slots* de contención, sino que también del tamaño del paquete, del número de usuarios y del tamaño del *UL-frame*.

El segundo objetivo cumplido fue adaptar el modelo matemático, pero para la versión móvil de *WiMAX*. Para esto fue necesario investigar sobre la capa PHY que usa esta versión, una vez entendida, se procedió a hacer las equivalencias necesarias para las variables y anexar nuevas en el modelo teórico.

Una vez obtenido el nuevo modelo teórico, se hizo una comparación con los cálculos de la forma simple para un paquete VoIP G711 usando 64QAM3/4. Los resultados de la desviación máxima entre ambas formas son de casi el 5%. Por lo tanto, se concluye que el modelo matemático de ecuaciones en diferencias para la versión móvil es confiable.

Una vez confirmando que el modelo matemático era confiable se procedió a ser un estudio con los diferentes tipos de modulaciones y codificaciones como:

- A) 64QAM2/3
- B) 16QAM3/4
- C) 16QAM1/2
- D) QPSK3/4
- E) QPSK1/2

Por lo tanto, se concluye que dependiendo de qué tipo de modulación y codificación se utilice, se tendrá un mayor o un menor número de usuarios en el sistema. Por otro lado, el *throughput* también se ve afectado, ya que a mayores modulaciones se tendrá un mayor *throughput* y a menores modulaciones uno menor.

Al mismo tiempo se analizaron las pérdidas que se tienen al cuantificar los *QuantumMaps*, recordemos que la unidad mínima de información para OFDMA son estos y que sólo se pueden enviar números enteros. El tamaño del *QuantumMap* depende del tamaño del paquete, el tipo de modulación y codificación empleada.

En este análisis, las modulaciones y codificaciones que no presentan dichas pérdidas para un paquete VoIP G711 son: 16QAM3/4, QPSK3/4 y QPSK1/2. Todos estos datos nos sirven para poder predecir con qué tipo de modulación y codificación empleada, la red será más eficiente.

Glosario

2.5G	Como tal no existe ningún estándar ni tecnología a la que se pueda llamar 2.5G, pero suelen ser denominados así a algunos teléfonos móviles 2G que incorporan algunas de las mejoras y tecnologías del estándar 3G como es el caso de GPRS y EDGE en redes 2G y con tasas de transferencia de datos superiores a los teléfonos 2G regulares pero inferiores a 3G.
2.5G	Tercera generación de los sistemas telefónicos celulares. Ejemplos: UMTS y cdma2000
A/D	Analógico/Digital.
ATM	<i>Asynchronous Transfer Mode</i> . Modo de Transferencia Asíncrona: es una tecnología de telecomunicación, desarrollada para hacer frente a la gran demanda de capacidad de transmisión para servicios y aplicaciones.
BE	<i>Best Effort</i> . BE es una de las cinco clases de servicio soportadas por el estándar IEEE 802.16, es usada para los datos con más baja prioridad de transmisión como el correo electrónico.
BPSK	<i>Binary Phase Shift Keying</i> . Modulación por Desplazamiento de Fase Binaria.
BS	<i>Base Station</i> . Estación Base.
BW-Request	Solicitud de Ancho de banda.
BW	<i>Bandwidth</i> . Ancho de banda.
BWA	<i>Broadband Wireless Access</i> . Acceso Inalámbrico de Banda ancha.
CDMA	<i>Code Division Multiple Access</i> . Múltiple Acceso por División de Código.
CPS	<i>Common Part Sublayer</i> . Subcapa común de la capa MAC del estándar IEEE 802.16.
CRC	<i>Cyclic Redundancy Check</i> . Código de redundancia cíclica.
CS	<i>Convergence Sublayer</i> . Subcapa de Convergencia, es la parte superior de la capa MAC de una red basada en el estándar IEEE 802.16. Esta capa realiza el servicio específico de transformar o mapear los datos de redes externas antes de su transmisión a través del medio inalámbrico.
D/A	Digital/Analógico.
DAMA	<i>Demand Assigned Multiple Access</i> . Múltiple Acceso por Demanda Asignada.
DC	<i>Direct Current</i> . Corriente Directa.
DCD	<i>Downlink Channel Descriptor</i> . Descriptor del canal de bajada. Es un mensaje de administración que describe la composición del canal de bajada en una red IEEE 802.16.
DL	<i>Downlink</i> . Canal de bajada. Canal para que la EB transmita a la SS.

