



Universidad Nacional Autónoma de México

Facultad de Ingeniería

**Análisis y Diseño de Técnicas de Calidad de
Servicio en Redes WiMAX**

Tesis que para obtener el título de

Ingeniero en Telecomunicaciones

presenta

Francisco Romero Sánchez

Ingeniero en Telecomunicaciones

presenta

Miguel Alejandro Torres Rodríguez

Director de Tesis

Dr. Víctor Rangel Licea



Ciudad Universitaria, México D.F.

Abril de 2007



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Agradecimientos

A la Universidad Nacional Autónoma de México, por permitirnos cursar los estudios de Licenciatura y formar parte de la comunidad Universitaria.

A PAPIIT por el apoyo otorgado a los proyectos de investigación Papiit IN110805 y Papiit IN 104907-3.

Al Dr. Víctor Rancel Licea por su valioso apoyo y asesoría en la realización de este proyecto.

A nuestros sinodales Dr. Miguel Moctezuma, Dr. Víctor García, Dr. Javier Gómez y al Ing. Jesús Reyes por el tiempo dedicado a la revisión de este trabajo.

A Dios, por darme todo y permitirme completar esta etapa de mi vida.

A mis padres, por ser la inspiración y el motor de mi vida.

A mis hermanas, por ser las mejores amigas que pueda tener.

A mis abuelos, mis tíos y mis primos, por su apoyo y cariño.

A mis amigos, por ser como mi familia.

A Miguel, por brindarme su amistad y ser un buen compañero.

A mis maestros, porque sus enseñanzas prevalecen con el tiempo.

Francisco Romero Sánchez

A la vida que me ha dado tantas enseñanzas y oportunidades las cuales he sabido aprovechar.

A mi padre por brindarme la oportunidad de poder superarme y por apoyarme siempre que lo he necesitado.

A mi madre por quererme y por aguantarme tanto, por darme esa fuerza necesaria para seguir adelante sin importar que pase y por cuidarme tanto. Te quiero mucho.

A mi hermana con quien siempre me divierto, por el apoyo que siempre me das y por creer en mí. Te deseo mucho éxito y felicidad.

A Francisco por ser un buen amigo, compañero e ingeniero.

A mis amigos y a todas aquellas personas especiales que siempre han estado conmigo en las buenas y en las malas dándome su apoyo, su tiempo, sus consejos, alegrías, penas, diversión, aburrimiento, etc., pero sobre todo por darme su amistad. Gracias por darme un gran sabor a esta gran odisea llamada vida.

Miguel Alejandro Torres Rodríguez

Contenido

Capítulo 1	1
Introducción	1
1.1 Definición del Problema	2
1.2 Modelado de Redes de Acceso Inalámbrico de Banda Ancha	3
1.3 Propuesta de las Redes BWA	4
1.4 Objetivos y Contribuciones	4
1.5 Estructura de la Tesis	5
Capítulo 2	6
Estado del Arte de las Redes de Tercera Generación y de las Redes BWA	6
2.1 Introducción	7
2.2 Evolución de los Sistemas de Telefonía Móvil	7
2.2.1 La Primera Generación (1G)	7
2.2.2 La Segunda Generación (2G)	8
2.2.3 La Generación 2.5G	9
2.3 Redes Inalámbricas de tercera generación (3G)	9
2.3.1 EDGE	10
2.3.2 CDMA2000	10
2.3.2.1 CDMA2000 1X	10
2.3.2.2 CDMA2000 1XEV-DO	11
2.3.2.3 W-CDMA	11
2.3.3 UMTS	12
2.4 Redes Inalámbricas de Banda Ancha	13
2.4.1 Arquitectura BWA	13
2.4.2 Redes IEEE 802.11 o WiFi	14
2.4.3 Redes IEEE 802.16 o WiMAX	16
2.5 Otras Tecnologías	19
2.5.1 DSL	19
2.5.2 Cable Módem	20
2.5.3 LMS	21
2.6 Conclusiones	22
Capítulo 3	23
Descripción del Estándar IEEE 802.16 WiMAX	23
3.1 Introducción	24
3.2 Operación del Protocolo IEEE 802.16	24
3.2.1 El Control de Acceso al Medio en IEEE 802.16	24
3.2.2 Direccionamiento y tipo de conexiones	25
3.2.3 La Unidad de Datos del Protocolo MAC	25
3.2.3.1 Formatos del Encabezado MAC	26
3.2.3.2 Concatenación, Fragmentación y Empaquetamiento	29
3.2.4 Mensajes de Administración MAC	29
3.2.4.1 Mensaje Descriptor del Canal Descendente (DCD)	31
3.2.4.2 Mensaje de Acceso al Canal Descendente (DL-MAP)	31
3.2.4.3 Mensaje Descriptor del Canal Ascendente (UCD)	31
3.2.4.4 Mensaje de Acceso al Canal Ascendente (UL-MAP)	32

3.2.4.5 Mensaje de Solicitud de Ranging (RNG-REQ)	33
3.2.4.6 Mensaje de Respuesta de Ranging (RNG-RSP)	33
3.2.4.7 Mensaje de Solicitud de Registro (REG-REQ) y Respuesta de Registro (REG-RSP)	33
3.2.5 Mecanismos de solicitud y asignación de ancho de banda	34
3.2.5.1 Solicitudes	34
3.2.5.2 Modo de asignación por conexión (GPC)	35
3.2.5.3 Modo de asignación por estación subscriptora (GPSS)	35
3.2.5.4 Consultas	35
3.2.6 Servicio de Calidad en la Transmisión ascendente	35
3.2.6.1 Servicio Garantizado sin Solicitud (UGS)	36
3.2.6.2 Servicio de Propuesta en tiempo real (rtPS)	37
3.2.6.3 Servicio de Propuesta no en tiempo real (nrPS)	37
3.2.6.4 Servicio de mejor esfuerzo (BE)	38
3.2.7 Características de la capa física	38
3.2.7.1 FDD (Frequency Division Duplexing)	38
3.2.7.2 TDD (Time Division Duplexing)	39
3.2.7.3 UL sub-frame	39
3.2.7.4 DL sub-frame	40
3.2.8 Resolución de colisiones	42
3.3 Conclusiones	44
Capítulo 4	45
Modelo de simulación en Opnet	45
4.1 Introducción	46
4.2 Implementación del Modelo BWA	47
4.2.1 Estación Subscriptora	47
4.2.2 Estación Base	49
4.2.3 Generadores de tráfico	51
4.2.3.1 Generador de tráfico VoIP - G.711	51
4.2.3.2 Generador de tráfico MPEG	54
4.2.3.3 Generador de tráfico de Internet	55
4.3 Servicio nrPS	56
4.3.1 Implementación del servicio nrPS	57
4.3.1.1 Proceso bwa_gen_src	57
4.3.1.2 Proceso bwa_wm_child	57
4.3.1.3 Proceso bwa_be_mgr	59
4.3.2 Generador de tráfico FTP	61
4.3.2.1 Distribuciones	61
4.3.2.2 Algoritmo	62
4.3.3 Parámetros de medición	64
4.3.3.1 Delays	64
4.3.3.2 Peticiones y Número de Paquetes	65
4.3.3.3 Throughput y Utilización del canal	67
4.4 Conclusiones	68
Capítulo 5	69
Análisis y Resultados	69
5.1 Introducción	70
5.2 Escenarios de Simulación	70
5.2.1 Escenario A	71
5.2.2 Escenario B	75
5.2.3 Escenario C	77
5.2.4 Escenario de Tráfico Mixto	81
5.3 Conclusiones	86

Capítulo 6	88
Conclusiones	88
6.1 Discusiones Finales.....	89
6.2 Trabajo Futuro.....	89
6.3 Contribuciones.....	90
6.4 Conclusiones Finales	90
Referencias	91
Apéndice A	93
GLOSARIO	93
ACRONIMOS	95
Apéndice B	100
Código para generar tráfico FTP	100
Código para resolución de Peticiones	101
Algoritmo de atención del servicio nrtPS	103
Apéndice C	105
Resultados Complementarios	105
Apéndice D	110
Inicialización e ingreso a la red de la SS	110

Índice de Tablas

Tabla 2.1 Versiones del estándar IEEE 802.11.....	16
Tabla 2.2 Comparación de la mejora del Ancho de banda provisto por el estándar DOCSIS 2.0 con respecto a DOCSIS 1.x.....	20
Tabla 2.3 Algunas características avanzadas de DOCSIS 1.x y DOCSIS 2.0.....	21
Tabla 3.1 Valores de Type para el downlink.....	27
Tabla 3.2 Valores de Type para el uplink.....	27
Tabla 3.3 Formato del Mensaje de Administración.....	30
Tabla 3.4 Servicios de programación y sus reglas de uso.....	36
Tabla 4.1 Características de los estados de la FSM secundaria del módulo MAC de la SS.....	48
Tabla 4.2 Descripción de los atributos del módulo src_type_1.....	53
Tabla 4.3 Configuración del generador de tráfico MPEG.....	54
Tabla 4.4 Configuración del generador de tráfico de Internet.....	55
Tabla 4.5 Configuración del generador de tráfico.....	63
Tabla 5.1 Parámetros del canal de radiofrecuencia.....	70
Tabla 5.2 Características del escenario A.....	71
Tabla 5.3 Retardos de Poleo y ETE.....	76
Tabla 5.4 Características del tráfico utilizado en el escenario de simulación C.....	77
Tabla 5.5 Asignación del Ancho de Banda.....	81
Tabla C.1 Paquetes y Peticiones, Escenario A.....	105
Tabla C.2 Retardos y Throughput, Escenario A.....	105
Tabla C.3 Utilización Escenario A.....	106
Tabla C.4 Paquetes y Peticiones, Escenario B.....	106
Tabla C.5 Retardos, Throughput y Utilización, Escenario B.....	106
Tabla C.6 Paquetes y Peticiones, Escenario C.....	107
Tabla C.7 Retardos, Throughput y Utilización, Escenario C.....	107
Tabla C.8 Paquetes Recibidos y Retardos, Escenario Final.....	108
Tabla C.9 Throughput y Utilización, Escenario Final.....	109
Tabla C.10 Tasa de Pérdida de Paquetes.....	109

Índice de Figuras

Figura 1.1 Esquema general de una red inalámbrica de banda ancha.....	3
Figura 2.1 Esquema evolutivo de la telefonía celular	12
Figura 2.2 Arquitectura Punto - Multipunto.....	13
Figura 2.3 Arquitectura Multipunto - Multipunto.....	14
Figura 2.4 Evolución de la tecnología WiMAX.....	18
Figura 2.5 Esquema básico de un sistema DOCSIS.....	20
Figura 3.1 MAC PDU.....	25
Figura 3.2 Formato del Encabezado MAC Genérico	26
Figura 3.3 Formato del Encabezado de Petición de Ancho de Banda.....	28
Figura 3.4 Formato del Mensaje de Administración.....	29
Figura 3.5 Ejemplo de la asignación de ancho de banda en una ráfaga FDD.....	38
Figura 3.6 Ejemplo de la asignación de ancho de banda en una ráfaga TDD.....	39
Figura 3.7 Estructura del subframe de subida	40
Figura 3.8 Estructura del subframe de bajada en un sistema TDD.....	41
Figura 3.9 Estructura del subframe de bajada en un sistema FDD.....	42
Figura 4.1 Modelo de Red.....	46
Figura 4.2 Modelo de nodo de la estación subscriptora.....	47
Figura 4.3 FSM primaria, Módulo MAC de la SS.....	47
Figura 4.4 FSM secundaria, Módulo MAC de la SS.....	48
Figura 4.5 Modelo de nodo de la estación base.....	49
Figura 4.6 FSM primaria, Módulo MAC de la BS.....	50
Figura 4.7 FSM secundaria, Módulo MAC de la BS.....	50
Figura 4.8 Codificación de una Señal de Voz basada en G711	51
Figura 4.9 Cálculo del número de slots a solicitar (tamaño del grant) cuando se utilizan palabras de código cortas.....	52
Figura 4.10 Configuración del generador de tráfico de voz G.711.....	53
Figura 4.11 Distribución de tráfico UGS.....	53
Figura 4.12 Tamaños de los paquetes de un archivo MPEG	54
Figura 4.13 Distribución del tamaño de paquetes de tipo Internet	55
Figura 4.14 Cálculo del número de slots a solicitar (Grant Size) cuando se utilizan palabras de código largas, en la transmisión de un Ethernet MAC frame de 1518 bytes.....	56
Figura 4.15 Proceso bwa_gen_src.....	57
Figura 4.16 Primera ronda para nrtPS.....	60
Figura 4.17 Resolución de peticiones piggyback.....	60
Figura 4.18 Función de distribución Pareto.....	62
Figura 4.19 Función de distribución Log2-Normal.....	62
Figura 4.20 Formato del mensaje.....	64
Figura 4.21 Tiempos para calcular los delays.....	64
Figura 4.22 C conteo de las peticiones en contención.....	66
Figura 5.1 Paquetes generados, recibidos y peticiones totales vs número de SSS.....	72
Figura 5.2 Peticiones totales, peticiones sin datos y peticiones en piggyback vs número de SSS.....	72

Figura 5.3 Retardo End-to-end, retardo de encolamiento, retardo de poleo y retardo de grant vs número de SSs	73
Figura 5.4 Throughput vs número de SSs	74
Figura 5.5 Utilización del canal de radiofrecuencia vs número de SSs	74
Figura 5.6 Peticiones de Ancho de Banda en Contención y en Poleo	75
Figura 5.7 Retardo de Poleo para el Escenario A y B	76
Figura 5.8 Retardo ETE para el Escenario A y B	76
Figura 5.9 Throughput, Escenario A y B	77
Figura 5.10 Utilización del canal de subida. Escenario A y B	77
Figura 5.11 Paquetes generados, recibidos y peticiones totales vs número de SSs	78
Figura 5.12 Peticiones totales, peticiones con datos y peticiones en piggyback vs número de SSs	79
Figura 5.13 Retardo End-to-end, retardo de encolamiento, retardo de poleo y retardo de grant vs número de SSs	80
Figura 5.14 Utilización del canal de radiofrecuencia vs número de SSs	80
Figura 5.15 Paquetes recibidos de cada servicio	82
Figura 5.16 Retardo total para cada servicio	83
Figura 5.17 Bits recibidos durante el tiempo de simulación de cada servicio	84
Figura 5.18 Utilización del Enlace de Subida	85
Figura 5.19 Porcentaje de paquetes perdidos para el servicio UGS	85
Figura 5.20 Porcentaje de paquetes perdidos para el servicio RTP	86
Figura A.1 Las unidades PDU y SDU en un stack de protocolos	95
Figura D.1 Proceso de inicialización de la SS sin errores	110
Figura D.2 Estructura del archivo de configuración	114

Capítulo 1

Introducción

1.1 Definición del Problema

Nuestra era se ha caracterizado por la creciente facilidad para comunicarnos a través de la distancia, lo cual se ha convertido en una necesidad prácticamente imprescindible en nuestro estilo de vida. Esto ha propiciado un fuerte y sostenido desarrollo en las tecnologías de comunicación, cuyo propósito es el de facilitar los recursos necesarios, para que tanto las grandes empresas como los usuarios particulares puedan satisfacer sus necesidades de conectividad, o en otras palabras, reciban un servicio rentable y eficiente de comunicación.

Desde el comienzo de las comunicaciones via radio y en especial, a partir del nacimiento de la era digital, los ingenieros en esta materia se han enfrentado a numerosos retos, que de forma general plantean el problema de cómo proveer servicios cada vez más complejos a una cantidad cada vez mayor de usuarios.

El presente trabajo se enfoca a estudiar el comportamiento que tiene tráfico de información, al circular a través de una de las tecnologías más recientes de comunicación, a saber, la tecnología WiMAX. Esta forma de comunicación es el legado de muchas otras tecnologías, y debido a su naturaleza presenta a su vez varios retos, entre los que se encuentra el poder garantizar la entrega de múltiples servicios, con calidad y eficiencia.

WiMAX es una tecnología basada en estándares, cuyo propósito es el de proveer acceso de última milla en una red inalámbrica de banda ancha, ofreciendo a la vez una poderosa alternativa a tecnologías alámbricas equivalentes como cable y DSL. El potencial que tiene esta tecnología es muy grande, debido a la posibilidad de establecer conexiones inalámbricas de banda ancha a través de grandes distancias, alcanzando hasta 50 kilómetros con línea de vista. Esto es atractivo para todo tipo de usuarios, ya que la tecnología cuenta con suficiente ancho de banda como para soportar simultáneamente cientos de negocios con conectividad T-1, así como cientos de hogares con conectividad DSL.

El hecho de que esta tecnología constituya un estándar, ofrece beneficios para distintos tipos de usuarios como los que se mencionan a continuación:

- *Vendedores de equipos.* Permite especializarse sin tener que desarrollar soluciones end to end.
- *Consumidores.* Permite recibir servicios en áreas que anteriormente se encontraban fuera de la red de banda ancha, como zonas rurales.
- *Proveedores de servicios.* Una plataforma común permite un descenso en los costos así como un entorno de sana competencia que a su vez propicia más innovación.
- *Mercados de componentes electrónicos.* La estandarización crea la oportunidad de fabricar grandes volúmenes (ejemplo: fabricantes de chips).

La versión de WiMAX para usuarios fijos, basada en IEEE 802.16-2004 Air Interface Standard [1] demostró ser una alternativa costeable y efectiva a cable y DSL. En diciembre de 2005, la IEEE ratificó la enmienda 802.16e al estándar 802.16. Ésta

enmienda agrega las características y atributos necesarios al estándar para poder soportar usuarios móviles, teniendo como meta a futuro el poder establecer arquitecturas de red necesarias para implementar soluciones WiMAX end-to-end.

Entre los elementos que constituyen el estándar IEEE 802.16 se encuentra la arquitectura MAC, cuya premisa fundamental es encargarse de la Calidad de Servicio (QoS por sus siglas en inglés). En ella se definen flujos de servicio que son atendidos y direccionados por la estación base, en función de la importancia inherente a su tipo (voz, video, datos, etc.). Adicionalmente, se cuenta con esquemas de señalización basados en mapas, que proveen un mecanismo flexible para la planificación (scheduling) del uso del ancho de banda total, a través de la interfase de aire.

1.2 Modelado de Redes de Acceso Inalámbrico de Banda Ancha

En la actualidad existen dos aplicaciones principales para la tecnología WiMAX: las aplicaciones fijas con arquitectura punto-multipunto que permiten el acceso de hogares e industrias a la red de banda ancha, y las aplicaciones móviles que ofrecen la movilidad de las redes celulares a las velocidades de una red de banda ancha.

El presente trabajo se enfoca en los sistemas fijos, que incluyen por lo menos una *estación base (BS)* y una o más *estaciones subscriptoras (SS)*. La primera es básicamente un nodo central que proporciona el servicio a las estaciones subscriptoras, ubicadas a diferentes distancias en la periferia de la estación base.

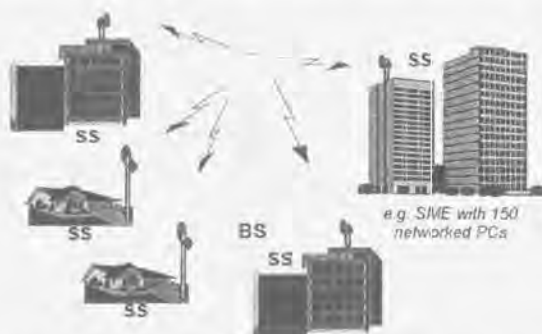


Figura 1.1 Esquema general de una red inalámbrica de banda ancha

En flujo de información que viaja en la dirección BS-SS se define como *canal de bajada*, y de forma análoga, el flujo de información que va en la dirección contraria se define como *canal de subida*. En el canal de bajada se utiliza el esquema de multiplexión TDM (Time Division Multiplexing) debido a que se trata de un canal tipo broadcast. Por otra parte, el tiempo en el canal de subida se encuentra usualmente dividido en slots, con varios usuarios intentando acceder al canal, propiciando el uso de la técnica TDMA (Time Division Multiple Access).

1.3 Propuesta de las Redes BWA

Los servicios típicos que ofrecen las redes BWA incluyen el acceso a Internet, así como servicios de voz, datos y video. El estándar IEEE 802.16 está dirigido a atender la conectividad de última milla (también conocida como primera milla) para redes inalámbricas de área metropolitana. Su propósito es el de hacer un uso eficiente del ancho de banda comprendido entre los 2 y 66 GHz, definiendo para ello una capa de Control de Acceso al Medio (MAC layer) que soporta múltiples aplicaciones a nivel de capa física, dependiendo de la banda de frecuencia en uso.

Los mecanismos establecidos en la capa MAC proveen Calidad de Servicio en forma diferenciada, a fin de poder soportar los diversos requerimientos que demanda cada tipo de servicio. Por ejemplo, las aplicaciones de voz y video no son tolerantes a la latencia, aunque pueden tolerar cierta tasa de errores. En contraste, las aplicaciones de datos son poco sensibles a la latencia, pero no pueden tolerar errores. El estándar incorpora todas estas aplicaciones utilizando las características apropiadas de la capa MAC, lo cual es más eficiente que realizar esta tarea en capas superiores.

A fin de mejorar la Calidad de Servicio, el estándar incorpora esquemas de modulación adaptativa, que son capaces de balancear de forma efectiva las diferentes velocidades de transmisión y la calidad en los enlaces. El método de modulación se ajusta prácticamente de forma instantánea, a fin de conseguir una tasa de transmisión óptima, haciendo un uso más eficiente del ancho de banda y permitiendo una mayor cantidad de usuarios.

Como se mencionó previamente, debido a la arquitectura punto-multipunto, la estación base transmite básicamente una señal TDM, con el espacio asignado a cada estación subscriptora ubicado separadamente en time-slots. Por otra parte, para el acceso al canal ascendente se utiliza la técnica TDMA. La técnica de duplexión a utilizar ha sido objeto de extensas discusiones, sin embargo, el estándar permite la utilización tanto de TDD (Time Division Duplexing) como de FDD (Frequency Division Duplexing). En la duplexión TDD los enlaces de subida y bajada comparten un canal pero no transmiten simultáneamente, a diferencia de la duplexión FDD en donde los enlaces de subida y bajada operan en canales distintos, pero pueden transmitir de forma simultánea.

1.4 Objetivos y Contribuciones

El estudio realizado en el presente trabajo pretende ofrecer una idea clara del comportamiento que tendría el servicio nrtPS (Servicio de Propuesta no en Tiempo Real), al transportar el tráfico generado por aplicaciones como FTP (File Transfer Protocol) o Internet. Para ello es necesario entender la estrecha relación que guarda el diseño de la capa MAC del estándar IEEE 802.16 con el manejo de la Calidad de Servicio.

Con el propósito de modelar los elementos de una red inalámbrica de este tipo, se ha utilizado el software de simulación OPNET Modeler 8.1, que permite considerar en el

estudio todos los componentes de red pertenecientes a las 7 capas del modelo OSI, así como las características del medio de propagación utilizado, el aire.