DL_MAP	<i>Downlink Map</i> . Mapa del canal de bajada.
ertPS	<i>Extended real-time Polling Service</i> . Nueva clase de servicio introducida en la enmienda IEEE 802.16e y que se encuentra entre las clase rtPS y UGS.
FCH	<i>Frame Control Header</i> . Encabezado de control de trama.
FDD	<i>Frequency Division Duplexing</i> .
FEC	<i>Forward Error Correction</i> . Corrección de errores adelantada es una forma de codificación en un canal de transmisión.
FIFO	<i>First Input First Output</i> . Primero en Entrar Primero en Salir: es un método utilizado en teoría de colas, que tiene una analogía con las personas que esperan en una cola y van siendo atendidas en el orden en que llegaron, es decir; que la primera persona que entra es la primera persona que sale.
Frame	Trama: es una unidad estructurada y de tamaño fijo, para el envío de datos.
FTP	<i>File Transfer Protocol</i> . Protocolo para transferencia de archivos.
FTT	<i>Fast Fourier Transform</i> . Transformada Rápida de Fourier.
G711	Es un estándar para representar señales de audio en las frecuencias de la voz humana, mediante muestras comprimidas de una señal de audio digital, con una tasa de muestreo de 8000 muestras de 8 <i>bits</i> por segundo (<i>frames</i> de 80 <i>Bytes</i> cada 10 <i>ms</i>). El codificador G.711 proporcionará un flujo de datos de 64 <i>kbit/s</i> en capa de aplicación y soporta cuando máximo 20 <i>ms</i> de retardo.
GSM	<i>Global System for Mobile communication</i> . Ejemplo de la segunda generación de un sistema telefónico celular.
Handover	En términos de comunicaciones celulares, se refiere al proceso de transferir una llamada o sesión de datos en curso, de un cliente o terminal, desde una BS a otra, cuando disminuye la calidad del enlace y/o ya no se pueden satisfacer los requerimientos de QoS.
HCS	<i>Header Check Sequence</i> . Verificador de secuencia de encabezado.
IE	<i>Information Element</i> . Elemento de Información.
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i> . Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos: es una asociación mundial técnico-profesional dedicada a la estandarización. Es la mayor asociación internacional sin fines de lucro, formada por profesionales de las nuevas tecnologías, como ingenieros eléctricos, ingenieros en electrónica, científicos de la computación, ingenieros en informática e ingenieros en telecomunicaciones.
IFFT	<i>Inverse Fast Fourier Transform</i> . Transformada Rápida de Fourier Inversa.
Interleaver	Entrelazado.
IP	<i>Internet Protocol</i> . Protocolo de Internet.
LOS	<i>Line-of-Sight</i> . Línea de vista.

MAC	<i>Medium Access Control</i> . Control de Acceso al Medio: es el conjunto de mecanismos y protocolos por los que varios "interlocutores" (dispositivos en una red, como ordenadores, teléfonos móviles, etc.) se ponen de acuerdo para compartir un medio de transmisión común (por lo general, un cable eléctrico u óptico, o en comunicaciones inalámbricas el rango de frecuencias asignado a su sistema).
MAN	Metropolitan Area Network. Red de área metropolitana, el IEEE 802.16 en un sistema inalámbrico MAN.
Mesh	Malla: término empleado para referirse a las redes inalámbricas de malla.
MMDS	<i>Multichannel Multipoint Distribution Services</i> . Servicios de Distribución Multicanal Multipunto: identifica a una tecnología inalámbrica de telecomunicaciones, usada para el establecimiento de una red de banda ancha de uso general o más comúnmente, como método alternativo de recepción de programación de televisión por cable. Se utiliza generalmente en áreas rurales poco pobladas, en donde instalar redes de cable no es económicamente viable.
MP3	Es un formato de audio digital comprimido con pérdida, desarrollado por el <i>Moving Picture Experts Group</i> (MPEG), para formar parte de la versión 1 del formato de vídeo MPEG (posteriormente ampliado en la versión 2). El mp3 estándar es de 44 KHz y un <i>bitrate</i> de 128 Mbps, por la relación de calidad/tamaño. Su nombre es del acrónimo de MPEG-1 <i>Audio Layer 3</i> .
MPDU	MAC PDU. Unidad de datos de protocolo para la capa MAC.
MPEG	<i>Moving Picture Experts Group</i> . Grupo de Expertos de Imágenes en Movimiento: es un grupo de trabajo del ISO/IEC encargado de desarrollar estándares de codificación de audio y vídeo.
Multicast	Es un envío de información desde un único emisor a múltiples receptores.
NLOS	<i>Non Line Of Sight</i> . Sin Línea de Vista: es un enlace no visual entre ambos extremos. El término NLOS se aplica a las tecnologías de radiofrecuencia que descubren una trayectoria parcialmente obstruida entre la ubicación del transmisor y la ubicación del receptor.
nrtPS	<i>non real-time Polling Service</i> . Servicio de Consulta no en tiempo real.
OFDM	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i> . Multiplexación por División Ortogonal de Frecuencias: es una modulación que consiste en enviar un conjunto de portadoras ortogonales de diferentes frecuencias.
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access. Es la variante de OFDM para un escenario de acceso múltiple.
Offset	Desplazamiento.
OSI	<i>Open System Interconnection</i> . Interconexión de Sistemas Abiertos: es un modelo de red descriptivo creado por la Organización Internacional para la Estandarización. Es un marco de referencia para la definición de arquitecturas de interconexión de sistemas de comunicaciones.
Overhead	Término utilizado para referirse a la sobrecarga de encabezados debidos a la utilización de un protocolo de comunicaciones.

Payload	Carga de datos en un frame.
PDU	<i>Protocol Data Unit</i> . Unidad de Datos de Protocolo.
PHY	PHYSical layer, Capa física.
PMP	<i>Point-to-MultiPoint</i> . Topología básica de WiMAX.
Polling	Encuesta o sondeo: hace referencia a una operación de consulta constante hacia una estación suscriptora.
PRBS	<i>Pseudo-Random Binary Sequence</i> . Se utiliza en el bloque de randomización y para utilizar códigos CDMA.
QAM	<i>Quadrature Amplitude Modulation</i> . Modulación por Amplitud en Cuadratura.
QoS	<i>Quality of Service</i> . Calidad de Servicio: son las tecnologías que garantizan la transmisión de cierta cantidad de datos en un determinado tiempo (<i>throughput</i>).
QPSK	<i>Quadrature Phase Shift Keying</i> . Modulación por Desplazamiento de Fase en Cuadratura.
Randomizer	Aleatorización.
Ranging	Proceso mediante el cual una SS ajusta sus parámetros en potencia y tiempo para sincronizarse con los <i>frames</i> .
RF	Radio frecuencia.
RNG-REQ	<i>Ranging-Request</i> . Solicitud de <i>Ranging</i> .
RNG-RSP	<i>Ranging-Response</i> . Respuesta de <i>Ranging</i> .
RTG	<i>Receive/transmit Transition Gap</i> . Espacio de Transición de Recepción/transmisión.
RTP	<i>Real – time Transport Protocol</i> . Protocolo de Transporte de tiempo Real.
rtPS	<i>real-time Polling Service</i> . Servicio de Consulta en tiempo real.
SC	<i>Single Carrier</i> . Portadora Única
SDU	<i>Service Data Unit</i> . Unidad de Datos de Servicio.
Slot	Ranura de tiempo utilizada para atender una solicitud de procesamiento o envío de datos.
SS	<i>Subscriber Station</i> . Estación Suscriptora.
Sub-frame Uplink	<i>Porcion del frame de datos, que envía datos a las BS</i>
Throughput	Se llama así al volumen de trabajo o de información que fluye a través de un sistema, con relación al tiempo.
TTG	<i>Transmit/receive Transition Gap</i> . Espacio de Transición de

Transmisión/recepción.

UCD	<i>Uplink Channel Descriptor</i> . Descriptor del Canal <i>Uplink</i> .
UDP	<i>User Datagram Protocol</i> . Protocolo de Datagramas de Usuario: es un protocolo del nivel de transporte basado en el intercambio de datagramas. Permite el envío de datagramas a través de la red sin que se haya establecido previamente una conexión. Tampoco tiene confirmación, ni control de flujo, por lo que no se puede saber si los paquetes de datos llegan correctamente a su destino, ya que no hay confirmación de entrega o de recepción.
UGS	<i>Unsolicited Grant Service</i> . Servicio de Concesiones No Solicitadas.
UL	<i>Uplink</i> . Canal de subida.
UL_MAP	<i>Uplink Map</i> . Mapa del canal de subida.
Unicast	Es un envío de información desde un único emisor a un único receptor.
VoIP	<i>Voice over Internet Protocol</i> . Voz sobre Protocolo de Internet: es un grupo de recursos que hacen posible que la señal de voz viaje a través de Internet.
WiFi	Es un sistema de envío de datos sobre redes computacionales que utiliza ondas de radio en lugar de cables y es también, una marca de la <i>WiFi Alliance</i>
WiMAX	<i>Worldwide Interoperability for Microwave Access</i> .