Además, en el mismo software de simulación se implementó un generador de tráfico que utiliza distribuciones de probabilidad para modelar, en la forma más apegada a la realidad, el comportamiento del tráfico que se utilizará en los diferentes escenarios de simulación. Entre los principales parámetros que definen a cada tipo de tráfico se encuentra el tamaño típico de los paquetes y el tiempo de creación entre los mismos.

1.5 Estructura de la Tesis

El presente trabajo busca también brindar al lector un panorama acerca de las principales características de las tecnologías más recientes de comunicación tanto alámbrica como inalámbrica, que a su vez han sido la base para el desarrollo de la tecnología WiMAX.

En el segundo capítulo se presenta el estado del arte las redes de segunda y tercera generación, mencionando de manera breve la evolución y características de las tecnologías más representativas. Incluyendo los estándares IEEE 802.11 o WiFi e IEEE 802.16 o WiMAX.

En el tercer capítulo se realiza una descripción de la operación del estándar IEEE 802.16 WiMAX, en donde se mencionan los procedimientos que se llevan a cabo para establecer la comunicación entre la estación base y la estación suscriptora, así como los elementos de señalización y mecanismos de resolución de problemas.

En el cuarto capítulo se presenta un modelo de simulación basado en el simulador OPNET Modeler 8.1, en el que se describen los principales componentes de una red BWA. La parte principal de este capítulo es la implementación del servicio nrtPS, su generador de tráfico y los parámetros de medición empleados para validar nuestro trabajo.

El quinto capítulo está compuesto de varios escenarios de simulación, elegidos adecuadamente para mostrar las diferentes características del servicio nrtPS. Cada escenario presenta resultados con los cuales se realizó un análisis del desempeño del algoritmo implementado, permitiéndonos comprobar el trabajo realizado.

El sexto capítulo se enfoca en las conclusiones, discusiones finales y en un análisis del trabajo futuro para el presente trabajo. En general se hace una revisión de los objetivos propuestos para concluirlos con los resultados obtenidos.

Capítulo 2

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

2.1 Introducción

Las comunicaciones inalámbricas han experimentado un gran desarrollo en los últimos años y se han convertido en una forma de comunicación con mucha penetración en nuestra sociedad. En el caso de la telefonía celular móvil, el número de usuarios ha crecido a tal grado, que ha sobrepasado significativamente al número de usuarios de telefonía fija, mientras que por su parte, las aplicaciones fijas como el Internet inalámbrico, gozan cada vez de mayor difusión debido a la practicidad que ellas ofrecen. Numerosas organizaciones y grupos de trabajo han sido formados, con el propósito de realizar investigación y desarrollo en este tipo de tecnologías, hasta convertirlas en estándares de validez mundial.

El propósito de este capítulo es brindar un panorama general acerca de la evolución de los sistemas de comunicaciones inalámbricas, en donde destaca la presencia de la telefonía móvil en la provisión de un precedente para el desarrollo de las comunicaciones de banda ancha.

Con el fin de clasificar estos sistemas tanto por su desempeño, características y orden de aparición, se ha dividido su evolución en "generaciones". Las redes inalámbricas de primera generación fueron diseñadas principalmente para la transmisión de voz, incluyendo el envío de datos a bajas tasas de transmisión. Posteriormente surgen los sistemas inalámbricos de segunda y tercera generación, entre cuyas características incorporadas se encuentra en soporte de la Banda Ancha y Calidad de Servicio.

A medida que aumenta la demanda de nuevos servicios y aplicaciones, lo hace también la complejidad en la infraestructura de los sistemas. Así también, el tipo de tráfico que circula a través de estas nuevas redes se ha diversificado, surgiendo así la necesidad de definir distintos tipos de servicio y de implementar mecanismos, que traten a cada uno de manera conveniente a sus características.

El desarrollo de nuevas técnicas de modulación, encriptación así como de elementos de procesamiento de información, han conseguido mejorar la eficiencia en el uso del espectro y transmitir información a velocidades cada vez mayores, con el fin de poder atender a la creciente demanda de servicios y aplicaciones que presentan los mercados actuales.

2.2 Evolución de los Sistemas de Telefonía Móvil

2.2.1 La Primera Generación (1G)

Los sistemas de primera generación, representados como 1G, tenían como principal objetivo la transmisión de señales de voz en cualquier lugar y a cualquier hora, sin tener que depender de la infraestructura de telefonía fija. Estos sistemas realizaban las transmisiones de forma analógica utilizando emisores de alta potencia y esquemas simples de modulación en frecuencia. El tráfico era multiplexado utilizando la técnica FDMA (Frequency Division Multiple Access), la cual asigna una banda de frecuencia distinta para cada usuario.

En estos sistemas cada usuario cuenta dos canales de frecuencia dedicados, disponibles durante todo el intercambio de información con la estación base. Los canales de tráfico utilizaban la modulación FM (Frequency Modulation) en bandas de entre 400 y 900 MHz, dependiendo del sistema. Además se contaba con canales independientes de señalización, que utilizaban la modulación digital FSK (Frequency Shift Keying) a tasas binarias de aproximadamente 10 kbps.

Una de las principales desventajas de esta tecnología consistía en que las señales de voz no eran sometidas a ningún proceso de encriptación, lo que permitía que cualquier persona con un scanner de frecuencia escuchara las conversaciones ajenas con tan solo sintonizarse a la frecuencia deseada. Además, debido a las limitantes del espectro radioeléctrico, era necesario que las frecuencias fueran reutilizadas en celdas que se encontraran lo más lejano posible entre ellas, con el fin de evitar tener a dos usuarios utilizando la misma banda de frecuencia.

Algunos de los principales sistemas que representan a esta generación son el sistema NMT (Nordic Mobile Telephone) desarrollado por Nokia y Ericsson y lanzado en los países nórdicos en el año de 1981, el sistema AMPS (Advanced Mobile Phone System) desarrollado en los Laboratorios Bell y usado comercialmente en Estados Unidos para el año de 1983, y el sistema TACS (Total Access Communication System) versión europea de AMPS desarrollado por Motorola y disponible en Inglaterra para 1985.

2.2.2 La Segunda Generación (2G)

Los sistemas de comunicaciones móviles de segunda generación (2G) se encuentran actualmente en uso en varias partes del mundo. La principal diferencia con respecto a los sistemas primera generación consiste en que las señales transmitidas son de tipo digital, siendo TDMA (Time Division Multiple Access) la técnica de multiplexión usada en la interfase de aire. Esta migración a la tecnología digital implicó que la arquitectura y los componentes cambiaran radicalmente. Los protocolos detrás de estos sistemas soportan la transmisión de voz y algunas formas de transmisión de datos tales como fax y SMS (Short Messaging Service), ofreciendo además diferentes niveles de encriptación y seguridad.

El sistema con mayor dominio a nivel mundial sin duda ha sido GSM (Global System for Mobile Communications), principalmente debido a su capacidad para realizar roaming, y a su temprana estandarización por parte del organismo europeo ETSI (European Telecommunications Standards Institute). Utiliza las bandas de 900 MHz y 1800 MHz en la mayoría de los países, y las bandas de 850 MHz y 1900 MHz en los Estados Unidos. Este sistema se basa en la conmutación de circuitos y divide cada canal de 200 kHz en ranuras de tiempo (time slots) de 25 kHz, alcanzando velocidades de 9,6 kbps [8].

El segundo sistema con mayor difusión es el sistema CDMAone (originalmente conocido como Interim Standard 95 IS95a). Fue la primera introducción comercial de la tecnología CDMA (Code division Multiple Access) en la cual está basado. Soporta tasas de transmisión de hasta 14,4 kbps y utiliza satélites GPS para el establecimiento

de la hora del sistema. CDMAone ofrece capacidades de seguridad y privacidad al incorporar un sistema criptográfico de autenticación. Además incrementa la eficiencia en el uso del espectro en comparación con los sistemas basados en TDMA.

Otro sistema de esta generación es el llamado PDC (Personal Digital Cellular) utilizado principalmente en Japón, donde continúa siendo ampliamente usado hasta hoy, pero comienza a ser desplazado por las tecnologías de tercera generación. PDC utiliza la técnica TDMA y maneja dos tipos de tasas de transferencia: modo medio (half-rate) donde ofrece hasta 5.6 kbps y modo completo (full-rate) donde ofrece hasta 11.2 kbps.

2.2.3 La Generación 2.5G

Existe también la denominada generación 2.5G, la cual es una tecnología intermedia entre las generaciones 2G y 3G, aunque no cuenta con una definición estandarizada.

El sistema GPRS (General Packet Radio Service) es un estándar de esta generación basado en GSM. A diferencia de su antecesor, utiliza la conmutación de paquetes como sistema de comunicación, garantizando tasas de transmisión de entre 56 y 114 kbps. El uso de la conmutación de paquetes permite optimizar los recursos de radio, debido a que usuarios solamente usarán la red cuando se envíe o reciba un paquete de información, y mientras tanto, los recursos quedan disponibles para otros usuarios.

Algunas otras tecnologías de la generación 2.5 son HSCSD (High-Speed Circuit-Switched Data) que utiliza la conmutación de circuitos para la transmisión de datos a tasas de hasta 38.4 kbps, y CDMAtwo (IS-95b) que mejora a CDMAone al permitir el uso de 8 códigos diferentes por línea telefónica, logrando tener hasta 8 transmisiones simultáneas y soportando una tasa de hasta 64 kbps.

Fue principalmente el uso de técnicas más complejas de modulación digital lo que permitió hacer más eficiente el uso del ancho de banda, logrando obtener al menos tres canales digitales por cada canal de transmisión analógica, dependiendo el sistema.

2.3 Redes inalámbricas de tercera generación (3G)

La tercera generación (3G) es el término usado para describir a la más reciente generación de servicios de telefonía móvil, que provee mejor calidad de voz, mayores tasas de transferencia de datos, acceso a Internet y servicios multimedia.

La Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU por sus siglas en inglés) requiere que los sistemas de tercera generación, entre otras capacidades, tengan una mayor eficiencia espectral que los sistemas de segunda generación, soportando tasas de transmisión de por lo menos 144 kbps en dispositivos móviles y de 2 Mbps en dispositivos fijos.

2.3.1 EDGE

El sistema EDGE (Enhanced Data rates for GSM Evolution) también conocido como EGPRS (Enhanced General Packet Radio Service) nace con el objetivo de mejorar el desempeño de las redes GSM de segunda generación. Las mejoras consisten principalmente en dos aspectos; el primero de ellos fue el reemplazo de la anterior técnica de modulación GSMK (Gaussian Minimum Phase Keying) por la nueva 8PSK (8 Phase Shift Keying), la cual permite triplicar la capacidad de transmisión de datos con respecto a la modulación anterior, alcanzándose los 384 kbps en el modo de conmutación de paquetes. El segundo aspecto consiste en la mejora de los protocolos de comunicación por radio.

EDGE utiliza la misma estructura TDMA, canales lógicos y ancho de banda de portadora de 200 kHz que los sistemas GSM, lo cual lo hace compatible y permite su fácil implementación en las redes existentes GSM/GPRS. Por tal motivo, EDGE es visto fundamentalmente como una actualización de software, que permite a los operadores ya sea triplicar la cantidad de usuarios que se tenían en GPRS o bien agregar capacidades extra a las comunicaciones de voz.

EDGE permite la entrega de servicios avanzados de telefonía móvil tales como la descarga de clips de música y vídeo, mensajería multimedia, acceso de alta velocidad a Internet y correo electrónico, todo con una interfaz a color.

Las mejoras introducidas por este sistema permiten un uso más eficiente del espectro dentro de las bandas de 800, 900 y 1800 MHz, abriendo paso al mercado de la telefonía de tercera generación.

2.3.2 CDMA2000

CDMA2000 representa una familia de estándares que al igual que CDMAone, utilizan la técnica de Acceso Múltiple por División de Código (CDMA). Dicha técnica ha resultado ser una ventaja comercial con respecto a los sistemas que utilizan TDMA, ya que a pesar de estos últimos disponen de gran capacidad, no permiten que varios usuarios transmitan de forma simultánea, debido a que a cada uno se le asigna un espacio de tiempo en particular. CDMA en contraste, permite que múltiples usuarios compartan el mismo canal para transmitir de manera simultánea, mediante la asignación de códigos diferentes para cada uno.

Las tecnologías CDMA2000 1X y CDMA2000 1xEV-DO son las principales representantes de esta familia, y a su vez son compatibles con la tecnología CDMAone.

2.3.2.1 CDMA2000 1X

Esta tecnología permite prácticamente triplicar la capacidad de CDMAone, manejando tasas de transmisión para dispositivos móviles de hasta 153 kbps en su primera versión (Release 0) o de 307 kbps en la versión subsiguiente (Release 1), utilizando

un solo canal de 1.25 MHz. De ahí el término técnico 1X, que implica que se usa la misma portadora de 1.25MHz de cdmaOne, una vez.

Además de triplicar la capacidad de transmisión, permite la selección de diferentes codificadores de voz (Selectable Mode Vocoders) y la utilización de diversos tipos de antenas. La calidad de la voz es de cuatro a ocho veces mejor que en los sistemas que utilizan TDMA.

2.3.2.2 CDMA2000 1XEV-DO

La tecnología CDMA2000 1xEV-DO (Evolution-Data Optimized) es una tecnología enfocada a los datos y permite a los operadores ofrecer aplicaciones más avanzadas, tales como la transferencia de archivos MP3, video-conferencias, transmisiones de TV y descargas de video y audio.

En su primera versión (Release 0) se manejan tasas binarias de hasta 2.4 Mbps, permitiendo a las redes comerciales entregar de 300 a 600 kbps en un solo canal de 1.25 MHz, siendo de las velocidades más altas encontradas comercialmente hoy en día.

La revisión A (CDMA2000 1xEV-DO Revision A) permite la entrega de datos hasta 3.1 Mbps en el canal de bajada, y 1.8 Mbps en el canal de subida, e incorpora controles de Calidad de Servicio (QoS) que pueden manejar la latencia en la red, permitiendo la introducción de servicios más avanzados, como la transmisión de voz y datos a través de cualquier red de tipo IP.

La revisión B de estándar (CDMA2000 Revision B) publicada en la primera mitad del 2006, introduce el esquema de modulación 64-QAM. Utilizando la portadora de 1.25 MHz y una portadora agregada de 5 MHz en el canal de subida, es posible entregar datos a velocidades de 4.9 Mbps y 14.7 Mbps respectivamente. Las características de mejoramiento al delay permitirán incorporar aplicaciones sensibles al tiempo, tales como Voz sobre IP (VoIP), video-telefonía y juegos en línea, entre muchas otras.

2.3.2.3 W-CDMA

W-CDMA (Wideband-Code Division Multiple Access) es un estándar de la ITU derivado de CDMA, oficialmente conocido como IMT-2000. Este sistema es el que aprovecha el ancho de banda de forma más eficiente en ambientes multiusuario, convirtiéndolo en una elección ideal para zonas metropolitanas con gran densidad de usuarios. Esto se debe a la utilización de la técnica de modulación de Espectro Disperso (Spread Spectrum), en su modalidad de secuencia directa (DS), la cual además de permitir utilizar relaciones de señal a ruido (SNR) más bajas sin aumentar la tasa de error binaria (BER), permite la incorporación de gran cantidad de usuarios en un solo canal "ensanchado", maximizando la eficiencia.

W-CDMA combina la conmutación de paquetes y conmutación de circuitos dentro de un mismo canal. Debido al uso de la técnica de Espectro Disperso, utiliza canales de radio con un ancho de banda de 5 MHz (mucho mayores en comparación con los canales de 200 kHz que utiliza CDMA) consiguiendo alcanzar un flujo de datos de hasta 2 Mbps en áreas locales, que queda reducido a 384 kbps en áreas de gran extensión.

2.3.3 UMTS

El sistema UMTS (Universal Mobile Telecommunications System) es una de las tecnologías de telefonía móvil de tercera generación, cuya forma más común utiliza infraestructuras GSM, y W-CDMA como la principal interfase de aire. Actualmente está siendo estandarizado por 3GPP (3rd Generation Partnership Project) y surge como la respuesta europea a los requerimientos de la ITU IMT-2000 para los sistemas de radio de tercera generación.

UMTS es frecuentemente comercializado como 3GSM, enfatizando la combinación de su naturaleza como tecnología de tercera generación así como de estándar GSM, para el cual pretendía ser sucesor.

A continuación se presente un esquema que resume la evolución de los mencionados sistemas de telefonía móvil:

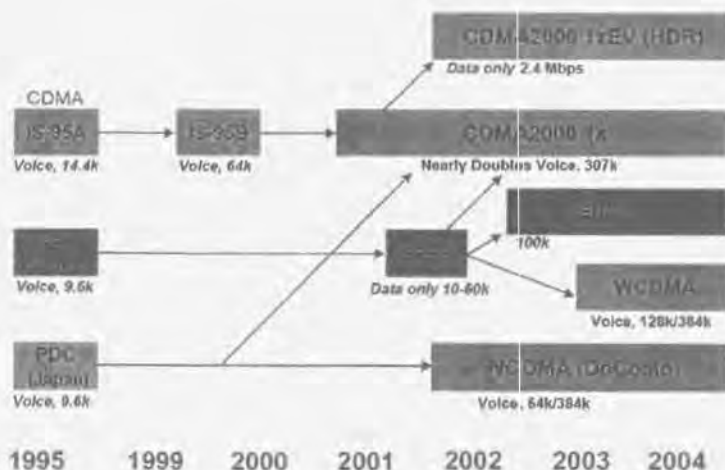


Figura 2.1 Esquema evolutivo de la telefonía celular

2.4 Redes Inalámbricas de Banda Ancha

2.4.1 Arquitectura BWA

El término BWA (Broadband Wireless Access), que en español significa Acceso Inalámbrico de Banda Ancha, se refiere a un conjunto de sistemas fijos de radio, utilizados principalmente para la entrega de servicios entre una red central y varios usuarios. El término "Banda Ancha" es usualmente interpretado como la capacidad para entregar un ancho de banda significativo, que según la ITU debe ser mayor a 1.5 o 2 Mbps [6]. El rango de aplicaciones que pueden manejarse es muy variado y se encuentra en constante expansión, incluyendo voz, datos y servicios de entretenimiento de diversos tipos.

Los sistemas BWA pueden ser de arquitectura punto-multipunto o multipunto-multipunto.

Un sistema punto-multipunto está conformado por una estación base o wireless hub, estaciones terminales, y en algunos casos repetidores. Las estaciones hub cuentan con antenas de ancho de haz relativamente grande, dividido en uno o varios sectores para proveer una cobertura de 360°. Las estaciones terminales utilizan antenas direccionales orientadas al hub y comparten el canal de radio, utilizando métodos como la división de frecuencia, de tiempo o de código. La conexión entre hubs es establecida mediante enlaces de radio, fibra óptica o algún otro medio equivalente, y no forma parte de la red BWA. En estos sistemas los repetidores se usan para mejorar la cobertura, llegando a ubicaciones en donde los hubs no cuentan con línea de vista, y reenviando información desde el hub hacia un grupo de usuarios.



Figura 2.2 Arquitectura Punto - Multipunto

Para soportar múltiples usuarios generalmente se emplea la arquitectura punto-multipunto, asegurando que los wireless hubs se encuentren lo suficientemente

elevados en el terreno, a fin de poder comunicarse directamente con las estaciones terminales.

Los sistemas multipunto-multipunto tienen la misma funcionalidad que los sistemas anteriores, con la diferencia de que los hubs son reemplazados por Access Points, los cuales proveen conexiones a redes centrales por un lado y conexiones de radio a otras estaciones por el otro. Las estaciones subscriptoras pueden ser terminales de radio, o más típicamente, repetidores con acceso a tráfico local. El tráfico puede pasar a través de uno o más repetidores antes de llegar al usuario. Las antenas son direccionales y tienen un ancho de haz estrecho. Mediante mecanismos de alineación vía remota y herramientas de configuración del sistema, es posible lograr niveles altos de cobertura y eficiencia espectral. En estos sistemas la mayoría de las estaciones son repetidores, que a su vez proporcionan acceso a los usuarios locales.

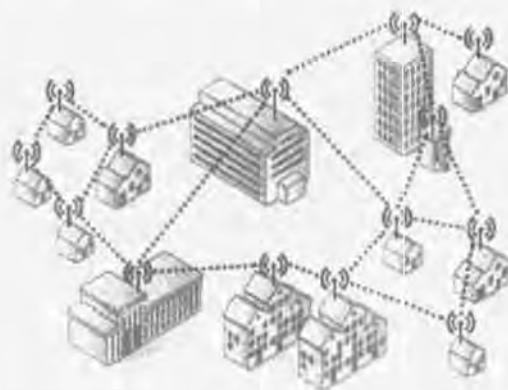


Figura 2.3 Arquitectura Multipunto - Multipunto

En esencia, las diferencias entre las redes BWA y las redes de telefonía móvil actuales, consisten en los requerimientos significativamente mayores de calidad y tasa de transmisión de datos.

2.4.2 Redes IEEE 802.11 o WiFi

WiFi es la abreviatura de Wireless Fidelity, también denominada WLAN (Wireless LAN) o estándar IEEE 802.11.

Al igual que la mayoría de los sistemas LAN inalámbricos, WiFi utiliza la modulación de Espectro Disperso (Spread Spectrum), debido a su poca susceptibilidad al ruido y a que genera muy pocas interferencias. Dicha técnica consigue altos niveles de confiabilidad, integridad y seguridad, principalmente sacrificando la eficiencia de ancho de banda. En otras palabras, el ancho de banda usado es mucho mayor al estrictamente necesario para enviar la información, de modo que los receptores de

radio ordinarios solo pueden captar una pequeña banda de frecuencia, que muy probablemente interpretarán como ruido.

La familia de estándares IEEE 802.11 utiliza la técnica CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance) como mecanismo básico para acceder al medio de transmisión. Bajo este esquema las transmisiones solo son posibles cuando el canal se encuentra desocupado, y dado que las estaciones no son capaces de detectar colisiones, los access points deben enviar un mensaje (ACK) para indicar la recepción exitosa de la información. El efecto directo producido por el uso de este algoritmo es que el throughput efectivo es menor que el ancho de banda del canal (aproximadamente 6 Mbps), ya que ninguna otra información puede ser enviada mientras los mensajes ACK se encuentren circulando por la red.

En el año de 1997 el IEEE emitió el estándar para WLAN IEEE 802.11, que alcanzaba velocidades de hasta 2 Mbps, utilizando la modulación de Espectro Disperso. Dicho estándar soportaba tanto la opción de Secuencia Directa (Direct Sequence) así como la opción de Saltos de Frecuencia (Frequency Hopping), utilizando bandas de radio no licenciadas o públicas como la ISM (Industrial, Scientific and Medical) de 2.4 GHz.

Posteriormente en el año de 1999 se aprobó el estándar 802.11b (WiFi), que podía entregar velocidades de hasta 11 Mbps utilizando el método de modulación DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum) y el CCK (Modulación por Cambios de Código Complementarios) con un alcance de 100 metros y empleando igualmente la banda ISM de 2.4 GHz. Este estándar ha gozado de una mayor aceptación ya que consigue mejorar las tasas de transmisión del IEEE 802.11.

El IEEE también aprobó el estándar 802.11g en el año 2003, compatible con el 802.11b, pero capaz de doblar las velocidades de transmisión (mediante la introducción de una técnica de modulación adicional), alcanzando los 22 Mbps, o incluso los 54 Mbps. Esto permitió competir con otros estándares que prometían velocidades mucho más elevadas pero que eran incompatibles con los equipos 802.11b ya instalados. Por extensión, también se le llama Wi-Fi.

Además existe el estándar en 802.11a, ratificado por la IEEE en el año de 1999, que con la modulación 64-QAM (64-Bit Quadrature Amplitude Modulation) y la modulación OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) alcanza velocidades de hasta 54 Mbps en la banda de 5 GHz, menos congestionada y con menos interferencias que la banda de 2.4 GHz, pero con un alcance limitado a 50 metros. Esto último lleva implícito un costo adicional, debido a que son necesarios más puntos de acceso (Access Points) que si se utilizase 802.11b para cubrir la misma área.

Aunque la concepción inicial de esta tecnología estaba dirigida al uso en interiores, no pasó mucho tiempo sin que se probara su funcionamiento en enlaces de radio para MANs y zonas rurales, debido principalmente a que la infraestructura necesaria para su operación podía encontrarse a bajo costo. Esto último fue consecuencia de la producción masiva de equipos de radio, y de la existencia de licencias que permitían la interoperabilidad entre diversos vendedores (WiFi), propiciando un marco de trabajo bastante favorable en comparación con otras tecnologías.

En la siguiente tabla se presentan de forma resumida las características de las diferentes versiones del estándar IEEE 802.11:

Estándar	Descripción
802.11	Estándar WLAN original. Soporta de 1 a 2 Mbps.
802.11a	Estándar WLAN de alta velocidad en la banda de los 5 GHz. Soporta hasta 54 Mbps.
802.11b	Estándar WLAN para la banda de 2.4 GHz. Soporta 11 Mbps.
802.11e	Está dirigido a los requerimientos de calidad de servicio para todas las interfaces IEEE WLAN de radio.
802.11f	Define la comunicación entre puntos de acceso para facilitar redes WLAN de diferentes proveedores.
802.11g	Establece una técnica de modulación adicional para la banda de los 2.4 GHz. Dirigido a proporcionar velocidades de hasta 54 Mbps.
802.11h	Define la administración del espectro de la banda de los 5 GHz para su uso en Europa y en Asia (Pacífico).
802.11i	Está dirigido a abatir la vulnerabilidad actual en la seguridad para protocolos de autenticación y de codificación.

Tabla 2.1 Versiones del estándar IEEE 802.11

2.4.3 Redes IEEE 802.16 o WiMAX

WiMAX es la abreviación de Worldwide Interoperability for Microwave Access, y es una tecnología basada en el estándar 802.16-2004 de la IEEE, que se espera juegue un papel decisivo en las comunicaciones inalámbricas fijas y móviles de cobertura masiva.

La primera versión del estándar IEEE 802.16 fue terminada en el año 2001 y publicada a principios del año 2002. En ella se regula la interfase de aire de las Redes Inalámbricas de Área Metropolitana (MANs). Como se ha mencionado anteriormente, WiMAX es una tecnología de última/primer milla que ofrece una opción costeable y efectiva a otras tecnologías alámbricas tales como la fibra óptica, cable-módem o DSL (Digital Subscriber Line), de las cuales se hablará con más detalle posteriormente.

Gran parte del crecimiento de estas redes se apoya en su capacidad para permitir la interoperabilidad entre diversos fabricantes, promoviendo su producción masiva y la reducción de costos, lo cual sin duda ayudará a asegurar su adopción a gran escala. Esto es posible gracias al diseño genérico de su capa MAC, que permite soportar parámetros de capa física que dependen de la banda de frecuencia en uso y de las especificaciones asociadas a ella. De esta forma es posible intercambiar información a nivel de capa MAC entre una estación base (BS) y una computadora doméstica, a

pesar de que cada una utilice diferentes protocolos de capa física, ofreciendo además Calidad de Servicio en forma completa [2].

El primer escenario proyectado consiste en poder establecer el enlace entre la red central y el edificio o local del cliente mediante tecnología WIMAX, mientras que los usuarios en el interior del edificio podrán conectarse utilizando redes internas convencionales, tales como Ethernet (IEEE 802.3) o Wireless LAN (IEEE 802.11). Sin embargo se espera que eventualmente sea posible utilizar a la tecnología WIMAX para llegar directamente hasta el usuario final.

El soporte de Calidad de Servicio (QoS) en sistemas como el IEEE 802.11 es generalmente rudimentario, ya que se encuentran basados en esquemas CSMA/CA, conocidos por su efectividad para transmitir datos en la modalidad de Best Effort, pero poco adecuados para el soporte de aplicaciones en tiempo real, debido principalmente a que no existe un mecanismo que limite los retardos producidos por la presencia de tráfico o de interferencias. Con el fin tener un mejor manejo de QoS en las redes BWA, el estándar IEEE 802.16 define métodos de acceso al medio basados en reservación y prioridad, necesarios para el soporte de las aplicaciones mencionadas.

Algunos de los principales algoritmos de programación de tráfico (scheduling) usados en los sistemas BWA son con frecuencia el llamado FCFS (Fist-Come-Fist-Serve) o el RR (Round Robin), debido a su simplicidad, aunque no ofrecen una óptima utilización del enlace y tampoco soportan aplicaciones multimedia. Otros esquemas como el Weighted Fair Queueing ofrecen limitantes al retardo y trato adecuado a cada paquete, sin embargo su complejidad de implementación es alta.

El estándar liberado en el año 2001 se enfoca a frecuencias de entre los 10 y 66 GHz. Posteriormente la enmienda IEEE 802.16a agregó el manejo de frecuencias de entre 2 y 11 GHz, involucrando el desarrollo de nuevas especificaciones de capa física y de mejoras a la capa MAC básica. Además, el grupo de trabajo IEEE 802.16 ha completado el estándar 802.16.2, enfocado a la coexistencia de diferentes sistemas BWA, y espera a través del proyecto IEEE 802.16.2a, expandir sus recomendaciones para incluir bandas licenciadas entre los 2 y 11 GHz.

Las bandas licenciadas de 10-66 GHz proveen un entorno físico, en donde debido a la corta longitud de onda, se vuelve indispensable utilizar línea de vista (LOS) y el uso de multi-trayectorias queda definitivamente fuera de la cuestión. Se utilizan modulaciones con portadora simple (Single Carrier Modulation) en conjunto con perfiles adaptativos de ráfaga (Adaptive burst profiling), donde esquemas de modulación y codificación pueden ajustarse para cada SS, en canales cuyos anchos de banda son típicamente de 20 o 25 MHz en Estados Unidos y de 28 MHz en Europa [1].

Las frecuencias por debajo de los 11 GHz proveen un entorno físico en donde, debido a las longitudes de onda más cortas, la línea de vista deja de ser necesaria y las multi-trayectorias se convierten en una opción a considerar. La habilidad para soportar estos escenarios, mejor llamados near-LOS y non-LOS, requiere de funcionalidades

adicionales de la capa física, tales como el soporte de técnicas avanzadas de control de potencia, mitigación y manejo de interferencias y el uso múltiples tipos de antenas. La enmienda 802.16a define tres interfases de aire para las frecuencias de 2 a 11 GHz, que incluyen tanto bandas licenciadas como no licenciadas:

- *WirelessMAN-SC2*: Que utiliza un esquema de modulación con portadora simple.
- *WirelessMAN-OFDM*: Que utiliza la modulación Orthogonal Frequency-Division Multiplexing y la técnica de acceso TDMA.
- *WirelessMAN-OFDMA*: Que utiliza la técnica Orthogonal Frequency-Division Multiple Access, en la que acceso es provisto direccionando un conjunto de múltiples subportadoras hacia un receptor individual.

Las tasas de datos típicas para hogares y oficinas pequeñas en un enlace compartido oscilan entre los 5 y 10 Mbps en el canal de bajada y entre los 0.5 y 2 Mbps en el canal de subida. Esta asimetría surge de la naturaleza y dominio del tráfico Web. Los canales tienen un ancho de banda típico de 20 MHz y soportan una tasa binaria de hasta 75 Mbps

En diciembre de 2005 se ratificó la versión 802.16e [3] del estándar, que incorpora las características y atributos necesarios para soportar movilidad. Esta enmienda supone una solución que permite la convergencia entre sistemas de banda ancha tanto fijos como móviles. Utiliza OFDMA y SOFDMA (Scalable Orthogonal Frequency Division Multiple Access) para propiciar la escalabilidad de los anchos de banda abarcando de 1.25 a 20 MHz, a fin de cumplir con diferentes requerimientos a nivel mundial.

En la siguiente figura se muestra de manera general la evolución de la tecnología WIMAX:

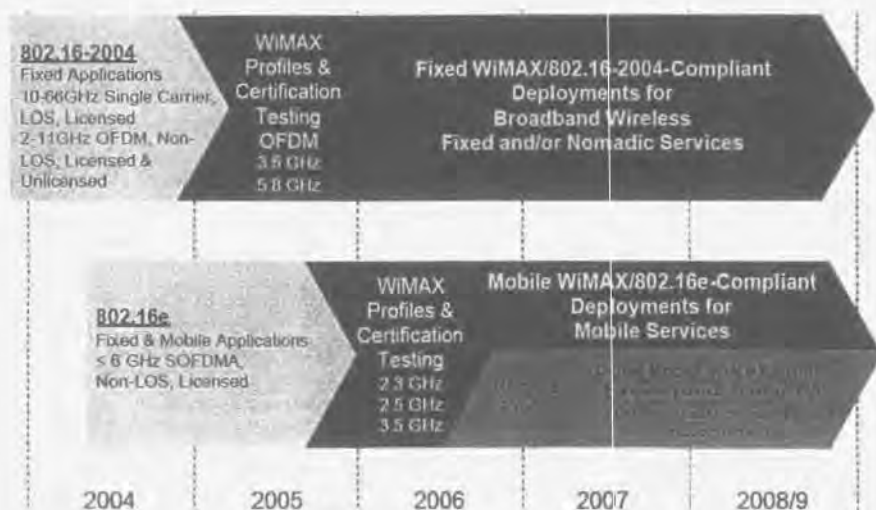


Figura 2.4 Evolución de la tecnología WIMAX

2.5 Otras Tecnologías

2.5.1 DSL

DSL (Digital Subscriber Line) es un conjunto de estándares que permiten ofrecer conectividad de banda ancha utilizando las líneas telefónicas convencionales. Las conversaciones de voz sólo utilizan una pequeña parte del ancho de banda total que puede ofrecer un cable de cobre, por lo que ésta familia de tecnologías basa su funcionamiento en aprovechar esa capacidad extra del medio de transmisión para el envío de datos, sin perturbar el servicio de telefonía convencional. El plan está basado en asignar frecuencias específicas a tareas específicas.

Una ventaja de las líneas DSL, es que sólo necesitan de un teléfono y de la instalación de un dispositivo llamado Splitter, que se conecta al par de cobre y divide la línea telefónica en dos pares separados: uno para las comunicaciones de voz y otro para las de datos. Los operadores telefónicos proporcionan habitualmente tres canales: dos para datos (bajada y subida) y uno para voz.

Entre las principales variantes que incluye DSL se encuentran las siguientes:

- **ADSL (Asymmetrical DSL).** Es la forma más común de DSL. En esta modalidad, al canal de subida le es asignado un ancho de banda diferente al del canal de bajada. Las configuraciones típicas permiten ofrecer 2 Mbps en el canal de bajada y 128 kbps en el canal de subida. Sin embargo, el desempeño de esta tecnología es dependiente de la distancia, ofreciendo un servicio confiable dentro de una distancia de 18,000 pies (5,460 metros), más allá de los cuales las velocidades de transmisión no pueden ser garantizadas.
- **HDSL (High Bit Rate-DSL).** Es una modalidad orientada básicamente al uso empresarial. Trabaja de forma simétrica manejando una tasa de transmisión de 2.32 Mbps en cada una de las direcciones de transmisión.
- **VDSL (Very High Bit Rate-DSL).** Es una variante de DSL que trabaja de forma asimétrica y opera a muy altas velocidades, manejando hasta 55 Mbps en el canal de bajada, pero con una distancia límite de 1000 pies (~300 metros) desde la oficina central.
- **SDSL (Single Line DSL).** Es una variante de DSL donde tanto el canal de subida como el de bajada utilizan el mismo ancho de banda, operando típicamente a 1.5 Mbps.
- **IDSL (ISDN over DSL).** Esta modalidad maneja 144 kbps. Es un estándar de baja velocidad y relativamente costoso, sin embargo puede operar en escenarios donde ADSL no puede, lo que lo convierte ocasionalmente en una opción viable.
- **RADSL (Rate Adaptive DSL).** Es una variante asimétrica de DSL que puede ajustar la velocidad de la conexión en función de la distancia hacia la oficina central y de la calidad de la conexión.

2.5.2 Cable Módem

El proyecto Cable Módem fue desarrollado y certificado por los Laboratorios de Televisión por Cable (The CableLabs). Es también conocido como DOCSIS (Data Over Cable Service Interface Specification) [11], y forma parte de una serie de especificaciones que definen la tercera generación de sistemas de transmisión por cable a altas velocidades.

Los sistemas DOCSIS compiten con los sistemas DSL en la oferta de servicios de banda ancha. Ambos sistemas se encuentran disponibles a millones de usuarios de tipo empresarial o doméstico alrededor del mundo. Algunas de las diferencias entre ambos servicios se deben principalmente al proveedor, haciendo que la confiabilidad, el costo, la calidad y el soporte al usuario dependan directamente de este factor.

Entre los elementos que conforman un sistema DOCSIS se encuentra el cable módem, que es un tipo especial de módem capaz de modular la señal de datos sobre la infraestructura de televisión por cable, aprovechando el ancho de banda que no fue utilizado en éste servicio, y el CMTS (Cable Modem Termination System), que es un dispositivo ubicado en la cabecera de la compañía de cable, y proporciona a los cable módems conectividad a las grandes redes de datos.

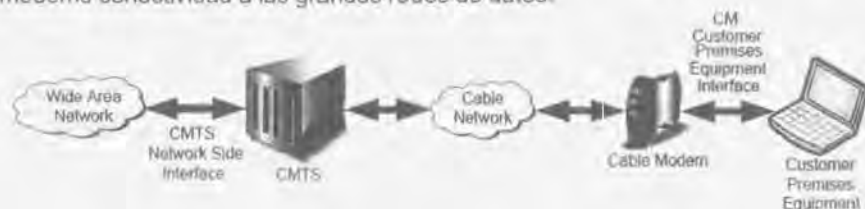


Figura 2.5 Esquema básico de un sistema DOCSIS

El sistema DOCSIS permite una transferencia bidireccional de tráfico IP (Internet Protocol) entre las estaciones centrales y las estaciones de usuario, dentro de un sistema de cable. Lo anterior puede realizarse tanto en redes de cable coaxial como en redes híbridas HFC (hybrid-fiber/coaxial).

DOCSIS proporciona una gran variedad de opciones disponibles en las capas 1 y 2 del modelo OSI, más específicamente en la capa física (PHY) y la capa de control de acceso al medio (MAC). En las tablas 2.2 y 2.3 se muestran algunas de sus principales características.

	Ancho de Banda Máximo por canal	Máxima Eficiencia Espectral	Máxima tasa de datos por canal
DOCSIS 1.0	3.2 MHz	1.6 bps/Hz	5.12 Mbps
DOCSIS 1.1	3.2 MHz	3.2 bps/Hz	10.24 Mbps
DOCSIS 2.0	6.4 MHz	4.8 bps/Hz	30.72 Mbps

Tabla 2.2 Comparación de la mejora del Ancho de banda provisto por el estándar DOCSIS 2.0 con respecto a DOCSIS 1.x.

	DOCSIS 1.0/1.1 TDMA	DOCSIS 2.0 TDMA/SCDMA
Modulación	QPSK, 16-QAM	QPSK, 8, 16, 32, 64-QAM
Tasa de Símbolos	160 - 2,560 kBaud	160 - 5.120 kBaud
Tasa Binaria	320 - 10,240 kbps	320 - 30,720 kbps

Tabla 2.3 Algunas características avanzadas de DOCSIS 1.x y DOCSIS 2.0

La significativa mejora en la eficiencia de ancho de banda que ofrece DOCSIS 2.0, se logra utilizando una capa física mejorada que soporta una mayor tasa de símbolos así como modulaciones de orden superior, en comparación con las disponibles en la tecnología DOCSIS 1.x

2.5.3 LMDS

En 1998 la Comisión Federal de Comunicaciones estadounidense (FCC) sostuvo la primera de dos subastas de la banda de 1.3 GHz, para la oferta de servicios LMDS en el rango de frecuencias de 28 a 31 GHz. Debido a que la primera subasta fracasó en vender el total de las 986 licencias, se realizó una segunda subasta en el año de 1999, con el fin de completar la venta de las licencias LMDS.

LMDS (Local Multipoint Distribution Service) es una tecnología inalámbrica que permite transmitir grandes cantidades de información a velocidades de transmisión muy altas utilizando radios de microondas. Para ello solo es necesario instalación de antenas de radio tanto en la estación base como en la locación del cliente. Esto puede hacerse usando arquitecturas punto a punto o punto a multipunto. Este servicio de comunicaciones inalámbricas fijas de banda ancha fue diseñado para resolver el problema de acceso de última milla en hogares y negocios.

Básicamente un sistema LMDS consiste en un centro de operaciones de red (Network Operations Center o NOC) encargado de la administración del sistema, una infraestructura basada en fibra óptica que realiza la conexión entre NOCs, una estación base que es usualmente montada en torres de comunicaciones celulares (interfase entre el medio inalámbrico y la fibra óptica) y dispositivos llamados CPEs (Customer Premises Equipment) instalados en la localidad del cliente, equipados con circuitería para la modulación y demodulación de las señales.

Este tipo de tecnología, similar a la tecnología celular, se basa en el empleo de TDMA y FDMA para el soporte de múltiples usuarios fijos en un radio de cobertura de entre 3 y 5 millas, entregando tasas binarias de hasta 1.5 Gbps en el canal de bajada y de 200 Mbps en el canal de subida.

LMDS es una adaptación del estándar DOCSIS+ (que a su vez es la modificación de DOCSIS para la interfase inalámbrica de banda ancha). El transporte seguro de la información se logra mediante la encriptación utilizando dos dispositivos: un módem inalámbrico y un WMTS (Wireless Modem Termination System) ubicado en la estación base.

El impacto comercial de este sistema no ha sido muy fuerte, debido a que como trabaja en frecuencias elevadas (muy cercanas a las ondas milimétricas), requiere que sus equipos pasen por procesos de manufactura mucho más finos en comparación a sus contrapartes de telefonía celular, además de que el equipo para realizar pruebas es mucho más costoso. Esto ha desplazado a la tecnología LMDS como solución en las transmisiones de última milla.

Aunque muchas de las licencias LMDS ya han sido vendidas, un número considerable de compañías de telecomunicaciones, incluyendo Cisco Systems, Motorola y XO Communications, han decidido invertir en tecnología LMDS para sus enlaces de datos de alta velocidad, con miras a expandir dicha infraestructura hasta el subscriber.

2.6 Conclusiones

En el presente capítulo se ha podido apreciar la tendencia evolutiva que han tenido las comunicaciones en los últimos 30 años. La intención ha sido proporcionar al lector un punto de referencia para poder entender de forma más completa la tecnología sobre la que se centra este trabajo, que es la tecnología WiMAX.

Ha podido observarse que las nuevas tecnologías obtienen su éxito al ser capaces de agregar características que mejoren a las ya existentes infraestructuras, en lugar de proponer la implementación de sistemas totalmente nuevos, lo cual sería un proceso mucho más largo y costoso.

Las comunicaciones sin duda seguirán una ruta marcadamente encaminada a utilizar las ventajas que ofrecen los sistemas celulares actuales, principalmente en lo concerniente a la movilidad, y fusionarlas con las grandes tasas de transmisión y calidad de servicio que ofrecen los sistemas de banda ancha, que son hasta ahora primordialmente fijos.

Capítulo 3

Descripción del Estándar IEEE 802.16 WiMAX

3.1 Introducción

El estándar especifica la interfase de aire, incluyendo la capa de control de acceso al medio (MAC) y la capa física (PHY), de sistemas punto-multipunto de acceso inalámbrico de banda ancha (BWA) que proporcionan múltiples servicios. La capa MAC está diseñada de tal forma que soporte diversas especificaciones para la capa PHY, cada una apropiada para un ambiente operacional en particular.

Un sistema consiste en una implementación de una MAC IEEE 802.16 y una PHY, con al menos una estación suscriptor (SS, subscriber station) comunicándose con una estación base (BS, base station) por medio de la interfaz de aire.

La intención de este estándar es permitir una rápida aceptación de los productos de acceso inalámbrico de banda ancha, de diferentes fabricantes, para facilitar la competencia de acceso de banda ancha, proporcionando una alternativa a los sistemas cableados y para acelerar la comercialización del espectro BWA. Las aplicaciones dependen del espectro para ser usadas, siendo de mayor interés las bandas de frecuencia de 10 a 66 GHz y de 2 a 11GHz. En el presente capítulo se describen la operación y principales componentes de una red BWA, con base a lo definido en el estándar IEEE 802.16 [1].

3.2 Operación del Protocolo IEEE 802.16

3.2.1 El Control de Acceso al Medio en IEEE 802.16

Una red que utiliza un medio compartido requiere de un mecanismo que logre compartirlo eficientemente. Un buen ejemplo es una red inalámbrica punto-multipunto, donde el medio compartido es el espacio a través del cual se propagan las ondas de radio.

El downlink (enlace de bajada), de la estación base al usuario, opera de forma punto a multipunto. El enlace inalámbrico bajo el estándar IEEE 802.16 opera con una estación base central y una antena sectorizada, la cual es capaz de soportar simultáneamente múltiples frecuencias independientes. Dentro de un canal de frecuencia y un sector de antena dado, todos los usuarios reciben la misma transmisión, o parte de ella. La estación base es el único transmisor que puede operar en el enlace de bajada, así que esta transmite hacia todos los usuarios y cada usuario recibe el mensaje y únicamente lo retiene si está dirigido hacia él.

En el otro enlace, el de subida (uplink), las estaciones suscriptoras (SS) comparten el enlace hacia la BS dependiendo de la demanda. La clase de servicio utilizado o el derecho para transmitir son parámetros que usa la BS para atender la solicitud del usuario para transmitir. Los usuarios utilizan un protocolo de transmisión que controla las contenciones entre los usuarios y permite que el servicio sea adecuado para los requerimientos de delay (retardo) y ancho de banda de cada aplicación del usuario. Los mecanismos de scheduling para el uplink son implementados utilizando los procedimientos de entrega de ancho de banda sin solicitar, poleo y contención. Por ejemplo, la contención puede ser usada para evitar el poleo individual de SSS las cuales han estado inactivas por un largo periodo de tiempo.

El uso del poleo simplifica la operación de acceso y garantiza que aplicaciones reciben servicio cada cierto tiempo, si es requerido. En general, las aplicaciones de datos son tolerantes al delay, pero aplicaciones de tiempo real como la voz y video requieren servicio en una forma más uniforme.