Bibliografía

- [1] Loutfi Nuaymi. *WiMAX Technology For Broadband Wireless Access*. Editorial John Wiley & Sons, Ltd. Edición 2007.
- [2] CA Collision Resolution Paradigm for Random Access Channel Control in Multi-Access Wireless Networks, M.C. Yuang, B.C. Lo, J.Y. Chen, *Computer and Communications Research Laboratories, Department of Computer Science and Information Engineering National Chiao Tung University, Taiwan, IEEE official transactions, February 2002.*
- [3] Performance of the IEEE 802.16 MAC Protocol with Varying Request Backoff Start, B.N. Bhandari, Ratnam V. Raja Kumar, S.L. Maskara. Dept of Electronics and Electrical Communication Engineering, Indian Institute of Technology Kharagpur, West Bengal, INDIA, IEEE official transactions. June 2006.
- [4] Uplink Performance of the IEEE802.16 Medium Access Control (MAC) Layer Protocol, B.N. Bhandari, Ratnam V. Raja Kumar, S.L. Maskara. Dept of Electronics and Electrical Communication Engineering, Indian Institute of Technology Kharagpur, West Bengal, INDIA, IEEE official transactions. June 2005.
- [5] V. Rangel, M. Perez, J. Gomez, M. Lopez-Guerrero, R. Aquino, "Performance Evaluation of Five New Adaptive Contention Slot Allocators for IEEE 802.16 Based Systems", *Proceedings of the IEEE Int. Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications, IEEE WiMob 2008, Abiñon, France, October 08, ISSN: 1930-529X, ISBN: 978-1-4244-2324-8, pp. 316-321.*
- [6] V. Rangel , Y. Macedo, L. Ortiz, J. Gómez. "QoS Management for Broadband IEEE 802.16 Based Networks in FDD Mode" .To be published in *Journal of Electronics and Electrical Engineering (Elektronika ir Elektrotechnika)*, Vol. 98, No.2, ISSN 1392-1215, February 2010, Indexed in SCI-E.
- [7] Víctor Rangel , Eduardo Cota y Javier Gómez, *Diseño de Procedimientos Handoff en Redes Inalámbricas de Banda Ancha Basado en el Estándar IEEE 802.16 , INGENIERIA INVESTIGACION Y TECNOLOGIA , Facultad de Ing. UNAM, Vol. IX, No. 1, Enero-Marzo 2008, ISSN 1405-7743.*
- [8] V. Rangel, J Gomez y J. Ortiz, "Performance Análisis of QoS Scheduling in Broadband IEEE 802.16 Based Networks," in *Proc. OPNETWORK Technology Conf., Washington 2006*
- [9] Eduardo Flores Flores, Raul Aquino Santos, Victor Rangel Licea, Miguel A. Garcia-Ruiz, Arthur Edwards Block, "MAC Layer Mechanism for Wireless WiMAX Networks with Mesh Topology", *Proceedings of the Electronics, Robotics and Automotive Mechanics Conference (CERMA), Cuernavaca, Morelos, México, September 2008, ISBN:978-0-7695-3320-9, pp. 151-156.*