3.2.2 Direccionamiento y tipo de conexiones

Cada SS contiene una dirección MAC de 48 bits, esta dirección es universal e identifica a la SS entre todos los posibles fabricantes y tipos de equipos. Es usada durante el proceso de registro para establecer las conexiones apropiadas de una SS. Además es usada como parte del proceso de autenticación entre la BS y la SS, cada una verifica la MAC de la otra.

Las conexiones están definidas por un CID (Connection Identifier) de 16 bits. En la inicialización de la SS se deben establecer tres conexiones de control en cada enlace, uplink y downlink, entre la BS y la SS. Estos CIDs deben asignarse en los mensajes RNG-RSP y REG-RSP, cada conexión tiene diferente tipo de QoS (Quality of Service). La conexión básica es usada por ambas MACs, la de SS y la de BS, para intercambiar pequeños mensajes de control urgentes. La conexión primaria de control es usada por las MACs para intercambiar mensajes de control más largos y más tolerantes al delay. Finalmente, la conexión secundaria de control es usada para transmitir mensajes de control basados en estándares como Dynamic Host Configuration Protocol (DHCP), Trivial File Transfer Protocol (TFTP), Simple Network Management Protocol (SNMP), etc., tolerantes al delay.

Las peticiones para transmitir están basadas en los CIDs, el ancho de banda puede variar dependiendo de la conexión que se utiliza, incluso si se trata del mismo tipo de servicio. Por ejemplo, una SS que da servicio a múltiples usuarios en una oficina puede hacer peticiones en representación de todos, aunque los límites de servicio y otros parámetros de la conexión sean diferentes entre sí.

Muchas sesiones de capas superiores pueden operar sobre el mismo CID inalámbrico. Un ejemplo de esto es si muchos usuarios que dentro de una compañía se están comunicando con TCP/IP a diferentes destinos, pero todos ellos operan bajo los mismos parámetros de servicio, todo su tráfico es agrupado para propósitos de solicitud/entrega. Dado que la LAN original y la dirección de destino son encapsuladas en una porción del payload, no hay problema en identificar las diferentes sesiones de los usuarios.

3.2.3 La Unidad de Datos del Protocolo MAC

El PDU (Protocol Data Unit) MAC es la estructura básica de datos con la cual se comunican la estación base y la estación suscriptora a nivel de capa MAC. La forma del PDU es la siguiente.



Figura 3.1 MAC PDU

Cada PDU empieza con un Encabezado MAC de tamaño fijo, este encabezado puede estar seguido por el *payload* del PDU. Si esta presente, el *payload* puede consistir de varios o de ningún subencabezado y de varios o de ningún SDU (*Service Data Unit*) y/o fragmentos de estos. La información del *payload* varía en longitud así que un PDU representa una variable del número de bytes. Esto permite que la MAC pueda transmitir diferentes tipos de tráfico de capas superiores sin importar el formato o el patrón de bits de los mensajes. El PDU puede o no contener un CRC (*Cyclic Redundancy Check*).

3.2.3.1 Formatos del Encabezado MAC

Existen dos tipos de Encabezados MAC. El primero es el Encabezado Genérico con el que empieza cada PDU, este encabezado contiene mensajes de administración o datos CS (*Convergence Sublayer*). El segundo es el Encabezado de Petición de Ancho de Banda, usado para solicitar ancho de banda adicional. El campo HT (*Header Type*) distingue identifica si el formato del encabezado corresponde al Genérico o al de Petición de Ancho de Banda. El valor del campo HT es cero para el Encabezado Genérico y es uno para el Encabezado de Petición de Ancho de Banda.

Los dos encabezados se describen con mayor detalle a continuación.

3.2.3.1.1 Encabezado Genérico

La forma de este encabezado se ilustra en la siguiente figura.

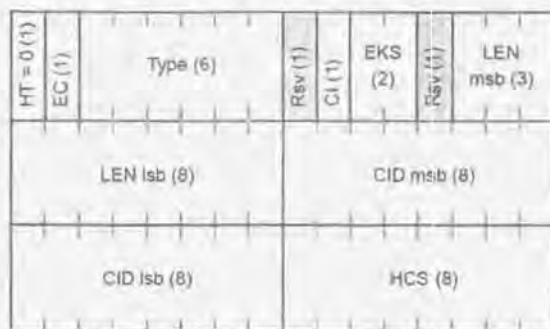


Figura 3.2 Formato del Encabezado MAC Genérico

Los campos de este encabezado con su descripción son:

- *HT (Header Type)*. Este campo tiene una longitud de un bit y es el que indica si se trata del encabezado genérico o del de petición de ancho de banda. En este caso el valor del HT debe ser cero.
- *EC (Encryption Control)*. La función de este campo es la de informar si el *payload* esta encriptado o no. La longitud de este campo también es de un bit y los valores que puede tener son: cero si el *payload* no esta encriptado y uno si lo esta.

- *Type*. Indica el tipo de payload de la capa superior, incluyendo la presencia de subencabezados. Su longitud es de seis bits.
- *CI (CRC Indicator)*. Este campo determina si se ha agregado o no el CRC al final del PDU. SU longitud es de un bit, teniendo dos posibles valores, cero cuando el PDU no incluye CRC y uno cuando si está presente.
- *EKS (Encryption Key Sequence)*. Este campo solo sirve si el campo EC vale 1. Es usado para encriptar el payload. Su longitud es de dos bits.
- *LEN (Length)*. El valor de este campo indica el tamaño en bytes del PDU, incluyendo el encabezado. Su longitud es de 11 bits.
- *CID (Connection Identifier)*. Es el identificador de la conexión y su tamaño es de 16 bits.
- *HCS (Header Check Sequence)*. Es un campo de 8 bits usado para detectar errores en el encabezado.

El valor del campo *Type* tiene diferentes significados, esto depende del enlace en el que se este utilizando ya sea en el *uplink* o en el *downlink*. Los valores permitidos para el campo *Type*, en el *downlink*, son los siguientes:

Valor	Significado
0x00	No hay subencabezados presentes
0x01	Reservado
0x02	El subencabezado de Empaquetamiento esta presente
0x03	Reservado
0x04	El subencabezado de Fragmentación esta presente
0x05 – 0x3F	Reservado

Tabla 3.1 Valores de *Type* para el *downlink*

Para el *uplink* los valores son:

Valor	Significado
0x00	No hay subencabezados presentes
0x01	El subencabezado de Administración de grant esta presente
0x02	El subencabezado de Empaquetamiento esta presente
0x03	Subencabezado de Empaquetamiento y de Administración de grant presentes
0x04	El subencabezado de Fragmentación esta presente
0x05	Subencabezado de Fragmentación y de Administración de grant presentes
0x06 – 0x3F	Reservado

Tabla 3.2 Valores de *Type* para el *uplink*

Únicamente existen tres tipos de subencabezados, el de empaquetamiento, el de fragmentación y el de administración de *grant (Grant Management)*, los cuales en caso de presentarse deben estar inmediatamente después del encabezado genérico.

El subencabezado de fragmentación indica si el *payload* esta o no fragmentado, si esta fragmentado indica si el fragmento es el primero, el ultimo o uno intermedio.

También sirve para enumerar los fragmentos permitiendo que el ensamblado del paquete sea más fácil.

El subencabezado de empaquetamiento es usado cuando la MAC puede agrupar varios SDUs en un solo PDU. Este encabezado cumple con las mismas funciones que el subencabezado de fragmentación además de que contiene un campo adicional el cual indica la longitud en bytes del SDU o del fragmento SDU, incluyendo los dos bytes del subencabezado.

El subencabezado de administración de *grant* es usado por la SS para enviar la petición de ancho de banda a la BS. Este subencabezado tiene dos formatos diferentes, uno para el servicio de tipo UGS en el cual se podría solicitar una petición por poleo o bien solicitar ancho de banda adicional en caso de que la cola de servicio se llene. Para cualquier otro tipo de servicio el subencabezado solo consta del campo PBR (*PiggyBack Request*) el cual indica el número de bytes solicitados por la SS para transmitir en el *uplink*.

3.2.3.1.2 Encabezado de Petición de Ancho de Banda

El PDU de petición de ancho de banda consiste únicamente del Encabezado de Petición de Ancho de Banda, por lo que no contiene *payload*. Este encabezado tiene la siguiente forma.

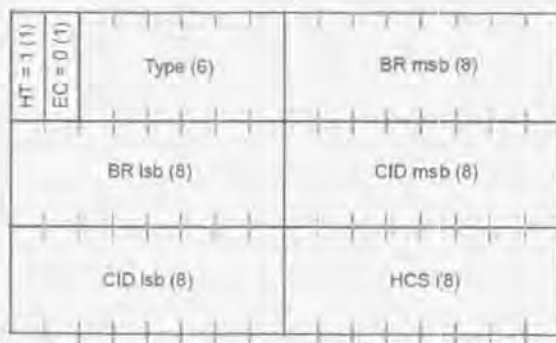


Figura 3.3 Formato del Encabezado de Petición de Ancho de Banda

Una petición de ancho de banda debe tener ciertas características. La longitud del encabezado siempre debe ser de 6 bytes, el campo EC de este encabezado debe tener un valor de cero, es decir, que no debe ser encriptado. El CID indicara el tipo de servicio para el cual se esta solicitando el ancho de banda. El campo BR (*Bandwidth Request*) contendrá el número de bytes solicitados. Finalmente, los tipos de petición pueden ser "000000" para incrementar el ancho de banda solicitado o "000001" para reemplazar el ancho de banda solicitado anteriormente.

Los campos para este encabezado son los siguientes:

- *HT (Header Type)*. Es el mismo que para el encabezado genérico, la única diferencia es que en este caso el valor del HT debe ser uno.
- *EC (Encryption Control)*. El valor de este campo siempre es cero.
- *Type*. Indica el tipo de petición de ancho de banda.
- *BR (Bandwidth Request)*. Es el número de bytes solicitados para que la SS pueda transmitir en el uplink. La petición no debe incluir los encabezados de la capa PHY.
- *CID (Connection Identifier)*. Es el identificador de la conexión.
- *HCS (Header Check Sequence)*. Es un campo de 8 bits usado para detectar errores en el encabezado.

3.2.3.2 Concatenación, Fragmentación y Empaquetamiento

Concatenación

Múltiples PDUs pueden ser agrupados y transmitidos en una sola oportunidad de transmisión, ya sea en el *uplink* o en el *downlink*. Esto es posible dado que cada PDU está identificado por un único CID. Los PDUs de mensajes de control, de datos de usuario y de petición de ancho de banda pueden ser concatenados en la misma transmisión.

Fragmentación

Es el proceso en el cual un SDU es dividido en uno o más PDUs. Este proceso se realiza para aumentar la eficiencia del ancho de banda disponible para los requerimientos de QoS. Los procesos de fragmentación y de reensamblado tienen prioridad.

Empaquetamiento

Cuando existen varios SDUs pequeños existe la posibilidad de transmitirlos dentro de un solo PDU. El empaquetamiento hace uso del atributo de conexión indicando si la conexión transporta paquetes de longitud fija o variable. Existe la posibilidad de que en algunos casos los SDUs no sean empaquetados, pero esto solo es decisión del transmisor. El proceso de no empaquetar tiene prioridad.

3.2.4 Mensajes de Administración MAC

Durante el proceso de inicialización y de entrada a la red de la SS se intercambian ciertos mensajes con la BS para fijar ciertos parámetros de la conexión. Estos mensajes son transportados en el *payload* del PDU y siempre empiezan con el campo *Management Message Type*. El formato de estos mensajes es el que se muestra a continuación.



Figura 3.4 Formato del Mensaje de Administración

Los mensajes de administración son los siguientes.

Type	Mensaje	Descripción
0	UCD	Descriptor del Canal Ascendente (Uplink Channel Descriptor)
1	DCD	Descriptor del Canal Descendente (Downlink Channel Descriptor)
2	DL-MAP	Definición del Acceso Descendente (Downlink Access Definition)
3	UL-MAP	Definición del Acceso Ascendente (Uplink Access Definition)
4	RNG-REQ	Solicitud de Ranging (Ranging Request)
5	RNG-RSP	Respuesta de Ranging (Ranging Response)
6	REG-REQ	Solicitud de Registro (Registration Request)
7	REG-RSP	Respuesta de Registro (Registration Response)
8	Reservado	-
9	PKM-REQ	Solicitud de llave de control de confidencialidad (Privacy Key Management Request)
10	PKM-RSP	Respuesta de llave de control de confidencialidad (Privacy Key Management Response)
11	DSA-REQ	Solicitud de Adición de Servicio Dinámico (Dynamic Service Addition Request)
12	DSA-RSP	Respuesta de Adición de Servicio Dinámico (Dynamic Service Addition Response)
13	DSA-ACK	Confirmación de Adición de Servicio Dinámico (Dynamic Service Addition Acknowledge)
14	DSC-REQ	Solicitud de Cambio de Servicio Dinámico (Dynamic Service Change Request)
15	DSC-RSP	Respuesta de Cambio de Servicio Dinámico (Dynamic Service Change Response)
16	DSC-ACK	Confirmación de Cambio de Servicio Dinámico (Dynamic Service Change Acknowledge)
17	DSD-REQ	Solicitud de Eliminación de Servicio Dinámico (Dynamic Service Deletion Request)
18	DSD-RSP	Respuesta de Eliminación de Servicio Dinámico (Dynamic Service Deletion Response)
19	-	Reservado para uso futuro
20	-	Reservado para uso futuro
21	MCA-REQ	Solicitud de Asignación Multicast (Multicast Assignment Request)
22	MCA-RSP	Respuesta de Asignación Multicast (Multicast Assignment Response)
23	DBPC-REQ	Solicitud de Cambio de Transmisión Descendente (Downlink Burst Profile Change Request)
24	DBPC-RSP	Respuesta de Cambio de Transmisión Descendente (Downlink Burst Profile Change Response)
25	RES-CMD	Comando de Reset (Reset Command)
26	SBC-REQ	Solicitud de Capacidades Básica de la SS (SS Basic Capability Request)
27	SBC-RSP	Respuesta de Capacidades Básica de la SS (SS Basic Capability Response)
28	CLK-CMP	Comparación del Reloj de la Red de la SS (SS network clock comparison)
29	DREG-CMD	Comando de Terminación o Renovación de Registro (De/Re-register Command)
30	DSX-RVD	Mensaje DSx Recibido
31	TFTP-CPLT	Mensaje de configuración completa de archivo TFTP (Config File TFTP Complete Message)
32	TFTP-RSP	Respuesta de configuración de archivo TFTP (Config File TFTP Complete Response)
33-255	-	Reservado para uso futuro

Tabla 3.3 Formato del Mensaje de Administración

Los mensajes que se verán a continuación no se fragmentan ni se empaquetan.

3.2.4.1 Mensaje Descriptor del Canal Descendente (DCD)

El mensaje DCD es transmitido, por la BS, periódicamente para definir las características del canal físico. La información que contiene este mensaje es la siguiente:

- *Downlink Channel ID*. Es el identificador del canal descendente al cual hace referencia este mensaje. El identificador es elegido arbitrariamente por la BS y es único al nivel de la capa MAC. Actúa como identificador local para transacciones tales como el ranging.
- *Configuration Change Count*. La BS incrementa este contador en uno, siempre y cuando exista algún cambio en los valores de este descriptor de canal. Si el valor de este contador permanece igual para un DCD subsiguiente, la SS puede descartar el mensaje dado que ningún parámetro ha cambiado.
- *Información Codificada TLV (Type-Length-Value)*. La información codificada es la potencia promedio de transmisión de la BS, la duración del frame FDD/TDD, el tipo de capa PHY utilizada y la regla de ajuste de potencia cuando se cambia de perfil de transmisión.
- *Downlink_Burst_Profile*. Es un conjunto de variables TLV que definen las características de la capa PHY que deben ser usadas con un Código de Uso de Intervalo Descendente (*Downlink Interval Usage Code, DIUC*). Algunas variables TLV son el tipo de modulación, la presencia de preámbulo y códigos de encriptación. En cada intervalo se asigna un DIUC por el mensaje DL-MAP.

3.2.4.2 Mensaje de Acceso al Canal Descendente (DL-MAP)

Define el acceso a la información del *downlink*. Si el tamaño del mensaje no es un entero en bytes, se agrega un relleno y se redondea hacia arriba.

La información de este mensaje es:

- *PHY Synchronization*. La sincronización con la capa PHY depende de las especificaciones de la PHY usada.
- *DCD Count*. Es un contador que coincide con el contador del mensaje DCD, el cual describe el perfil de transmisión descendente.
- *Base Station ID*. Contiene un identificador, de 48 bits, de la BS. Los 24 bits más significativos son usados como el identificador del operador. Suele combinarse con el identificador de canal descendente, del mensaje DCD, en situaciones de límite de sector y límite de celda.
- *Number of Elements*. Indica el número de elementos de información (*Information Element, IE*) que se incluyen en el mensaje.

3.2.4.3 Mensaje Descriptor del Canal Ascendente (UCD)

Este mensaje es transmitido por la BS en un intervalo periódico de tiempo para definir las características físicas de un canal ascendente. Se debe enviar un mensaje UCD

por cada canal ascendente activo y asociado con el canal descendente. El contenido de este mensaje es el siguiente.

- *Configuration Change Count*. Este contador funciona de manera similar al contador del mensaje DCD. Cuenta los cambios en el canal ascendente.
- *Mini-slot Size*. Es el tamaño del minislots, para este canal ascendente, en unidades de slots físicos. El tamaño permitido va de cero a 2^7 .
- *Uplink Channel ID*. Es el identificador del canal ascendente al cual hace referencia este mensaje.
- *Ranging Backoff Start & Ranging Backoff End*. Indica el tamaño de la ventana inicial y final de backoff para la contención inicial de ranging. Expresada en potencias de 2.
- *Request Backoff Start & Request Backoff End*. Indica el tamaño de la ventana inicial y final de backoff para la contención de datos y peticiones. Expresada en potencias de 2.
- *Información Codificada TLV*. Indica la tasa de símbolo, la frecuencia central del canal ascendente, el tiempo de transición de la SS, el factor Roll-off, la regla de ajuste de potencia y el tiempo de espera máximo para reservaciones en contención.
- *Uplink_Burst_Profile*. Conjunto de variables TLV que definen las características de la capa PHY que deben ser usadas con un Código de Uso de Intervalo Ascendente (*Uplink Interval Usage Code, UIUC*). Algunas variables TLV son el tipo de modulación, la presencia de preámbulo y códigos de encriptación. En cada intervalo se asigna un UIUC por el mensaje UL-MAP.

3.2.4.4 Mensaje de Acceso al Canal Ascendente (UL-MAP)

Este mensaje distribuye el acceso al canal ascendente. Contiene los siguientes parámetros.

- *Uplink Channel ID*. Es el identificador del canal ascendente al cual se refiere este mensaje.
- *UCD Count*. Es un contador que hace referencia al contador del mensaje UCD, el cual describe el perfil de transmisión ascendente.
- *Number of Elements*. Número de elementos de información en el mapa.
- *Alloc Start Time*. Tiempo efectivo del comienzo de la distribución del canal ascendente definido en minislots.
- *Map Information Elements*. Consisten de al menos tres campos, el CID, el UIUC y un Offset.

Los IEs definen la distribución del ancho de banda del canal ascendente. Cada mensaje UL-MAP debe contener al menos un IE que indique el final de la última transmisión. Los IEs deben estar en estricto orden cronológico dentro del UL-MAP.

El CID informa que la asignación del IE es a un direccionamiento unicast, multicast o broadcast. El UIUC es usado para definir el tipo de acceso ascendente y perfil de transmisión ascendente asociado con tal acceso.

3.2.4.5 Mensaje de Solicitud de Ranging (RNG-REQ)

Este mensaje es enviado por la SS cuando se inicializa y después periódicamente durante intervalos de mantenimiento inicial y de estación. Es enviado por la petición de la BS para determinar el retardo de la red y para solicitar potencia y/o cambio del perfil de transmisión descendente. La información que contiene este mensaje es:

- *Downlink Channel ID*. Identificador del canal descendente en el cual la SS recibe el mensaje UCD, que describe el canal ascendente por el cual se debe transmitir el mensaje RNG-REQ.
- *Pending Until Complete*. Tiempo estimado para asimilar los parámetros de ranging.
- *Información Codificada TLV*. Se incluye la dirección MAC de la SS, anomalías en el Ranging y el perfil de transmisión descendente solicitado.

3.2.4.6 Mensaje de Respuesta de Ranging (RNG-RSP)

Este mensaje es transmitido por la BS en respuesta de un mensaje RNG-REQ o para enviar correcciones basadas en mediciones que se han hecho con otra información ya recibida.

La SS debe estar preparada para recibir este mensaje en cualquier instante, o solo después de enviar un mensaje RNG-REQ. La información contenida en este mensaje es la siguiente.

- *Uplink Channel ID*. Es el identificador del canal ascendente en el cual la BS recibió el mensaje RNG-REQ al cual hace referencia esta respuesta.
- *Información Codificada TLV*. Se incluye información para el ajuste del tiempo, ajuste de potencia, ajuste de frecuencia, el status del ranging, entre otros.

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

Al inicializarse la SS, después de mandar el mensaje RNG-REQ y recibir la respuesta, se debe enviar el mensaje REG-REQ, de solicitud de registro a la red. Este mensaje contiene información importante como la Secuencia Numérica de la Llave HMAC (*Hashed Message Authentication Code*) y el número de CIDs ascendentes que la SS puede soportar, el valor mínimo es 3. La SS puede soportar un CID básico, un CID de control primario, un CID de control secundario y cero o más CIDs de transporte. Puede incluir información como el ID del fabricante y las capacidades de codificación de la SS.

El mensaje REG-RSP solamente es transmitido por la BS en respuesta de un REG-REQ e indica si la autenticación del mensaje tuvo éxito o no, también incluye la versión de la MAC, el CID secundario de control y la HMAC.

3.2.5 Mecanismos de solicitud y asignación de ancho de banda

3.2.5.1 Solicitudes

Las *solicitudes (requests)* se refieren a un mecanismo usado por la SS, para indicarle a la BS su necesidad de asignación de ancho de banda y pueden ser enviadas individualmente en forma de encabezado, o bien en forma de *solicitud PiggyBack*, cuya utilización es opcional.

Debido a que el *burst profile* de subida cambia dinámicamente con base a ajustes realizados en la capa física, todas las *solicitudes* deben considerar únicamente el encabezado y el payload a nivel de capa MAC, sin considerar encabezado PHY. Los mensajes de solicitud de ancho de banda pueden ser transmitidos durante cualquier asignación para el canal de subida, exceptuando el intervalo de ranging inicial.

Las *solicitudes* pueden ser de tipo incremental o agregado. En una *solicitud incremental*, la BS debe agregar el ancho de banda requerido a su percepción inicial de las necesidades de la conexión, a fin de que la SS pueda completar el envío de su información. En una *solicitud agregada*, la BS debe reemplazar su percepción inicial acerca de las necesidades de la conexión, con el valor de ancho de banda correspondiente a la nueva petición. El tipo de solicitud es indicado en el campo *Tipo (Type)* del encabezado de solicitud de ancho de banda. Dado que las *solicitudes piggyback* no cuentan con el campo *Tipo*, éstas serán siempre de tipo incremental.

Las *Solicitudes PiggyBack (PiggyBack Requests)* son solicitudes de asignación de ancho de banda, incluidas en los encabezados de los paquetes enviados por la SS durante una transmisión. En otras palabras, cuando SS se encuentra realizando una transmisión, durante la cual genera tráfico adicional, puede incluir en los encabezados de los paquetes una nueva solicitud de ancho de banda, a fin de poder enviar los nuevos paquetes que no fueron contemplados en la asignación inicial, sin tener que realizar una solicitud por contención. La solicitud piggyback tiene carácter preferencial, ya que su recepción en la BS está garantizada, aunque es posible que no se realice la asignación en su totalidad.

Otra forma de realizar solicitudes consiste en el procedimiento llamado *Robo de Ancho de Banda (bandwidth stealing)*, el cual consiste en el uso, por parte de una SS, de una porción del ancho de banda asignado como respuesta a una petición, con la particularidad de que en vez de usarse para el envío de datos, se utiliza para el envío de otra solicitud de ancho de banda. Cuando una SS se encuentra operando bajo un esquema de Asignación garantizada, es decir, que cuenta con oportunidades garantizadas para la transmisión de paquetes, es posible que parte de estas oportunidades, destinadas para el envío de datos, se usen para realizar solicitudes adicionales de ancho de banda.

En lo concerniente a la asignación de ancho de banda, existen dos modos de operación para una SS: el modo de asignación por conexión (GPC) y el modo de asignación por estación subscriptora (GPSS), que se mencionarán a continuación.

3.2.5.2 Modo de asignación por conexión (GPC)

En el modo de asignación por conexión (Grant Per Connection), las oportunidades de transmisión (*grants*) son dirigidas explícitamente a las CIDs individuales de una SS, propiciando que dicha SS utilice todo el ancho de banda exclusivamente para la conexión que recibió el *grant* (identificada por un CID).

Un *Grant* es una *oportunidad de transmisión* en donde la BS le asigna una porción de ancho de banda a una SS, con la finalidad de que ésta pueda transmitir información.

3.2.5.3 Modo de asignación por estación subscriptora (GPSS)

En el modo de asignación por estación subscriptora (Grants per subscriber station), la asignación de ancho de banda está dirigida al CID básico de las SSs, y no a los CIDs individuales. Esto provoca que no sea posible determinar qué petición fue atendida, y en caso de que una SS reciba un *grant* menor al esperado, ninguna razón explícita es proporcionada. Para ello la SS se basa en la última información recibida de la BS y en el status de la petición, para poder decidir si realizar un backoff y solicitar de nuevo, o bien descartar la SDU.

Este esquema es utilizado en los sistemas de 10-66 GHz y permite a la SS realizar decisiones de último minuto, utilizando el ancho de banda en forma diferente a como la BS había previsto. Esto propicia una posible optimización de ancho de banda, debido a que es más eficiente que la SS realice una *solicitud* para todas sus conexiones usando su CID básico, a repetir este proceso para cada CID individual.

3.2.5.4 Consultas

La *consulta o poleo (polling)* es un proceso en el que la BS asigna ancho de banda a una SS, con el propósito específico de que se utilice este espacio para realizar una solicitud de ancho de banda. Ningún mensaje es transmitido en el poleo, simplemente se le asigna a la SS el espacio suficiente para enviar su petición. El poleo es un proceso basado en el CID de la SS, y el estándar define los siguientes tipos:

- *Poleo de tipo Unicast (Unicast polling)*. Es el caso en donde la SS es poleada de manera individual.
- *Poleo de tipo Multicast y broadcast*. En caso de que el ancho de banda disponible sea insuficiente como para polear individualmente a las SSs, algunas de ellas podrán ser poleadas en modo multicast (hacia un grupo selecto de SSs), o bien, podrá realizarse un poleo de tipo broadcast (hacia todas las SSs).

3.2.6 Servicio de Calidad en la transmisión ascendente

Los servicios de programación (Scheduling Services) representan los mecanismos soportados por el programador de tráfico de la capa MAC (MAC Scheduler) para el manejo de datos durante una conexión. Cada conexión, relaciona una pareja BS-SS y se encuentra asociada a un tipo específico de servicio. El tipo de servicio a su vez

contiene un conjunto de características de Calidad de Servicio (QoS) que permiten evaluar su comportamiento de forma cuantitativa.

La programación de *grants* o peticiones en el canal ascendente es realizada por la BS, con la intención de proveer a cada SS el ancho de banda necesario para sus transmisiones, o bien la oportunidad de realizar peticiones de ancho de banda respectivamente. Una vez especificando el tipo de servicio y sus parámetros asociados de QoS, la BS puede anticipar sus necesidades de latencia y throughput en el canal de subida, y proveer *poleos* y/o *grants* en los tiempos adecuados.

En la siguiente tabla se resumen los cuatro servicios de programación, y se presentan las opciones de *solicitud* disponibles para cada uno de ellos:

Servicio de Programación	Solicitud PiggyBack	Robo de Ancho de Banda	Poleo
UGS	No permitida	No permitida	El bit de poleo (PM) es usado para solicitar un poleo de tipo unicast, en una conexión no UGS.
rtPS	Permitida	Permitida	Solo es permitido el poleo de tipo unicast
nrtPS	Permitida	Permitida	Puede ser restringido a poleo unicast dependiendo del parámetro <i>transmission/request policy</i> ; de lo contrario todas las formas de poleo están permitidas
BE	Permitida	Permitida	Todas las formas de poleo están permitidas

Tabla 3.4 Servicios de programación y sus reglas de uso.

3.2.6.1 Servicio Garantizado sin Solicitud (UGS)

El servicio UGS está diseñado para soportar aplicaciones en tiempo real, que manejen paquetes de tamaño fijo generados periódicamente, como es el caso de T1/E1 y Voz sobre IP (sin supresión de silencios). En este servicio, la BS ofrece oportunidades de transmisión (*grants*) en forma periódica, cuyo tamaño también es fijo y lo suficientemente grande, como para soportar las tasas de transferencia que generan las aplicaciones de tiempo real, eliminando el uso de encabezados y la latencia de las peticiones.

Los parámetros clave para este servicio son *Maximum Sustained Traffic Rate*, *Maximum Latency*, *Tolerated Jitter* y *Request/Transmisión Policy*, cuya explicación se podrá encontrar en el Apéndice A. Para un correcto funcionamiento, el parámetro *Request/Transmisión Policy* debe estar configurado a manera de no permitir a la SS realizar solicitudes de ancho de banda en el área de contención, ya que ésta se encuentra constantemente recibiendo *grants* para el envío de su información. Los intervalos en los que la SS conceda los *grants* a la SS están limitados por el valor del parámetro *Maximum Sustained Traffic Rate*.

Recordando el subencabezado de administración de grant (*Grant Management subheader*), cabe mencionar el uso del bit SI (*Slip Indicator*), el cual es una bandera que se activa cuando se detecta que la cola del servicio ha sobrepasado las dimensiones permitidas. Esta bandera le permite a la BS compensar el desajuste producido, adicionando hasta 1% de ancho de banda adicional al que establece el parámetro *Maximum Sustained Traffic Rate*. El bit de poleo (*poll-me-bit* ó *PM*) puede ser activado en caso de que sea necesario realizar solicitudes en conexiones de tipo no-UGS.

3.2.6.2 Servicio de Propuesta en tiempo real (rtPS)

rtPS está diseñado para soportar aplicaciones en tiempo real que generen paquetes de tamaño variable y en forma periódica, tales como el video en formato MPEG (Moving Pictures Experts Group). En este servicio, la BS ofrece periódicamente oportunidades de solicitud de ancho de banda para cada SS, a fin de poder cumplir con los requerimientos de tiempo real y a la vez permitiendo a la SS especificar el tamaño del *grant* deseado, optimizando la eficiencia del transporte de información.

Los parámetros clave para este servicio son: *Maximum Sustained Traffic Rate*, *Minimum Reserved Traffic Rate*, *Maximum Latency* y *Request/Transmission Policy*. Para que el servicio funcione correctamente, el parámetro *Request/Transmission Policy* debe estar configurado a manera de no permitir a la SS el uso de solicitudes en el área de contención (primeros 7 mini-slots del mapa). De esta forma, la SS solo hará peticiones de ancho de banda cuando la BS le asigne un espacio en el área de reservación. Por su parte, la BS podrá enviar oportunidades de solicitud de ancho de banda a la SS, incluso cuando haya peticiones anteriores que se encuentren aún pendientes.

3.2.6.3 Servicio de Propuesta no en tiempo real (nrtPS)

El servicio nrtPS está diseñado para soportar aplicaciones tolerantes al retraso (*delay*) que produzcan paquetes de tamaño variable y con requerimientos mínimos de tasa de transmisión, tales como FTP (File Transfer Protocol). Para ello la BS ofrece oportunidades de petición de ancho de banda a la SS en forma regular, lo que asegura que dichas peticiones tengan lugar incluso en periodos de congestión de la red. Estos intervalos de poleo pueden ser del orden de un segundo, o inferiores.

Los parámetros clave para este servicio son *Minimum Reserved Traffic Rate*, *Maximum Sustained Traffic Rate*, *Traffic Priority* y *Request/Transmission Policy*. Para un correcto funcionamiento, el parámetro *Request/Transmission Policy* debe estar configurado a manera de permitir el uso de solicitudes en el área de contención. De esta forma, la SS podrá realizar peticiones de ancho de banda tanto en el área de contención como en las oportunidades que le envíe la BS en el área de reservación.

3.2.6.4 Servicio de mejor esfuerzo (BE)

Este servicio está diseñado para soportar tráfico que no presente los requerimientos mínimos asociados a algún nivel de servicio, y por consiguiente pueda ser manejado en base al espacio disponible en el canal de comunicación. Los parámetros clave para este servicio son *Maximum Sustained Traffic Rate*, *Traffic Priority* y *Request/Transmission Policy*.

Para un correcto funcionamiento, el parámetro *Request/Transmission Policy* debe estar configurado a modo de permitir a la SS realizar peticiones de ancho de banda en el área de contención. Esto permitirá a la SS realizar dichas peticiones tanto en el área de contención como en las oportunidades que le envíe la BS en la zona de reservación.

3.2.7 Características de la capa física

3.2.7.1 FDD (Frequency Division Duplexing)

Es un esquema de duplexión en donde los canales de subida y bajada se encuentran ubicados en distintas bandas de frecuencia. Ambos canales utilizan *frames* de duración fija, lo cual simplifica los algoritmos de asignación de ancho de banda y permite que la transmisión se realice tanto en modo full-duplex como en half duplex. En el modo full-duplex, la SS puede transmitir y recibir información de manera simultánea, mientras que en el modo half-duplex, solo es posible realizar uno de estos procesos a la vez. En caso de usar el modo half-duplex, el controlador de ancho de banda no deberá asignar espacio en el canal de subida mientras se esté recibiendo información por el canal de bajada.

La siguiente figura describe el modo de operación FDD:

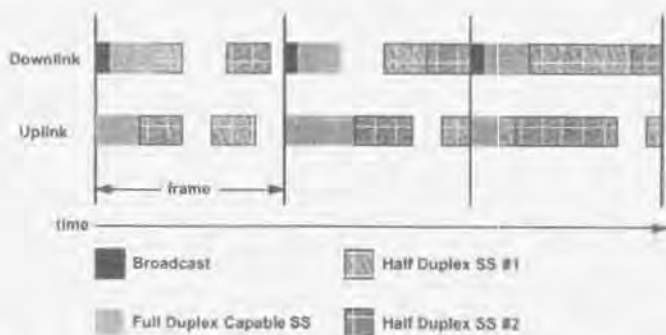


Figura 3.5 Ejemplo de la asignación de ancho de banda en una ráfaga FDD

3.2.7.2 TDD (Time Division Duplexing)

En este tipo de duplexión, las transmisiones de subida y bajada ocurren en instantes de tiempo distintos, compartiendo regularmente la misma banda de frecuencia. Un *frame* de tipo TDD es de duración fija y contiene dos *subframes*, destinados a los enlaces de subida y bajada, como se aprecia en la figura:

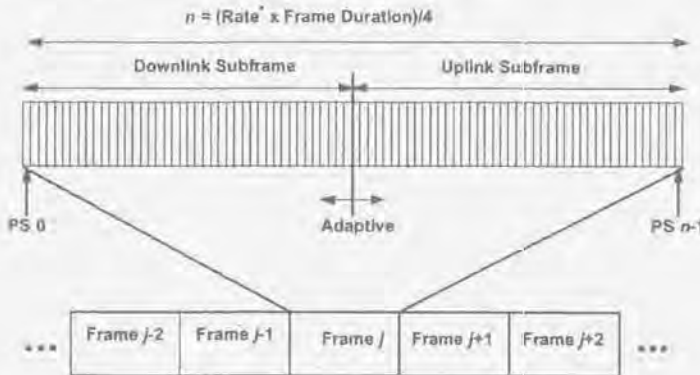


Figura 3.6 Ejemplo de la asignación de ancho de banda en una ráfaga TDD

Cada *frame* se encuentra dividido en un número entero de PSs (physical slots), cuya función es la de facilitar la partición del ancho de banda. La duración de los *subframes* puede adaptarse a los requerimientos de aplicaciones en las capas superiores del sistema, haciendo que el ancho de banda asignado tanto al canal de subida como al de bajada sea variable.

3.2.7.3 UL sub-frame

Existen tres clases de ráfagas que pueden ser transmitidas por la SS durante el *subframe de subida*:

- Aquellas que sean transmitidas en oportunidades de contención reservadas para el proceso de ranging inicial
- Aquellas que sean transmitidas en oportunidades de contención definidas en intervalos de petición reservados para responder a poleos de tipo broadcast o multicast.
- Aquellas que sean transmitidas en intervalos definidos por *Data Grant IEs*, específicamente asignados para SSs individuales.

Cualquiera de estas clases de ráfagas puede estar presente en cualquier instante de tiempo, ocurriendo en cualquier orden y cantidad dentro del *frame*, con la limitante del número de PSs disponibles.

En el *subframe de subida*, las SSs transmiten la ubicación de ancho de banda que les fue asignado, por medio del *perfil de ráfaga* (*Burst profile*) especificado en el campo UIUC (Uplink Interval Usage Code). El ancho de banda asignado para el ranging inicial y para oportunidades de petición de ancho de banda en contención puede ser agrupado de forma contigua, utilizando el *perfil de ráfaga* UIUC = 2 para los intervalos de ranging inicial, y el *perfil de ráfaga* UIUC = 1 para los intervalos de petición de ancho de banda. Durante el tiempo restante de transmisión, la SS determinará la agrupación de los slots, y transmitirá con el *perfil de ráfaga* que le sea asignado por la BS.

Los SSTGs sirven para separar las transmisiones de distintas SSs durante el *subframe de subida*. Este espacio permite a la BS tener tiempo para sincronizarse con la nueva SS, al desacoplarse de la ráfaga anterior y adecuarse al preámbulo de la siguiente SS.

Las anteriores características son representadas en la siguiente figura:

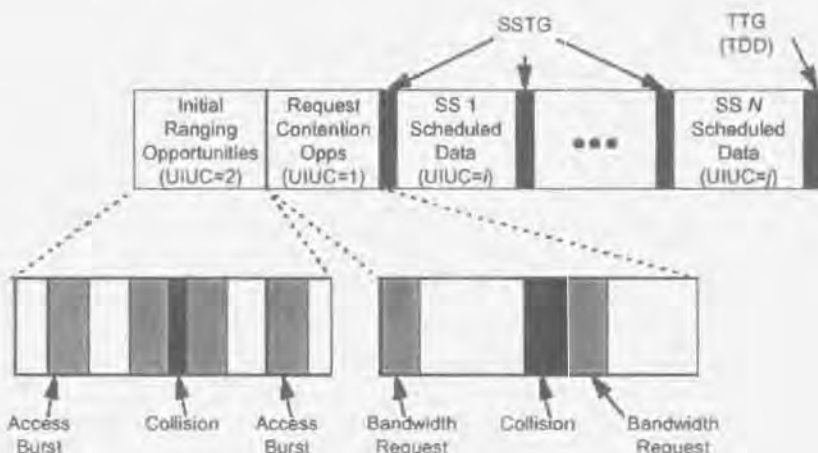


Figura 3.7 Estructura del *subframe de subida*

En la duplexión TDD, el *subframe de subida* es seguido en el tiempo por el *subframe de bajada*, utilizando la misma portadora de frecuencia, mientras que en la duplexión FDD, los *subframes de subida y bajada* son coincidentes en el tiempo, pero transportados en frecuencias distintas.

3.2.7.4 DL sub-frame

En la duplexión TDD, el *subframe de bajada* contiene un preámbulo inicial, usado para la sincronización y ecualización en capa física (PHY). Posteriormente se encuentra una sección de control que contiene al DL-MAP y al UL-MAP, en los cuales se

declaran los PSs en donde comienzan las ráfagas. A continuación se incluye una porción TDM en donde se transporta la información, organizada en ráfagas con diferentes *perfiles de ráfaga*, que son identificados por un DIUC (Downlink Interval Usage Code), y por lo tanto tienen diferentes niveles de robustez de transmisión. Las ráfagas son transmitidas en orden creciente de robustez, es decir, se comienza por las modulaciones de menor orden hasta llegar a las de mayor orden. En el caso de usar TDD, la zona TTG se usa para separar al *subframe de bajada* del *subframe de subida*.

Cada SS recibe y decodifica la información de control del *subframe de bajada*, buscando en los encabezados MAC alguna indicación de que hay información destinada a ella, en el resto del *subframe de bajada*.

La estructura del *subframe de bajada* para la duplexión TDD se muestra en la siguiente figura:

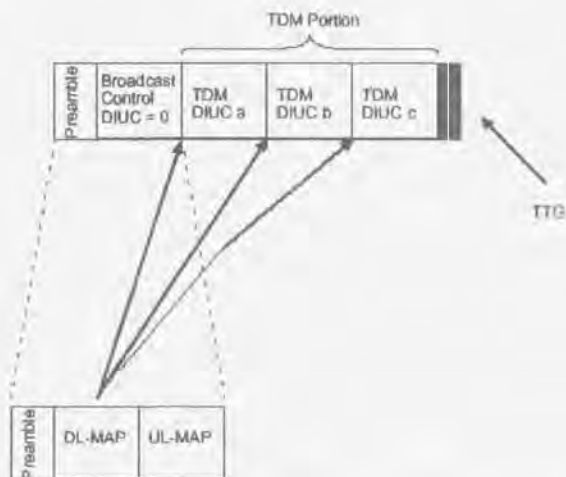


Figura 3.8 Estructura del *subframe de bajada* en un sistema TDD

En el caso de la duplexión FDD, la estructura del *subframe de bajada* es como se ilustra en la figura 3.9 y se explica a continuación. De manera similar al caso TDD, el *subframe de bajada* contiene un preámbulo inicial seguido de una sección de control. Posteriormente se encuentra una porción TDM organizada en ráfagas, que transmiten la información en orden de robustez creciente dependiendo de su *perfil de ráfaga*, identificado por un DIUC. La información en esta porción puede ser transmitida a uno o más de los siguientes casos:

- SSs operando en modo full-duplex.
- SSs operando en modo half-duplex que necesiten transmitir posteriormente en el *frame* que reciban.
- SSs operando en modo half-duplex no programadas para transmitir en este *frame*.

En seguida se encuentra una porción TDMA, usada para transmitir datos hacia cualquier SS que opere en modo half-duplex y necesite transmitir anticipadamente en el *frame* que reciba. Esto permite a una SS individual decodificar una porción específica del *subframe de bajada*, sin tener que decodificarlo de forma completa. En estos casos puede producirse una pérdida de sincronización con el canal de bajada, por lo que cada porción TDMA contiene un preámbulo que es útil para recuperar la sincronización.

Las ráfagas en la porción TDMA no necesitan ser ordenadas por la robustez de su perfil. La sección de control contiene un mapa de las ráfagas tanto de la porción TDM como de la porción TDMA.

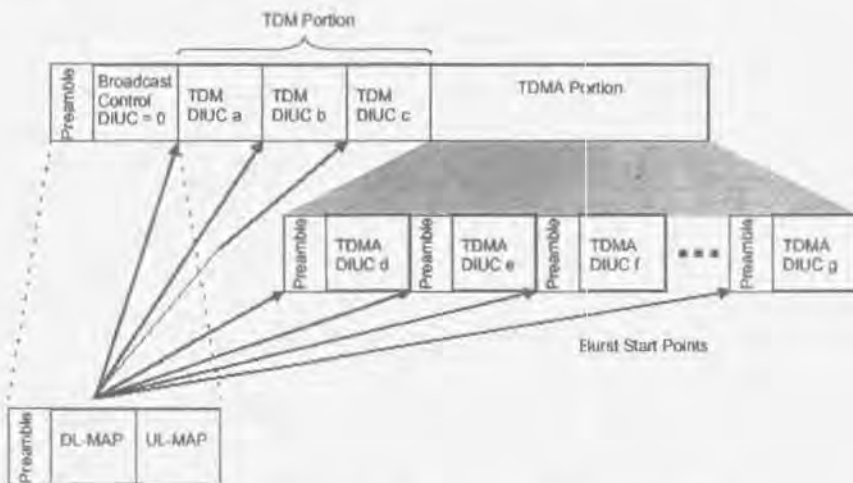


Figura 3.9 Estructura del *subframe de bajada* en un sistema FDD

Antes de que cualquier SS pueda enviar información a través de la red tiene que seguir un proceso de inicialización e ingreso, dicho proceso se describe en el Apéndice D.

3.2.8 Resolución de colisiones

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

La Estación Base especifica a través de los Mapas Descriptores del Canal Ascendente las regiones que están sujetas a la ocurrencia de colisiones. Se trata de los intervalos de Mantenimiento Inicial y de Solicitud, cada uno establecido mediante

los Elementos de Información correspondientes. Cuando ocurre una colisión en cualquiera de estos dos periodos, las Estaciones Suscriptoras involucradas son las responsables de aplicar los métodos de resolución. Para tal efecto, se emplea el *Algoritmo Exponencial Backoff Binario Truncado* cuya operación se basa en los parámetros de Ventana de Backoff Inicial y Ventana de Backoff Final, ambos definidos por la BS en los mensajes Descriptores del Canal Ascendente (UCD) mediante potencias binarias.