- [10] Víctor Rangel, Javier Gómez y Javier Ortiz, "Performance Analysis of QoS Scheduling in Broadband IEEE 802.16 Based Networks", Proc. of OPNETWORK Technology Conference, vol 1566, Washington, USA, August 2006.
- [11] Luis Manuel Ortiz Buenrostro, Análisis y Diseño de técnicas de reservación para redes WIMAX IEEE 802.16, Maestría en Ciencia e Ingeniería de la Computación, UNAM. 11 Agosto 2009
- [12] Javier Chapa López, Análisis del Comportamiento Dinámico de Redes Inalámbricas de BANDA Ancha Fijas Basadas en el Estándar IEEE 802.16, Maestría en Ingeniería en Computación, Mayo 2009.
- [13] Masato Okuda, Shashikant Maheshwari, Yousuf Saifullah y Haihong Zheng "Definition of CDMA code range for RS dedicated CDMA codes," Julio 2007
- [14] Kuo-Chih Chu y Yeu-Jer Cheng "Dynamic Ranging Codes Allocation Scheme in IEEE 802.16e Networks", Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, 2008. WiCOM '08. 4th International Conference on, Noviembre 2008.
- [15] Jeong-Jae Won, Choong-Ho Cho, Hyong-Woo Lee³ y Victor C.M. Leung "Stabilization of Contention-Based CDMA Ranging Channel in Wireless Metropolitan Area Networks, " Lecture Notes in Computer Science, 2005, Volume 3462/2005, 1255-1266, DOI: 10.1007/11422778_101.
- [16] Hikmet Sari, Fumiyuki Adachi, David D. Falconer y Sirikiat Lek Ariyavisitakul "Guest Editorial Broadband Wireless Techniques," IEEE Journal on selected areas in communications, Vol. 17, No. 10, October 1999.
- [17] Gene Beck Hahn, Yong Ho Kim y Seon Ryu "Method For Performing Initial Ranging in Wireless Communication System," United States Patent Application Publication, 15 Abril 2010.
- [18] Jihua Zhou¹ , Xin Jin¹ , Jiangtao Dong, Jinglin Shi y Zhongcheng Li "The Analysis of the Optimal Periodic Ranging Slot Number in IEEE 802.16 OFDMA Systems" Third IEEE International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob 2007)
- [19] Altera, "WiMAX OFDMA ranging," August 2006, version 1.0.
- [20] IEEE 802.16-2001, "IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks - Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems, April 2002. IEEE 3 Park Avenue, New York, NY 10016-5997, USA.
- [21] IEEE 802.16-2004, "IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks - Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems, October 2004. IEEE 3 Park Avenue, New York, NY 10016- 5997, USA

[22] IEEE 802.16e-2005, “IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks - Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems, 2005. IEEE 3 Park Avenue, New York, NY 10016-5997, USA.

[23] IEEE 802.16e-2009, “IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks - Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems, 29 May 2009. IEEE 3 Park Avenue, New York, NY 10016-5997, USA.

[24] Jeffrey G. Andrews, Arunabha Ghosh, Rias Muhamed. *Fundamentals of WiMAX. Understanding Broadband Wireless Networking*. Prentice Hall. February 2007.

[25] Frank Ohrtman. *WiMAX Handbook*, Editorial Mc Graw Hill, Edicion 2005.

[26] Syed Ahson y Mohammad Ilyas. *WiMAX Technologies, Performance Analysis, and QoS*, Editorial CRC press Taylor & Francis Group. Edicion 2008.

[27]Radha Krishna y G. Radhamani. *WiMAX A Wireless Technology Revolution*. Editorial CRC press Taylor & Francis Group. Edicion 2008.

[29] V. Rangel, J. Gómez, J. Chapa, M. Lopez Guerrero y Javier Ortiz, “Performance Analysis of Best Effort Support in IEEE 802.16 Networks”,

[30] Loutfi Nuaymi. *WiMAX Technology For Broadband Wireless Access*. Editorial John Wiley & Sons, Ltd. Edición 2007.

<http://www.wimaxforum.org>

<http://www.ieee.org/index.html>

Apéndice A

Programa que determina el número de slots que se necesitan para transmitir un paquete en función de su tamaño. Toma en cuenta los encabezados de la capa MAC y Física.

```
1 #include <stdio.h>
2 #include <stdlib.h>
3 #include <math.h>
4 #include <conio.h>
5 //int computeblocksSerial(int no_of_byts) //no_of_biys=100,128,256,300,512,1024,1500
6 //Programa principal
7 main()
8
9
10 int BWA_MAC_header=6; //Header 802.16
11 int FEC1=6; //Reed Solomon entre Code Words
12 int FEC2=10; //Longitud de Code Words
13 int preamble=4; //Preambulo de 802.16
14 int guard_band=6; //Banda de guarda entre rafagas
15 int no_of_bits=1500;
16 int remain, length_BWA_MAC, length_Eth;
17 int RLC_pkts_1, RLC_pkts_2, Total_RLC_pkts, quotient, no_PDU_pkts;
18
19 length_Eth=no_of_byts;
20
21 length_BWA_MAC=length_Eth + BWA_MAC_header;
22
23 no_PDU_pkts=length_BWA_MAC/245; //1 paquete //aqui se estan formando paquetes PDU de 245 B
24
25 remain=(length_BWA_MAC - no_PDU_pkts*245); //Obtiene el sobrante si es que hay
26 RLC_pkts_1= no_PDU_pkts*245; //Se forman un paquete RLC
27 RLC_pkts_2=remain + FEC2;
28
29 Total_RLC_pkts= FEC2*no_PDU_pkts + RLC_pkts_1 + RLC_pkts_2 + preamble + guard_band; //Paquete total en Bytes en la capa fisica
30 printf("PAQUETE TOTAL EN BYTES EN CAPA FISICA=\n",Total_RLC_pkts);
31 quotient = Total_RLC_pkts/16; //Numero de paquetes de 16B, que son los slots que se usan para enviar el tamaño del paquete
32 if((Total_RLC_pkts - quotient*16)!=0)
33     quotient +=1;
```