El mecanismo de resolución de Colisiones mediante el Algoritmo Exponencial Backoff Binario Truncado es el siguiente:

1. Al ocurrir una Colisión, la Estación Suscriptora involucrada genera un número aleatorio entre cero y el exponente binario indicado por la Ventana de Backoff inicial. Es decir, si dicho parámetro tiene un valor de 3, la Estación Suscriptora obtendrá un valor aleatorio entre 0 y 8.
2. La SS esperará la cantidad de *minislots* indicados por el número generado anteriormente. Es posible que la SS espere durante varios periodos incluidos en distintos Mapas. Por ejemplo, si una SS tiene que esperar un total de 9 *minislots* y el Mapa actual cuenta con 5, para el periodo descrito por el Mapa siguiente esperará sólo 4. En caso de que este otro no cuente con la cantidad suficiente de *minislots*, la SS esperará hasta el siguiente periodo, y así sucesivamente hasta agotar toda la cantidad de *minislots* de espera que ha determinado.
3. Cuando han transcurrido todos los *minislots* de espera, cuya cantidad fue generada por la SS, se intentará hacer una nueva transmisión, también sujeta a la ocurrencia de Colisiones.
4. La SS determinará que la transmisión fue exitosa cuando:
 - En el caso de las contenciones para la solicitud de asignación de ancho de banda, reciba un Mapa que incluya la Reservación correspondiente al CID para el cual se hizo la solicitud, dentro de un periodo máximo definido mediante el mensaje UCD.
 - Reciba el mensaje RNG-RSP que corresponde a la respuesta de la BS cuando la SS ha enviado un mensaje RNG-REQ durante el periodo de Mantenimiento Inicial.

Si se cumple cualquiera de las dos condiciones anteriores, la SS finalizará la ejecución del Algoritmo Exponencial Backoff e iniciará la transmisión de la información correspondiente.

5. En caso de que se haya agotado el tiempo de espera, la SS incrementará en uno el valor de la Ventana Backoff y generará un nuevo número aleatorio de *minislots* de espera. Lo anterior implica que valor generado deberá estar en un rango cuya cota final será el doble que el rango usado anteriormente. En caso de que la Ventana Inicial Backoff haya sido de 4, y haya fracasado el primer reintento de transmisión, la Ventana incrementará al valor 5, lo cual significa que la SS generará un número aleatorio entre 0 y 32.
6. La SS repetirá el proceso anterior tantas veces como sea necesario hasta llegar al valor de la Ventana Backoff Final. En caso de que en este nuevo intento no se haya recibido respuesta por parte de la BS, cuando ha ocurrido

una Colisión, la SS descartará la información pendiente por transmitir. Si se ha intentado transmitir un mensaje RNG-REQ durante el intervalo de Mantenimiento Inicial, la SS reiniciará el proceso.

3.3 Conclusiones

En el presente capítulo se han presentado las principales características de la operación del estándar IEEE 802.16. De manera básica, en los sistemas WIMAX se lleva a cabo un intercambio constante de mensajes que sirven para el establecimiento de la conectividad, así como para la descripción de las propiedades del canal de comunicación y del tráfico que fluye a través de él. Esto permite tener un sistema dinámico capaz de actualizar su percepción del estado de la red y de adaptarse a los cambios que se presenten, con el fin de optimizar los procesos de comunicación.

Asimismo, se ha podido observar la versatilidad del estándar, ya que gracias al diseño de su capa MAC permite manejar diversas tecnologías de acceso y duplexión a nivel de capa física.

Además, el estándar define cuatro tipos básicos de servicios, que en conjunto permiten abarcar un gran número de aplicaciones, y de forma individual permiten manejar a cada una de ellas de la mejor forma posible en función de sus características.

Finalmente se describió el algoritmo de resolución de colisiones que utiliza el estándar, el cual proporciona a las SSs un mecanismo que les permite proceder de manera efectiva en el evento de una colisión, maximizando la eficiencia en el uso del ancho de banda.

Capítulo 4

Modelo de simulación en Opnet

4.1 Introducción

A fin de poder conocer mejor el comportamiento del protocolo IEEE 802.16, el presente trabajo se ha apoyado en el software OPNET Modeler 8.1, el cual es una herramienta de simulación que ha permitido analizar de manera cuantitativa, el desempeño y funcionamiento de una red de tipo BWA. Esta herramienta de simulación trabaja con un lenguaje de programación orientado a objetos conocido como Proto-C, el cual consiste de diagramas con transición de estados, una librería de funciones preprogramadas (kernel procedures) y el lenguaje estándar de programación C.

En el presente capítulo se describen de manera detallada los aspectos más importantes en lo concerniente al modelo de simulación utilizado. Como se ha mencionado anteriormente, los elementos básicos en una arquitectura BWA son la estación base (BS) y una o más estaciones subscriptoras (SSs). Cada uno de estos elementos está representado por un modelo de nodo, cuyo funcionamiento es determinado por un conjunto de procesos internos, que a su vez están constituidos de varios estados lógicos.

El modelo, figura 4.1, cuenta además con un nodo adicional, el cual está destinado a almacenar y procesar la información necesaria para la elaboración de estadísticas, las cuales finalmente serán nuestra herramienta de análisis.

Debido a que el presente trabajo tiene como objetivo principal la implementación y análisis del Servicio de Poleo no en Tiempo Real (nrTPS), se abordará este servicio en forma detallada en la sección 4.3, a diferencia del resto de los servicios mencionados en la sección 4.2.3.

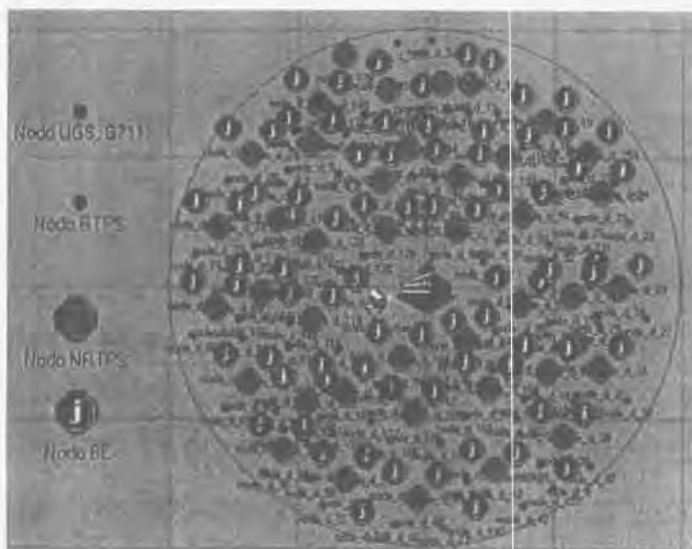


Figura 4.1 Modelo de Red

4.2 Implementación del Modelo BWA

4.2.1 Estación Subscriptora

La estación subscriptora (SS) es el nodo de acceso a la red. Está formada por un generador de tráfico que representa las capas superiores y que se explicara más adelante, una unidad de Control de Acceso al Medio (MAC), y dos módulos de RF para la transmisión y recepción de información, como se ilustra en la figura 4.2:

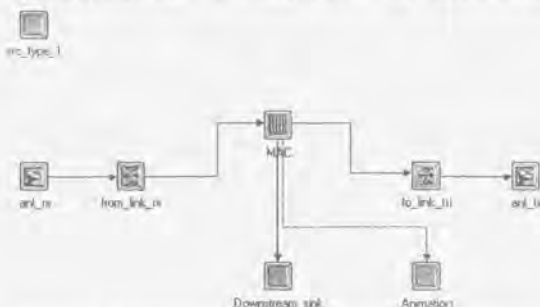


Figura 4.2 Modelo de nodo de la estación subscriptora

El módulo generador de tráfico (*src_type_1*) puede producir cuatro tipos diferentes de tráfico, con base al tipo de servicio acordado con la BS. Los tipos de tráfico son descritos más detalladamente en la sección 4.2.3.

Los módulos de RF (*ant_rx*, *from_link_rx*, *to_link_tx* y *ant_tx*) son los responsables de recibir los paquetes provenientes de la red de radiofrecuencia, o bien, de enviar los paquetes hacia la misma.

El módulo MAC es el encargado de procesar los paquetes provenientes de capas superiores y de enviarlos hacia los módulos de RF, con base al nivel de Calidad de Servicio correspondiente. Este módulo utiliza una FSM (Finite State Machine) primaria y una FSM secundaria. La FSM primaria, mostrada en la figura 4.3, es responsable de los procesos de inicialización y registro, de la recepción y procesamiento de los *frames* UCD, UL-MAP y DL-MAP provenientes de la BS, y del manejo de los paquetes de sincronización.

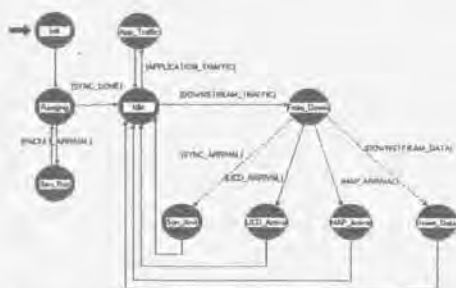


Figura 4.3 FSM primaria. Módulo MAC de la SS

Los paquetes provenientes de capas superiores, son manejados por el estado denominado Application Traffic (*App_Traffic*) de la FSM primaria, la cual los envía a la FSM secundaria para su transmisión en el canal de subida.

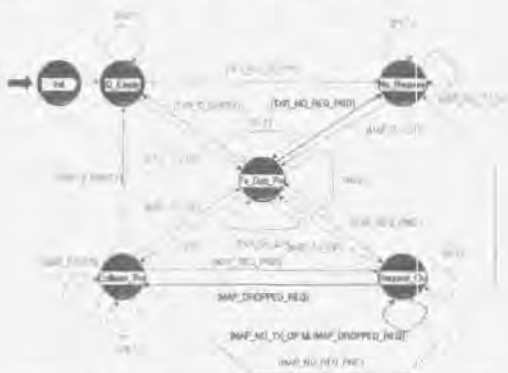


Figura 4. 4 FSM secundaria. Módulo MAC de la SS

La FSM secundaria, mostrada en la figura 4.4, se encarga de procesar y redirigir los paquetes de tipo MAP provenientes de la BS, así como los paquetes generados por las distintas aplicaciones. Cada vez que el módulo MAC de una SS recibe alguno de estos paquetes, invoca a este proceso desde los estados *App_Traffic* o *MAP_Arrival*. El proceso contempla un encolamiento de tipo FIFO (First In, First Out) mediante la cual se atienden los paquetes conforme se reciben.

Cada uno de los estados en la FSM secundaria (o proceso hijo) corresponde a situaciones específicas en las que se encuentre el servicio, como pueden ser el encolamiento de paquetes, la existencia de transmisiones pendientes o de solicitudes sin resolver y la ocurrencia de colisiones. La tabla 4.1 resume las características de cada estado:

Estado	Cola vacía	Transmisiones pendientes	Solicitudes sin resolver	En deferencia
INIT	Sí	No	No	No
Q_Empty	Sí	No	No	No
No_Request_Outstanding	No	No	No	No
Tx_Opp_Pending	No	Sí	No	No
Request_Outstanding	No	No	Sí	No
Collision_Resolution	No	No	-	Sí

Tabla 4.1 Características de los estados de la FSM secundaria del módulo MAC de la SS.

Al recibir un paquete proveniente de la FSM primaria, la FSM secundaria procesa dicho paquete de acuerdo al nivel de QoS manejado. En caso de que el paquete corresponda al servicio Best Effort (BE), el estado denominado Transmission Opportunity (*Tx_Opp_Pending*) busca una oportunidad en la región de contención ya sea en el actual o en el siguiente UL-MAP, a fin de poder enviar una petición a la BS en el área de reservación. En caso de que esta petición resulte en colisión con alguna otra transmisión por contención, el estado denominado Collision Resolution

(*Collision_Resolution*) resuelve esta situación utilizando el algoritmo Exponential Backoff. Si el paquete recibido por la FSM secundaria corresponde a cualquier otro tipo de servicio (UGS, rtPS o nrtPS), el estado Transmission Opportunity envía una petición de tipo DSA (Dynamic Service Addition) a la estación base, indicando el tipo de servicio necesitado para la conexión actual. De ser aceptada esta petición, el estado *No_Request_Outstanding* se encarga de recibir los *grants* correspondientes y de indicarle al estado Transmission Opportunity cuándo transmitir los paquetes.

En caso de que ningún *grant* sea asignado para el servicio nrtPS, los paquetes pueden aún ser transmitidos a la red de radio utilizando el servicio de Best Effort.

4.2.2 Estación Base

La estación base (BS) es la encargada de la identificación de las SSs y de proveer a cada una de ellas con un nivel apropiado de QoS. Este tipo de estación es utilizada para enlaces punto-multipunto y es el portal principal para los paquetes que entran y salen de la red. La figura 4.5 muestra el modelo de nodo de la BS, que está compuesto principalmente por una unidad MAC, tres módulos receptores (para modulaciones QPSK/*from_link_rx*, 16-QAM/*from_link_rx* ó 64-QAM/*from_link_rx_1*) y un módulo transmisor (*to_link_tx*).

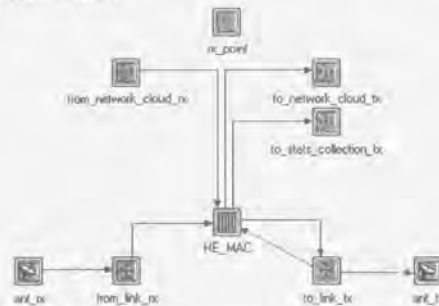


Figura 4.5 Modelo de nodo de la estación base

La BS puede soportar diversos canales con diferentes tasas de transmisión, dependiendo del tipo de modulación negociada. Por ejemplo, si se utilizan canales de subida con un ancho de banda de 6 MHz, podrían obtenerse tasas de transmisión de hasta 9.6, 19.2 ó 28.8 Mbps utilizando las modulaciones QPSK, 16-QAM o 64-QAM, respectivamente [4]. En el presente proyecto únicamente se utilizó el módulo QPSK/*from_link_rx*, que permite obtener una tasa de transmisión de hasta 9.6 Mbps a nivel de capa física para el canal de subida, después de la cual el canal comienza a saturarse.

El módulo MAC es responsable de proveer a la SS de un nivel apropiado de QoS, así como de garantizar adecuadamente las oportunidades de transmisión. Para ello, éste módulo utiliza también una FSM primaria y una FSM secundaria.

De manera básica, la FSM primaria realiza tres funciones principales:

- 1) Se ocupa de los procesos de inicialización y registro de la SS, por medio de los estados de *ranging*, *rng_rcvd* y *rng_complete*.
- 2) Basándose en la petición de la SS, la FSM primaria crea los mapas de señalización que describen la región de mantenimiento (usando el estado *Mtn_MAP*), así como la región de acceso de contención y reservación (utilizando el estado *MAP-Time*).
- 3) Provee sincronización e información a la SS mediante el mensaje UCD.

El modelo de la FSM primaria es mostrado en la figura 4.6:

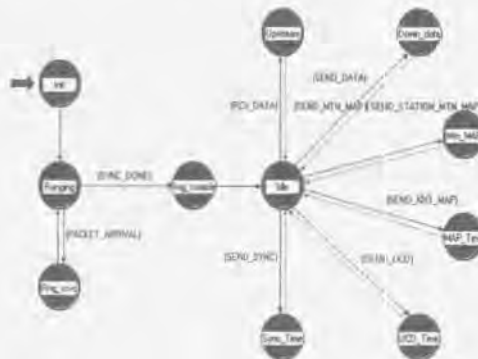


Figura 4.6 FSM primaria. Módulo MAC de la BS

Todos los *frames* producidos en la FSM primaria son enviados a la FSM secundaria, la cual se encarga de transmitir dichos *frames* en el canal de bajada adecuado. La FSM secundaria es mostrada en la figura 4.7:



Figura 4.7 FSM secundaria. Módulo MAC de la BS

4.2.3 Generadores de tráfico

4.2.3.1 Generador de tráfico VoIP - G.711

Este generador de tráfico utiliza el códec G.711 (estandarizado por la ITU) para la digitalización de las señales de voz en una aplicación de Voz sobre IP, que será manejada a través del servicio UGS. Este códec permite tener una alta calidad en las señales de voz debido a que éstas son muestreadas sin utilizar ningún tipo de compresión, aunque esto tiene la desventaja de que el ancho de banda requerido es mayor en comparación con otros códecs.

Considerando que la voz ocupa una frecuencia máxima de 4 kHz, el códec G.711 toma muestras a una razón de 8000 muestras por segundo (con base en el teorema de Nyquist). Las muestras son codificadas bajo el esquema PCM (Pulse Code Modulation) el cual asigna 8 bits por cada muestra tomada, obteniendo una tasa de transmisión de 64 kbps en la capa de aplicación.

Lo anterior es equivalente a tener un *frame* de voz generado cada 10 ms, el cual al llegar a la capa PHY (después de pasar por las capas RTP, UDP, IP, SNAP, LLC, Ethernet MAC y BWA MAC) produce un nuevo *frame* codificado, que requiere de un *grant* de 13 slots para su transmisión. El cálculo de este nuevo *frame* se muestra en la figura 4.9.

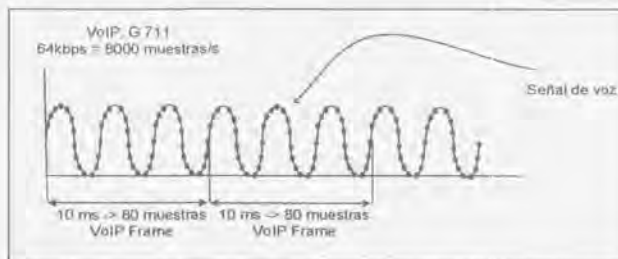


Figura 4.8 Codificación de una Señal de Voz basada en G711

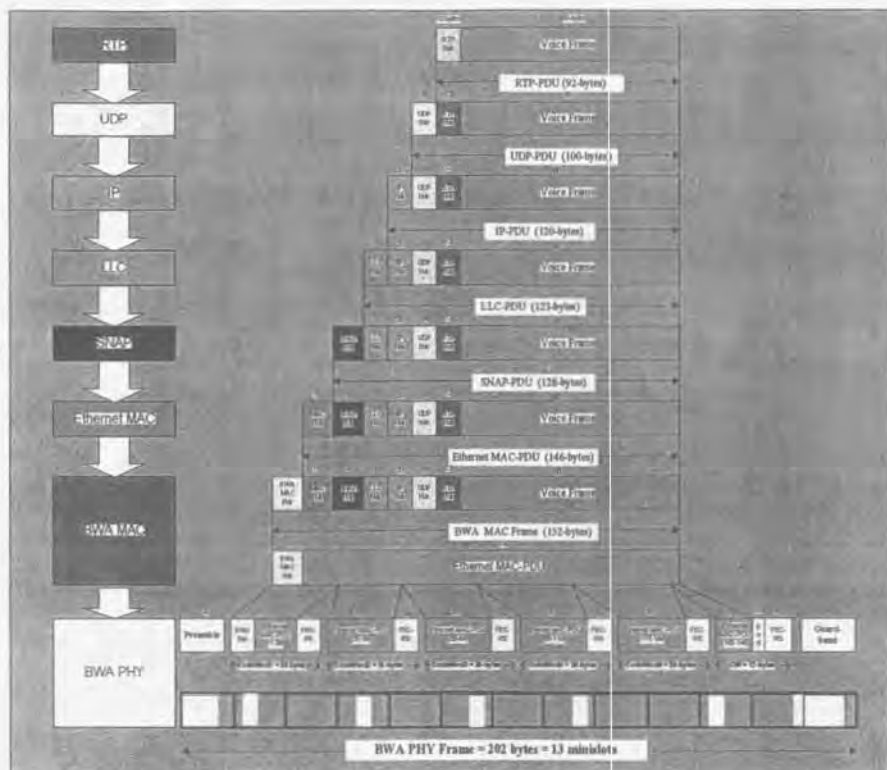


Figura 4.9 Cálculo del número de slots a solicitar (tamaño del *gran!*) cuando se utilizan palabras de código cortas

Cuando un *frame* de voz llega a la capa MAC, se forma un *BWA MAC Frame*, que puede ser enviado utilizando palabras de código cortas (short codewords) o palabras de código largas (long codewords). En la presente implementación, se define el límite de 245 bytes como criterio para decidir qué tipo de palabras de código se utilizarán. En este caso, el *BWA MAC Frame* de 152 bytes obtenido de un *frame* de voz, deberá enviarse utilizando palabras de código cortas de 36 bytes. Los primeros 30 bytes son los datos del *BWA MAC Frame*, a los que se les agrega un encabezado FEC (Forward Error Correction) para detección y corrección de errores. Finalmente a estas palabras codificadas se les agrega un preámbulo (*preamble*) para la sincronía y un espacio de guarda (*guardband*) para posibles variaciones o retardos en la transmisión.

En general, el comportamiento de un tipo de tráfico se define con base a distribuciones de probabilidad, que sirven para especificar entre otras cosas, los tiempos de creación de paquetes así como la duración de los periodos activos e inactivos. Estas características se deben registrar como atributos del módulo generador de tráfico (*src_type_1*), como se muestra en la figura 4.10:

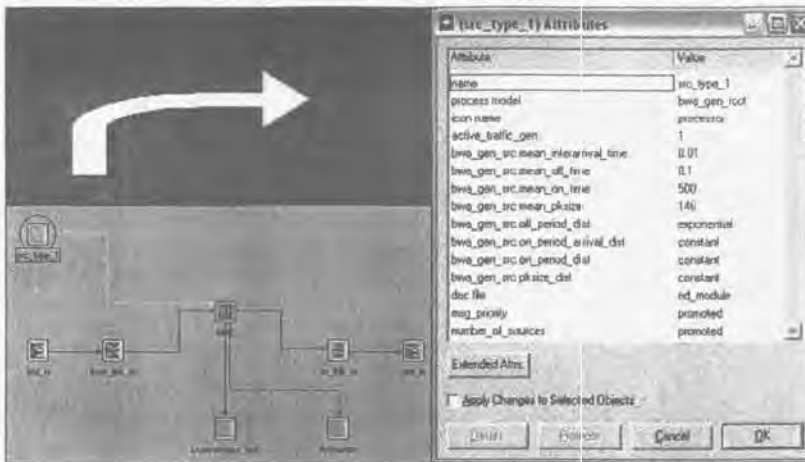


Figura 4.10 Configuración del generador de tráfico de voz G.711

Los atributos más importantes son descritos en la siguiente tabla:

Atributo	Explicación
1. off-period_distribution	Distribución del periodo de inactividad
2. mean_off_time	Media de la distribución
3. on-period_distribution	Distribución del periodo de actividad
4. mean_on_time	Media de la distribución
5. on_period_arrival_distribution	Distribución de las llegadas de los frames o paquetes
6. mean_interarrival_time	Media de la distribución
7. off-period_distribution	Distribución del periodo de inactividad
8. mean_off_time	Media de la distribución
9. packet_distribution	Distribución del tamaño de los frames
10. packet_size	Media de la distribución

Tabla 4.2 Descripción de los atributos del módulo *src_type_1*

En la figura 4.11 se encuentran representadas las características recién mencionadas:

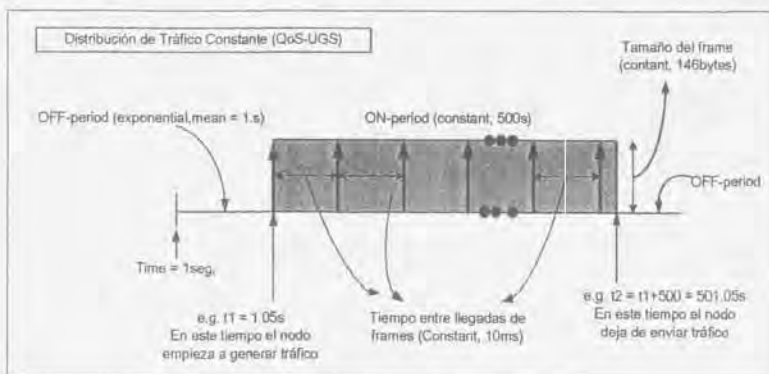


Figura 4.11 Distribución de tráfico UGS

4.2.3.2 Generador de tráfico MPEG

Entre las aplicaciones consideradas para el servicio rTPS se encuentra el Video sobre Demanda (VoD), el cual permite a los usuarios la descarga de clips de video con opciones de interactividad. Sin embargo, es sabido que las aplicaciones de video no pueden ser manejadas de manera directa a través de la red, debido a que causarían un rápido sofocamiento del ancho de banda disponible, incluso en redes de banda ancha. Con el fin de obtener una transmisión más eficiente, la información de video es comprimida y codificada utilizando uno de los algoritmos de compresión más comunes, conocido como MPEG.

La configuración de los atributos que definirán el comportamiento de este tipo de tráfico se muestra en la tabla 4.3:

Atributo	Valor
Distribución del periodo de inactividad	
off-period_distribution	Exponencial
mean_off_time	40 ms
Distribución del periodo de actividad	
on-period_distribution	Constante
mean_on_time	500 seg
Distribución de las llegadas de los frames o paquetes	
on_period_arrival_distribution	Constante
mean_interarrival_time	40 ms

Tabla 4.3 Configuración del generador de tráfico MPEG

El generador de tráfico MPEG no hace uso de algún tipo de modelado para el tamaño de los paquetes, sino que dicha información es obtenida directamente de un archivo como el mostrado en la figura 4.12:



Figura 4.12 Tamaños de los paquetes de un archivo MPEG

Dicho archivo contiene los tamaños de los paquetes resultantes de una codificación MPEG. Al iniciarse la transmisión, el generador puede escoger entre 10 posibles archivos que corresponderían a los tamaños de la película que se va a transmitir.

El comportamiento resultante es similar al del generador de tráfico UGS, en cuanto a que el tiempo de llegada entre paquetes también es constante (aunque esta vez de 40 ms). Por su parte, las características del periodo activo son idénticas y las del periodo inactivo solo cambian en el valor de la media (ahora de 40 ms). La principal diferencia radica en que el tamaño de los paquetes generados ya no es constante, sino que depende de las características de la película a transmitir, lo cual justifica las necesidades de poleo descritas en la sección 3.2.6.2, para el servicio rPS.

4.2.3.3 Generador de tráfico de Internet

El tráfico de Internet será enviado usando el servicio de BE. Los tiempos de creación de paquetes así la duración del periodo activo e inactivo, se definen mediante los atributos mostrados en la siguiente tabla:

Atributo	Valor
Distribución del periodo de inactividad	
off-period_distribution	Exponencial
mean_off_time	100 ms
Distribución del periodo de actividad	
on-period_distribution	Constante
mean_on_time	500 seg
Distribución de las llegadas de los frames o paquetes	
on_period_arrival_distribution	Exponencial
mean_interarrival_time	42 ms

Tabla 4.4 Configuración del generador de tráfico de Internet

El valor del atributo *mean_interarrival_time*, en conjunción con la distribución del tamaño de los paquetes, producen una tasa de transmisión resultante de 64 kbps en la capa Ethernet MAC.

La distribución para el tamaño de los paquetes se muestra en la figura 4.13.

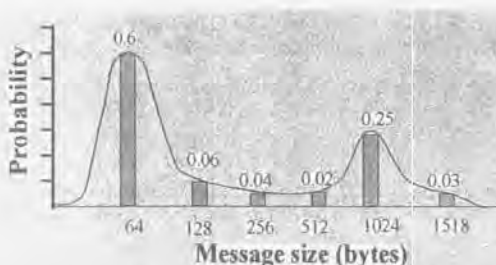


Figura 4.13 Distribución del tamaño de paquetes de tipo Internet

Como puede observarse en la figura 4.13, el tamaño de los paquetes puede oscilar entre los 64 y los 1518 bytes, siendo los primeros los de mayor probabilidad de ocurrencia. En el caso de que se genere un paquete de 1518 bytes, éste debe ser codificado utilizando palabras de código largas (como se mencionó en la sección 4.2.3.1), y por cada fragmento de 245 bytes del *BWA MAC frame*, se agregan 10 bytes de encabezado FEC. Lo anterior implica que para transmitir un Mensaje Ethernet MAC de 1518 bytes, se requerirá un *grant* de 101 slots, como se muestra en la figura 4.14:

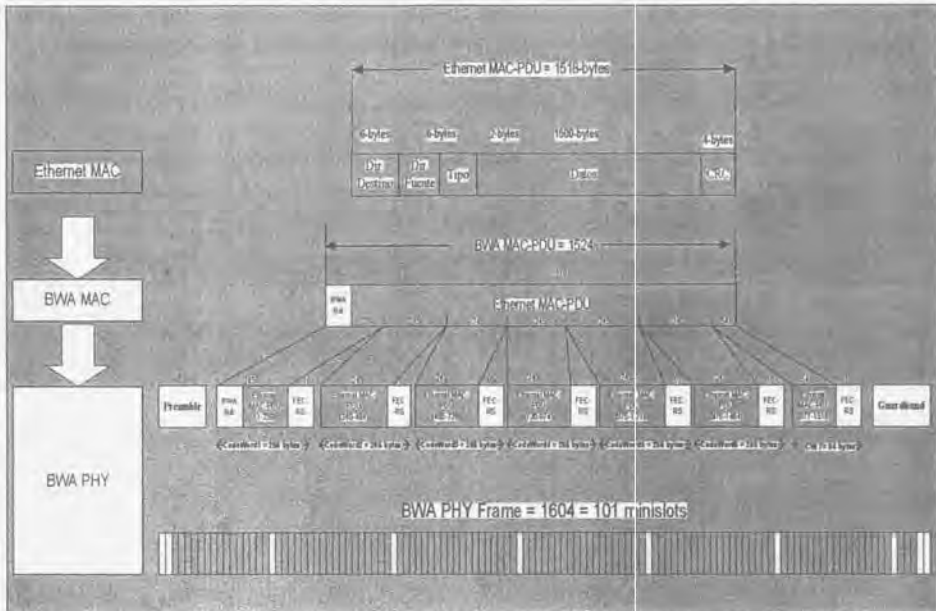


Figura 4.14 Cálculo del número de slots a solicitar (Grant Size) cuando se utilizan palabras de código largas, en la transmisión de un *Ethernet MAC frame* de 1518 bytes.

4.3 Servicio nrtPS

El servicio nrtPS está diseñado para atender un tipo de tráfico en el que el tamaño de los paquetes y el tiempo de creación entre los mismos, pueden variar en forma considerable. Es por eso que este tipo de servicio, parecido al servicio rPS, incluye características adicionales tales como el uso de peticiones *piggyback* y peticiones en contención, las cuales permiten tratar adecuadamente el tráfico generado por aplicaciones tolerantes al retraso (*delay*) y que produzcan paquetes de tamaño variable, tales como aplicaciones FTP.

4.3.1 Implementación del servicio nrtPS

La incorporación de este servicio al modelo de simulación se basó en el servicio rPS previamente implementado, de tal modo que los nodos y variables designadas para nrtPS, eran al principio un duplicado de las que usaba el servicio rPS. Posteriormente se le asignó a nrtPS una porción del ancho de banda y todas las demás características para funcionar como un nodo rPS.

Después de verificar que el servicio nrtPS funcionaba de manera similar al servicio rPS, comenzó la etapa de modificaciones en el código y en la estructura de los diferentes elementos de la red BWA, de modo que el servicio nrtPS funcionara de la manera descrita en el estándar IEEE 802.16, contando con las cualidades necesarias para ofrecer un trato adecuado al tráfico que se pretende transportar.

Básicamente los cambios realizados para implementar este servicio se dieron en los procesos "bwa_gen_src", "bwa_wm_child" y "bwa_be_mgr".

4.3.1.1 Proceso bwa_gen_src

El proceso "bwa_gen_src" es el encargado de generar el tráfico para los cuatro tipos de servicio. Los cambios realizados en este proceso se enfocan en la implementación de un algoritmo para generar el tráfico FTP, el cual por su alta variabilidad nos permitirá medir la Calidad de Servicio que puede ofrecer nrtPS. El algoritmo para generar tráfico FTP se explicara más adelante, en donde se describirán sus características y su funcionamiento.

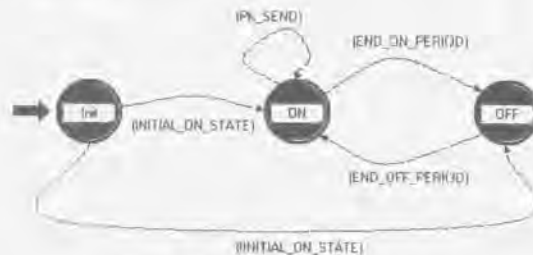


Figura 4.15 Proceso bwa_gen_src.

4.3.1.2 Proceso bwa_wm_child

Uno de los procesos más importantes en la implementación del servicio nrtPS es el proceso "bwa_wm_child". Este proceso corresponde a la FSM secundaria del módulo MAC de la SS (ver figura 4.4), que como ya se mencionó anteriormente, se encarga de procesar y redirigir todos los paquetes generados y recibidos hacia o desde la red. Los cambios realizados en esta FSM se localizan en casi todos los estados, considerando que se debe mantener una sincronización con la BS para que el servicio sea eficiente.

El código agregado al estado *Q_Empty* permite medir los diferentes *delays* que presenta el paquete de un usuario con servicio nrtPS. Los *delays* de interés para este estudio son cuatro: *queueing delay*, *polling delay*, *grant delay* y *ETE (End-To-End) delay*. La descripción de estos *delays* y su forma de medición se realizará en la sección 4.3.3.1.

En el estado *Collision_Resolution* también se agregó el código para poder calcular los *delays* recién mencionados y además para realizar la activación del servicio nrtPS. La activación del servicio se hace en este estado debido a que la solicitud hacia la BS para activar el servicio se realiza mediante una petición en contención, misma que se deriva del algoritmo de exponential backoff inicial. Después de que el servicio se activa mediante la petición en contención, la BS le cederá *grants* periódicamente a la SS, con lo que las transmisiones se realizarán únicamente en la región de reservación, evitando las colisiones en contención.

Para el estado *Request_Outstanding* los cambios consisten en código para asignar los tiempos de encolamiento y de poleo. Los paquetes que son encolados van a este estado, y dado que previamente se ha realizado una petición de ancho de banda para la cual aun no se ha obtenido respuesta, el tiempo de poleo debe ser igual a cero y solamente se calcula el tiempo de encolamiento. Cuando se encuentra una oportunidad de transmisión, se mide el tiempo que duró el paquete en la cola y se envía al estado *Tx_Opp_Pending* para su transmisión.

No_Request_Outstanding presenta modificaciones para poder enviar peticiones en contención cuando no se han encontrado oportunidades de transmisión en varios mapas. En este estado llegan los paquetes creados que encuentran la cola vacía (se consideran como no encolados), pero que están en espera del slot de poleo. Al encontrarse la oportunidad de transmisión se fija el tiempo de poleo, y el tiempo de encolamiento es igual a cero. En caso de que llegue un segundo paquete, éste será enviado al estado *Request_Outstanding*.

La transmisión tanto de las peticiones de ancho de banda como de los paquetes de información se realiza en el estado *Tx_Opp_Pending*. En este estado las modificaciones fueron hechas exclusivamente para permitir o evitar el uso de peticiones en contención, dependiendo de la atención recibida por el nodo y del estado de la red. Los *delays* no son considerados en este estado debido a que de eso se encargan los otros cuatro estados.

Finalmente las modificaciones más importantes de este proceso se encuentran en el *Function Block* de este proceso, específicamente en las funciones *tx_request*, *tx_request_data*, *tx_grant*, *tx_frag_grant* y *compute_request_size*. Estas funciones son constantemente usadas en todo el proceso, ya que modifican parámetros con los cuales se determina qué estado es el siguiente, además de que realizan el procesamiento de los paquetes. El código agregado (o modificado) está relacionado con algunos atributos globales, tales como la variable *req_pending* (que indica si hay o no una solicitud pendiente), los *delays*, las peticiones *piggyback* y los encabezados de capas inferiores y de fragmentación.

Las funciones *tx_request* y *tx_request_data* son las encargadas de enviar las peticiones de asignación de ancho de banda, tanto en contención como en reservación. La función de *tx_grant* se encarga de la transmisión del paquete una vez que el ancho de banda ha sido asignado. Si existiera algún otro paquete encolado, se genera la petición *piggyback* y se envía junto con el paquete, además de que también modifica los *delays* del paquete si es necesario. En caso de que el ancho de banda no sea suficiente, *tx_frag_grant* es la función encargada de fragmentar el paquete y de enviar cada uno de esos fragmentos, así como también de generar y transmitir la petición *piggyback* junto con el paquete en caso de ser necesario. La función *compute_request_size* se encarga de calcular el tamaño necesario en bytes, para transmitir la información.

4.3.1.3 Proceso *bwa_be_mgr*

Este proceso corresponde a la FSM primaria del módulo MAC de la BS (ver figura 4.6) y es el más importante en el funcionamiento del servicio nrtPS, pues entre sus funciones se encuentran la generación y transmisión de los paquetes de sincronización, UCD, MAP y del tráfico en el canal descendente, dirigidos hacia las SSs de la red BWA. Es éste el proceso el que hace posible que el servicio nrtPS tenga un comportamiento como el descrito en el estándar IEEE 802.16, ya que es aquí en donde se programan los slots de poleo, los slots de reservación para realizar las transmisiones, donde se reciben las peticiones *piggyback* y los paquetes de información, entre otras funciones.

Los cambios más significativos tuvieron lugar en los estados *MAP_Time*, *Upstream* y en el *Function Block* de este proceso.

El estado *MAP_Time* es el encargado de generar y de enviar el descriptor del mapa de subida (ó UCD) para todas las SSs, en el que se programan los slots de reservación para cada tipo de tráfico. Existe un procedimiento llamado "segunda ronda" que sirve para reutilizar el mapa en caso de que algún servicio no haya hecho uso el ancho de banda que tenía asignado. En caso de existir, este ancho de banda sobrante se asigna de forma similar que en la primera ronda, esto es, primero al servicio UGS, después a rrtPS y finalmente a nrtPS. El servicio BE utiliza el ancho de banda que queda después de la primera ronda. Las modificaciones se hicieron de forma que al generar el mapa, se tomara en cuenta al servicio nrtPS tanto en la primera como en la segunda ronda del mapa.

La función más importante del código mostrado en la figura 4.16 es *lev_nRTP_with_EDF_grant()*, que se encarga de programar los slots de poleo y de reservación para cada SS. Esta función se explicará con más detalle en la parte del *Function Block*.

El código de la figura 4.16 muestra como se hace la primera ronda para el servicio nrtPS.

```

if (!lev_complete(ld_ptr, DPC_FALSE))
{
    max_slots_given_after_rrtps = ld_ptr->num_slots
    + (int)(max_slots_in_map-contention_slots)*rrtps_map_offset;
    if (max_slots_in_map < max_slots_given_after_rrtps)
        max_slots_given_after_rrtps = max_slots_in_map;
    lev_rrtp_with EDF_grant(ld_ptr);
}
else
    printf ("NF: WARNING!! CMTS MAP FULL after RTP polls (%d)\n",
           op_simulation(), lev_complete_cause(ld_ptr, DPC_FALSE));

```

Figura 4.16 Primera ronda para rrtps.

Upstream es el estado encargado de recibir los paquetes provenientes de las SSs, incluyendo las peticiones en poleo, en contención o en *piggyback*. En esta parte se agregó código para contabilizar dichas peticiones, así como para medir el *grant delay*, que se fija al recibir un paquete satisfactoriamente en la BS. Existen tres tipos de paquetes recibidos:

- *peticiones de ancho de banda sin datos*, que pueden ser peticiones en poleo o en contención,
- *paquetes de datos sin fragmentar*, que pueden incluir solicitudes de ancho de banda (peticiones *piggyback*)
- *paquetes de datos fragmentados*, que pueden incluir solicitudes de ancho de banda (peticiones *piggyback*)

A continuación nos enfocaremos en los paquetes que contienen peticiones *piggyback*, ya sea sin fragmentar o con fragmentación.

Al recibir un paquete de datos, se verifica en su encabezado si contiene petición de ancho de banda para algún otro paquete que tenga en la cola de servicio. En caso de que exista dicha petición, se modifican parámetros que permiten que en el siguiente mapa, si hay espacio suficiente, se programen los slots requeridos. Para paquetes en fragmentación con peticiones *piggyback*, los parámetros solamente se modifican cuando se ha recibido el último fragmento y se ha detectado la petición de ancho de banda.

El código de la figura 4.17 muestra los parámetros que se modifican al recibir una petición *piggyback*, en donde *req_size* indica el tamaño en bytes del siguiente paquete; *qm_ptr* es una estructura que se obtiene de la lista maestra de la BS; en donde se registran todos los usuarios con todas sus características; *compute_slots_needed()* calcula el tamaño requerido en slots considerando los encabezados; por último *piggy_req[]* es un arreglo de banderas que nos sirve para fijar la prioridad necesaria para poder transmitir.

```

qm_ptr->shaping->message_size_pending = req_size;
req_size = compute_slots_needed(qm_ptr->shaping->message_size_pending,
                               current_minislot_size, current_long_data_FEC_codeword,
                               current_long_data_FEC_parity, current_long_data_preamble,
                               current_long_data_guardband, Mac_packing);
qm_ptr->shaping->grant_required = req_size;
qm_ptr->shaping->grant_pending = 1;
piggy_req[req_sid-1000] = 1;

```

Figura 4.17 Resolución de peticiones *piggyback*.

Las modificaciones en el *Function Block* consistieron en algunos cambios en la función *lev_ie_add* y en la implementación de las funciones *lev_nrt_shaper_new_EDF*, *lev_nrt_click_EDF* y *lev_nRTP_with_EDF_grant*.

La función *lev_nrt_shaper_new_EDF* se encarga de generar las estructuras necesarias para registrar las SSs durante el periodo de inicialización. También fija parámetros necesarios para el servicio nrtPS.

La función *lev_nrt_click_EDF* se encarga de actualizar el estado y la prioridad de la SS, el estado de la SS se incrementa en uno cada mapa que pasa y cuando el estado llega a cierto número se debe programar un slot de poleo, esto depende del retardo máximo que puede tolerar la aplicación.

lev_nRTP_with_EDF_grant es la función encargada de ceder los slots de poleo y de reservación a la SS, siempre y cuando existan slots disponibles. Las peticiones *piggyback* son encoladas hasta el final de la lista, otorgándoles la menor prioridad, de forma que tienen que esperar su turno y solo podrán ser atendidas inmediatamente en caso de que sobren slots en el mapa. De haber peticiones que no se puedan resolver en el actual mapa, la función responderá con un grant de cero slots, indicándole a la SS que su petición se ha registrado y que no es necesario enviar otra petición.

Por último la función *lev_ie_add* es la encargada de agregar los IEs al mapa en construcción. Las modificaciones permiten reservar los slots y si no hay espacio, programar el grant de cero como respuesta a una petición de ancho de banda sin resolver. Las modificaciones se hicieron partiendo de que el funcionamiento del servicio era muy similar a rTPS. Después de que se programa una transmisión, se modifican algunos parámetros de la SS dentro de la lista maestra, que son principalmente el estado y la prioridad para los paquetes solicitados en *piggyback*, con lo que se logra ofrecer un adecuado servicio nrtPS.

4.3.2 Generador de tráfico FTP

El generador de tráfico FTP es una herramienta que puede ser usada para simular el comportamiento del tráfico FTP dentro de una red. El perfil de tráfico generado por este algoritmo está basado en modelos matemáticos, los cuales incorporan observaciones obtenidas de la experimentación en redes reales y de razonamientos derivados de esas observaciones [5]. Este algoritmo fue creado con el objetivo de producir tráfico que contenga las principales características del protocolo FTP.

4.3.2.1 Distribuciones

Básicamente las distribuciones usadas son dos, la distribución de Pareto y la distribución Log₂-Normal.

La distribución de Pareto (Pareto, 1897) propuesta por este autor, es una distribución biparamétrica, donde *b* es el parámetro de forma y *a* es un factor escalar. Su función de distribución es la siguiente:

$$F(x) = 1 - (a/x)^b$$

Esta distribución se utiliza para calcular el tamaño de los bursts (o ráfagas). Su implementación en el simulador es la siguiente:

```
double pareto(double a, double b)
{
    double R;
    double result;
    FIN(pareto());
    R = op_dist_outcome(op_dist_load("uniform", 0, 1));
    result = a / (pow((1-R), (1.0/b)));
    FRET(result);
}
```

Figura 4.18 Función de distribución Pareto.

La distribución Log₂-Normal se refiere a una variable aleatoria que sigue una distribución normal después de habersele aplicado una transformación logarítmica, en este caso logaritmo base 2. Esta función es empleada para calcular el tamaño de sesión FTP, el tamaño de las conexiones en dicha sesión, el tamaño de los bursts y además para calcular los tiempos de creación entre de cada conexión. Su implementación en el simulador es la mostrada en la figura 4.19.

```
double log2normal(double mean, double sd)
{
    double N;
    double result;
    FIN(log2normal());
    N = op_dist_outcome(op_dist_load("normal", mean, sd));
    result = pow(2, N);
    FRET(result);
}
```

Figura 4.19 Función de distribución Log₂-Normal.

La distribución exponencial también es usada para calcular los tiempos de generación de cada conexión. Las distribuciones normal y uniforme se emplean para generar los valores aleatorios requeridos por las distribuciones Pareto y Log₂-Normal.

4.3.2.2 Algoritmo

Antes de describir el algoritmo se definirán algunos términos que serán usados en esta parte, conforme a lo establecido en [5].

Sesión: Todas las ocurrencias dentro de una invocación específica de una aplicación FTP.

Conexión: Es una transferencia de datos dentro de una sesión.

Burst: Es una serie de conexiones donde los delays entre las mismas son menores a 4 segundos.

El siguiente algoritmo describe los pasos utilizados para generar un perfil de tráfico FTP:

1.- Cálculo del tamaño de la sesión.

El tamaño en bytes de la sesión actual se calcula utilizando una distribución Log₂-Normal [5], de la siguiente forma:

$$\text{Tamaño de la sesión} = 2^N \text{ donde } N = \text{Normal}(\mu_{\text{sesión}}, \sigma_{\text{sesión}})$$

2.- Generación de las conexiones en una sesión.