Apéndice B

Programa para determinar la eficiencia de una red *WiMAX*, basado en un modelo teórico de ecuaciones en diferencias para *Single Carrier*.

```
Sub Matematico_EBA()
Dim C, M, I, W, X, j, N, k As Integer
Dim Psc_1, Psc_n, Psc_n_plus_1, q, a As Double
M = Cells(2, 2) 'Obtencion del tamaño del Frame
W = Cells(3, 2) 'Retardo inicial W
X = Cells(5, 2) 'Tamaño del paquete en bytes
Psc_1 = Cells(8, 2) 'Probabilidad inicial
EBAi = Cells(9, 2) 'EBAi
EBAt = Cells(9, 4)
'Ciclo recursivo
For j = 1 To 3
C = Cells(1, 1 + j) 'Obtiene el tamaño del bloque de contencion
q = (1 - 1 / C)
For k = 1 To 23
N = 8 + k * 4
I = 2 * M 'Ecuacion (4)
Do 'W
Psc_n_plus_1 = Psc_1
Psc_1_1 = Psc_1
l = 0 'contador
Z = 1 'contador
Do 'Psc
l = l + 1
Psc_n = Psc_n_plus_1
a = (1 - Psc_n) / Psc_n 'Numero de colisiones dado por la distribucion geometrica
B = C * (I + C + X + W) / M 'Reduccion de terminos pag 39
If EBAi + a < 11 Then
Psc_n_plus_1 = q ^ (N * C / (Psc_n * (2 ^ (EBAi + a) - 2 ^ (EBAi - 1) + B)) - 1) 'Ecuacion (32)
Else
Psc_n_plus_1 = q ^ (N * C / (Psc_n * (2 ^ EBAt - 2 ^ (EBAi - 1) + (EBAi + a - EBAt) * 512 + B)) - 1) 'Ecuacion (32)
End If

If (l > 5000 And Z < 1000) Then 'Z es un contador
Cells(10 + k + Z - 1, 16 + j * 2 + (N - 76)) = Psc_n_plus_1
Cells(10 + k + Z - 1, 17 + j * 2 + (N - 76)) = Psc_n
Cells(10 + k + Z - 1, 18 + j * 2 + (N - 76)) = e
Cells(10 + k + Z - 1, 19 + j * 2 + (N - 76)) = Psc_1_1
Psc_1_1 = Psc_1_1 + 0.001
Psc_n_plus_1 = Psc_1_1
l = 0
Z = Z + 1
End If

If N > 76 And Psc_n_plus_1 > 0.99 Then 'para cuando el sistema se vuelve inestable
W = W + 1
Psc_n_plus_1 = Psc_1
l = 0
End If
e = Abs(Psc_n_plus_1 - Psc_n)
Loop Until e < 0.00003
If EBAi + a < 11 Then
Cn = C + M * (2 ^ (EBAi + a) - 2 ^ (EBAi - 1)) / C 'Implementacion del EBA Ec. (27)
Else
Cn = C + M * (2 ^ EBAt - 2 ^ (EBAi - 1) + (EBAi + a - EBAt) * 512) / C 'Implementacion del EBA Ec. (27)
End If
t = I + Cn + W + X 'slots en un ciclo de transmision
d = t * (M - C) / (M * N) 'Ecuacion (33) con un poco de algebra
If d < X Then
W = W + 1
End If
Loop Until d > X
thr = N * X / t 'Eficiencia del sistema
If j = 1 Then
Cells(10 + k, 1) = N 'Imprime numero de Usuarios
End If
End If
Cells(10 + k, 1 + j) = thr 'imprime la eficiencia del sistema
Cells(10 + k, 7) = t 'Imprime los slots en un ciclo de transmision
Next
Next
End Sub
```