Todas las conexiones son definidas por una distribución Log₂-Normal.

$$\text{Conexión, } C_i = 2^N \text{ donde } N = \text{Normal}(\mu_{\text{conexión}}, \sigma_{\text{conexión}})$$

Al calcularse una conexión C_i , su tamaño en bytes es agregado a la suma acumulativa de todas las conexiones para esa sesión. Si el total es menor que el tamaño de la sesión, este paso se repite y se calcula otra conexión, si no lo es, la conexión es truncada de forma que el número total de bytes en las conexiones sea igual al tamaño en bytes de la sesión. Mientras la forma de la distribución generada permanezca igual, el promedio es desplazado ligeramente hacia abajo como resultado de los truncamientos. Además, debido a consideraciones de memoria para el simulador y el generador, el número total de conexiones puede estar restringido.

3.- Calculo de los Bursts.

El cálculo de los bursts es un procedimiento complicado que depende de dos distribuciones diferentes. Primero, una distribución Log₂-Normal es usada para los últimos 95 percentiles, para la parte restante se utiliza la distribución de Pareto. El procedimiento se describe a continuación.

Para cada conexión en la sesión (en orden de ocurrencia):

Si la conexión actual es la primera conexión o una conexión previa es marcada como no burst, se calcula un nuevo tamaño de burst, B. Si la diferencia entre el tamaño de la conexión actual y el tamaño del burst es mayor o igual que cero, la conexión es marcada como burst, y la diferencia de tamaños se convierte en el nuevo B. Se avanza a la siguiente conexión y se repite el proceso.

4.- Calculo de los Delays entre conexiones

Un burst por definición es una serie de conexiones separadas por menos de cuatro segundos[5]. Así, para cuales quiera dos conexiones consecutivas en un burst, un tiempo entre cero y cuatro segundos es generado. Para cualquier otra combinación de conexiones, se genera un tiempo mayor a cuatro segundos. El modelo usado en la generación de esos valores consiste de tres diferentes distribuciones(Log₂-Normal, exponencial y uniforme). La tabla 4.5 muestra cómo se utilizan las distribuciones. Finalmente, si algún delay es cero, se ajusta a un nanosegundo, debido a que no sería congruente un delay de cero.

	Delays [s]	Distribución
Burst	0 – 2.5	Exponencial(0.616)
	2.5 – 4	Uniforme(2.5, 4)
No Burst	4 –180	Log ₂ -Normal(3.27, 2.16)

Tabla 4.5 Configuración del generador de tráfico

4.3.3 Parámetros de medición

Después de haber implementado el servicio nrtPS, fue necesario medir algunos parámetros que indicaran si su comportamiento era el correcto, además de que era necesario medir su desempeño para saber si se cumplían los requisitos de Calidad de Servicio previstos.

Los principales parámetros de medición en los que nos apoyamos fueron los delays, las peticiones recibidas, el número de paquetes generados y recibidos, el *throughput* y la utilización del canal de subida. Estos parámetros nos permitieron analizar el comportamiento y la Calidad de Servicio de nrtPS, por lo que serán descritos a continuación.

4.3.3.1 Delays

Los delays considerados en este trabajo son cuatro: *queueing delay*, *polling delay*, *grant delay* y el *ETE (End-To-End) delay*. Para calcular estos delays se necesita que el paquete contenga cuatro tiempos:

creation_time. Es el instante en el que se crea el paquete.

queueing_delay. Es el instante en el que el paquete sale de la cola para ser atendido.

contention_delay. Instante en el cual se comienza a transmitir el paquete.

grant_delay. Instante en el que el paquete se ha recibido por completo.

El formato del paquete o mensaje que se envía contiene tres campos en los cuales se fija cada uno de los instantes mencionados anteriormente. Para el *creation_time* existe una función del simulador que nos permite saber el instante en el que se creó el paquete. La figura 4.20 muestra los campos que contiene el formato del mensaje.



Figura 4.20 Formato del mensaje.

La manera en que los tiempos son asignados se muestra en el código de la figura 4.21, donde *pk_ptr* es un apuntador al paquete, *op_sim_time* es el instante actual de la simulación y la función *op_pk_nfd_set* fija el tiempo en el campo indicado.

```
op_pk_nfd_set (pk_ptr, "queueing_delay", op_sim_time());
op_pk_nfd_set (pk_ptr, "contention_delay", op_sim_time());
op_pk_nfd_set (pk_ptr, "grant_delay", op_sim_time());
```

Figura 4.21 Tiempos para calcular los delays.

Los tiempos *queueing_delay* y *contention_delay* se fijan en el proceso *bwa_wm_child* o en el *Function Block* de dicho proceso, dependiendo del estado en el que se encuentre. El tiempo *grant_delay* se fija en el estado *Upstream* del proceso *bwa_be_mgr*. Después de que al paquete se le fija este último tiempo, es mandado al nodo de estadísticas donde se calculan los delays utilizando los tiempos que contiene el paquete.

El *queueing delay* es el promedio de todos los delays de encolamiento, *Dq*, registrados durante el tiempo de simulación y representa el tiempo que un paquete tiene que esperar en la cola de servicio para ser atendido. El delay de encolamiento para un paquete se calcula de la siguiente manera:

$$Dq = \text{queueing_delay} - \text{creation_time}$$

El *polling delay* es el promedio de todos los delays de poleo, *Dp*, registrados durante una simulación. Representa el tiempo que un paquete (al de salir de la cola de servicio) tiene que esperar el slot de poleo para poder ser transmitido. En algunos casos este delay puede ser cero debido a que el slot de poleo llega justo cuando el paquete salía de la cola de servicio, o a que se mando una petición en contención o una *piggyback*. El delay de poleo para un paquete se calcula de la siguiente forma:

$$Dp = \text{contention_delay} - \text{queueing_delay}$$

El *grant delay* es el promedio de todos los delays de grant, *Dg*, registrados en la simulación. Representa el tiempo que tarda el paquete en ser enviado después de que comienza la transmisión de este, esto depende directamente del tamaño del paquete. El delay de grant para un paquete es calculado como sigue:

$$Dg = \text{grant_delay} - \text{contention_delay}$$

Por ultimo, el *ETE delay* es el promedio de todos los *Dt* (*total delay*) registrados durante una simulación. *Dt* indica cuanto tiempo transcurre desde que se genera un paquete hasta que se recibe por completo en la BS. El *Dt* para un paquete se obtiene de la siguiente forma:

$$Dt = Dq + Dp + Dg$$

o bien:

$$Dt = \text{grant_delay} - \text{creation_time}$$

4.3.3.2 Peticiones y Número de Paquetes

Las peticiones de ancho de banda son cuatro diferentes: peticiones en contención, peticiones en poleo, peticiones *piggyback* para otro paquete y las peticiones *piggyback* para otro paquete en la parte de fragmentación. Cualquiera de estas peticiones de ancho de banda se contabiliza en el estado *Upstream* del proceso *bwa_be_mgr*.

Las peticiones en contención como su nombre lo indica son paquetes sin datos que contienen una solicitud de ancho de banda, los cuales son transmitidos en la región

de contención con tamaño de un slot. Para contabilizar estas peticiones fue necesario utilizar una bandera que nos indicara que la petición se envió en la región de contención. Debido a que las peticiones en contención y en poleo se reciben de la misma forma, la BS no puede diferenciarlas. Si se detecta que se va a realizar una transmisión en la región de contención, la bandera se activa en el estado *Tx_Opp_Pending* del proceso *bwa_wm_child*, cuando la petición se recibe se incrementa el contador *contention_req* y se apaga la bandera. La figura 4.22 muestra el código usado para realizar este conteo.

```

Activación de la Bandera en Tx_Opp_Pending
if(event_type == TXC_EVENT)
    contention_flag[station_sid-1000] = 1;

Incremento del contador en Upstream
if(contention_flag[req_sid-1000] == 1)
    {
        contention_flag[req_sid-1000] = 0;
        contention_req++;
    }

```

Figura 4.22 Conteo de las peticiones en contención.

Las peticiones en poleo son similares a las peticiones en contención, con la diferencia de que las de poleo son transmitidas en la región de reservación. Estas no están expuestas a las colisiones debido a que cada determinado tiempo la BS le otorga a la SS un slot en la región de reservación, donde puede realizar su petición de ancho de banda. Este slot se conoce como el slot de poleo. Dado que la BS no distingue las peticiones en contención de las peticiones en poleo, existe un contador llamado *requests_received* que se incrementa cada que cualquiera de estas dos peticiones es recibida, de tal manera que las peticiones en poleo son el resultado de la diferencia de los dos contadores vistos hasta el momento, es decir:

$$\text{Peticiones en Poleo} = \text{requests_received} - \text{contention_req}$$

Las peticiones *piggyback* son solicitudes de ancho de banda que se transmiten junto con el paquete de datos. Cuando se tiene más de un paquete en la cola de servicio, estas peticiones nos permiten realizar una solicitud de ancho de banda en la región de reservación sin tener que esperar el slot de poleo. Las peticiones *piggyback* para otro paquete y las peticiones *piggyback* para otro paquete en la parte de fragmentación son iguales, con la diferencia de que una se contabiliza cuando el paquete no se fragmenta y la otra cuando se recibe el último fragmento de un paquete. Los contadores para estas peticiones son *BS_piggy_req_for_new_PDU* y *BS_piggy_req_for_new_PDU_in_frag*, y se incrementan cuando se recibe por completo un paquete con un tamaño solicitado mayor a cero.

El número de paquetes generados y recibidos son parámetros que nos permiten hacer un análisis de las peticiones recibidas, con lo cual podemos observar cual es el comportamiento del sistema en diferentes casos. El contador para los paquetes generados es *global_pks_sent* se incrementa cada que un paquete es generado por cualquiera de las SSs. El contador para los paquetes recibidos *all_pks_rcvd*, a diferencia del anterior solamente se incrementa en el nodo de estadísticas cada que un paquete es recibido en este nodo.

4.3.3.3 Throughput y Utilización del canal

El Throughput es una medida de la cantidad de datos transmitidos en un determinado tiempo. Esta medida nos permite determinar la cantidad de información que podemos transmitir a través del canal de comunicación, así como también el número de usuarios con los que se satura el canal y la tasa de transmisión promedio por usuario. La medición de este parámetro se realiza en el nodo de estadísticas. Para obtener el throughput en kbps el cálculo es el siguiente:

$$\text{Throughput} = \text{bits_received} / (1000 * \text{simulation_time})$$

La variable de *bits_received* se obtiene al sumar los bits de cada paquete recibido y *simulation_time* es el tiempo que dura la simulación.

La Utilización del canal es un parámetro muy importante, y de manera similar al Throughput nos permite determinar con precisión cómo se está usando el canal de comunicaciones y sobre todo cuando se satura dicho canal. Por medio de la utilización también podemos tener una idea del porcentaje de ancho de banda invertido en encabezados, peticiones, fragmentación y carga útil (o payload) entre otros aspectos. Es medida en el nodo de estadísticas como se muestra a continuación:

$$\text{UL Utilization} = 100 * (\text{requests_received} + \text{total_reserved_slots}) / \text{total_slots}$$

La variable *total_reserved_slots* refleja el número total de slots que se reservaron para la transmisión de datos y peticiones en el canal de subida. La variable *total_slots* es el número de slots que la BS ofrece durante el tiempo de simulación.

La utilización puede ser analizada con mayor detalle como se muestra a continuación:

$$\text{UL Utilization} = 100 * (\text{requests_received} * 16 + \text{utilization_PAYLOAD} + \text{utilization_bwa_MAC_hdr} + \text{utilization_MAC_frag} + \text{utilization_PHY} + \text{utilization_padding} + \text{utilization_unicast_tx_opp}) / (\text{total_slots} * 16)$$

donde

utilization_PAYLOAD	Es el porcentaje de ancho de banda ocupado por la carga útil de información
utilization_bwa_MAC_hdr	Es el porcentaje de ancho de banda ocupado por encabezados bwa_MAC
utilization_MAC_frag	Es el porcentaje de ancho de banda ocupado por bytes agregados al partir en palabras de código largas, en la capa bwa_MAC
utilization_PHY	Es el porcentaje de ancho de banda ocupado por preámbulos y bandas de guarda en la capa física
utilization_padding	Es el porcentaje de ancho de banda ocupado por bytes de relleno necesarios para redondear a slots
utilization_unicast_tx_opp	Es el porcentaje de ancho de banda ocupado por los slots de poleo asignados a las SSs en el canal de subida

4.4 Conclusiones

En la primera parte de este capítulo se describieron los principales componentes de la red BWA, la estación subscriptora y la estación base. La principal función de la estación subscriptora, como se mencionó en 4.2.1, es la generación de paquetes, además de proveer a dichos paquetes con el acceso adecuado a la red de radiofrecuencia, considerando el tipo de Calidad de Servicio acordado con la estación base. En la sección 4.2.2, se describe a la estación base como el principal elemento de red que es responsable de registrar a las estaciones subscriptoras y de proporcionarles la Calidad de Servicio que solicitan, siendo además el principal portal de entrada o salida de la red.

En la sección 4.2.3 se describieron los generadores de tráfico utilizados para cada tipo de servicio. Dado que los algoritmos utilizados para generar tráfico están basados en gran medida en distribuciones de probabilidad, se describieron los principales parámetros utilizados para definir el comportamiento del tráfico generado, que son fundamentalmente el tamaño de los paquetes generados y el tiempo de creación entre los mismos.

Posteriormente en la sección 4.3 se abordó la implementación del servicio nrtPS en el simulador OPNET Modeler 8.1. Se introdujo a FTP como la aplicación generadora del tráfico que se transportará utilizando este servicio. Dado que es característico de este tipo de tráfico el presentar grandes variaciones en el tamaño de los paquetes, así como en el tiempo de creación entre los mismos, se justificaron los mecanismos de atención con los que cuenta el servicio nrtPS, como son el manejo de peticiones piggyback, o bien de peticiones en contención si las condiciones de la red lo demandan. Además se mencionaron los principales procesos que fueron modificados a fin de obtener un comportamiento similar al descrito en el estándar IEEE 802.16.

En la sección 4.3.2 se muestra la implementación del generador de tráfico FTP, cuyo modelado probabilístico fue obtenido a partir de observaciones experimentales. En el algoritmo para generar dicho tráfico se encuentra el cálculo del tamaño de una sesión FTP así como del tamaño de los paquetes (o conexiones) en ella, además del cálculo de las ráfagas de paquetes que a su vez conlleva al cálculo del delay existente entre los mismos.

Por último en la sección 4.3.3 se describieron los principales parámetros de medición que nos sirvieron para cuantificar el comportamiento del servicio nrtPS. Gracias a este punto de referencia nos fue posible analizar la manera en la que tanto la SS como la BS manejaban a cada paquete. En la SS se midió el tiempo de encolamiento y de poleo, así como se programaron las solicitudes en reservación o contención. Por otra parte en la BS se determinó la forma de asignar prioridad a cada paquete de la SS, además de que se contabilizó el total de peticiones y paquetes de información recibidos. Cada parámetro de medición ayudó a describir y entender lo que sucede en la red, como se observará con más detalle en el siguiente capítulo.

Capítulo 5

Análisis y Resultados

5.1 Introducción

En los capítulos precedentes, se ha buscado proveer al lector de los elementos necesarios para conocer y entender el funcionamiento del protocolo IEEE 802.16. El capítulo 4 consistió en aspectos relacionados a la implementación del servicio nrtPS en el simulador OPNET 8.1, en donde se describió de forma más detallada la operación de dicho servicio en cuanto al manejo de peticiones y resolución de las mismas, además de que se mencionaron las herramientas utilizadas para el análisis del comportamiento de la red, mismas que serán usadas con frecuencia a lo largo del presente capítulo.

A fin de poder obtener elementos que nos permitan cuantificar y por lo tanto mejorar el servicio nrtPS, se diseñaron cuatro escenarios diferentes de simulación. Un escenario de simulación consiste en fijar previamente una serie de parámetros, para después observar el comportamiento de la red conforme varía el número de usuarios en la misma. Dichos parámetros, a los que se referirá como *parámetros de simulación*, pueden ser la porción de ancho de banda que ocupará cada servicio, la forma en la que se realizará el poleo, pero principalmente el tipo de tráfico que circulará por la red, lo cual lleva en ocasiones a tener que modificar la manera en la que la BS atiende a los paquetes recibidos de la SS.

En el presente capítulo se analizarán cuatro escenarios diferentes de simulación, tres de los cuales sólo hacen uso del servicio nrtPS, mientras que el último escenario incluye el uso de los cuatro servicios existentes en el estándar IEEE 802.16, el servicio UGS, rtPS, nrtPS y BE.

5.2 Escenarios de Simulación

En la siguiente tabla se muestran los parámetros referentes a las características del canal de radiofrecuencia, utilizados en los cuatro escenarios de simulación:

Parámetro	Valor
Capacidad del canal de subida (QPSK)	9.6 Mbps
Capacidad del canal de bajada	22 Mbps
Minislots de contención por frame de subida	7 minislots
Tamaño del minislot de subida	16 bytes
Duración del frame de subida	2 ms = 150 minislots
Tiempo de simulación por corrida	30 segundos
Distancia a la BS de la SS más cercana/lejana	0.1 – 2.3 km
Límite entre palabras de código largas o cortas	245 bytes
Máximo número de usuarios por red	200 usuarios

Tabla 5.1 Parámetros del canal de radiofrecuencia

5.2.1 Escenario A

Descripción. En este escenario se utiliza al servicio nrtPS para el transporte de tráfico de Internet. Los principales parámetros se presentan en la siguiente tabla:

Característica	Configuración	Comentarios
Slot de Poleo	Enviado por la BS cada 40 ms o 20 frames de subida (UL-frames) para que la SS transmita su petición de ancho de banda, en caso de requerirlo.	Si la BS no puede resolver la petición, envía un grant de 0 a la SS notificándole que cese de enviar peticiones y que será atendida en cuanto exista ancho de banda disponible.
Peticiones piggyback	Enviadas junto con los datos en caso de haber paquetes encolados.	Al recibir la petición piggyback, la BS le asigna la última prioridad dentro de la lista maestra.
Peticiones en contención	No incluidas	La SS no enviará peticiones en la zona de contención, salvo en el proceso de activación. Las peticiones de activación no son contabilizadas.
Tráfico generado	Tráfico de Internet	Las características de dicho tráfico son las definidas en la sección 4.2.3.3
Porción del mapa	50% del mapa es para el servicio nrtPS	Significa que en la primera ronda se asignan 72 minislots a nrtPS, y en la segunda ronda se asignan 71 minislots. Este procedimiento fue explicado en la sección 4.3.1.3.
Pérdida de paquetes	No incluida	Ningún paquete es desechado, sino que permanecen en cola hasta su transmisión.

Tabla 5.2 Características del escenario A

A continuación se muestran los resultados obtenidos. En la figura 5.1 puede observarse que hasta aproximadamente 110 usuarios, el número de paquetes generados es prácticamente igual al número de paquetes recibidos. Esto nos indica que existe un punto, al que denominaremos *punto de saturación* de la red, después del cual la BS no puede asignar ancho de banda para satisfacer inmediatamente a las peticiones de las diferentes SSs, por lo que los paquetes permanecen encolados en cada una de ellas, registrándose una disminución en el número de paquetes recibidos, con respecto a la tendencia observada hasta antes del punto de saturación. En esta figura, además se grafica el total de peticiones recibidas, incluyendo peticiones en reservación y en piggyback, las cuales al ser iguales al número de paquetes recibidos, nos confirma que en el evento de que la BS no pueda resolver una petición, envía ésta a una lista de peticiones pendientes y le notifica a la SS que ya no es necesario volver a enviar la petición.



Figura 5.1 Paquetes generados, recibidos y peticiones totales vs número de SSs.

A continuación se analizan las peticiones recibidas con base a su tipo. En la figura 5.2 puede observarse que las peticiones sin datos, las cuales son enviadas únicamente utilizando el slot de poleo, mantienen una tendencia creciente hasta antes del punto de saturación, a partir del cual comienzan a decrecer conforme aumenta el número de usuarios. Las peticiones en piggyback, en contraste, aumentan considerablemente a partir del punto de saturación. Esto nos permite concluir que cuando la red se encuentra saturada, la mayoría de los paquetes creados son encolados en las diferentes SS, siendo el uso de peticiones piggyback el mecanismo predominante para solicitar ancho de banda.

El hecho de que las peticiones piggyback sin fragmentar registren un aumento más rápido que las peticiones piggyback en fragmentación, nos permite comprobar que el generador de tráfico crea paquetes que en su mayoría son de tamaño pequeño y pueden ser transmitidos en un solo UL-Frame, lo cual es consistente con el modelo del Generador de Tráfico de Internet descrito en la sección 4.2.3.3.

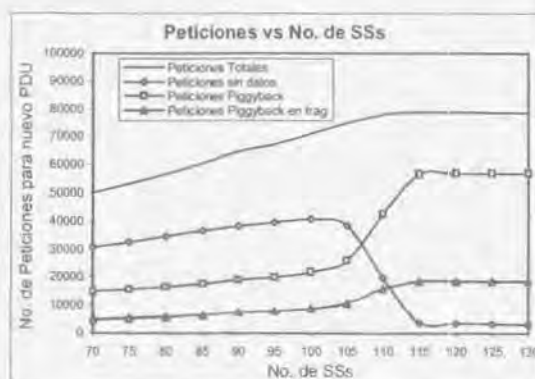


Figura 5.2 Peticiones totales, peticiones sin datos y peticiones en piggyback vs número de SSs.

Ahora analizaremos los diferentes tipos de retardos medidos. En la figura 5.3 puede observarse el End-to-End Delay (ETE Delay) como la suma algebraica de los retardos de encolamiento, poleo y grant. Como podría esperarse, el retardo de encolamiento aumenta conforme aumenta el número de usuarios, sin embargo éste aumento es aún más rápido una vez rebasando el punto de saturación. Lo anterior conlleva a que el retardo de poleo, casi constante hasta entonces, disminuya considerablemente a partir del punto de saturación, en otras palabras, cada paquete que logra salir de la cola incluye en su información la petición piggyback para el siguiente paquete, de modo que el proceso de poleo prácticamente ya no es llevado a cabo.

Por su parte el retardo de grant aumenta con el número de usuarios, y lo hace más rápidamente a partir del punto de saturación. Dado que los paquetes utilizan la misma distribución de tamaños independientemente del número de SSs, el aumento del retardo de grant se debe a que al aumentar la cantidad de usuarios, es posible que los paquetes que pudieran enviarse utilizando un solo UL-Frame, deban fragmentarse debido a la escasez de ancho de banda, retrasando su tiempo de llegada.

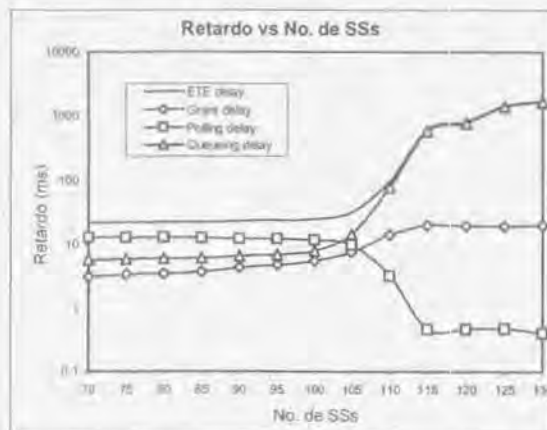


Figura 5.3 Retardo End-to-end, retardo de encolamiento, retardo de poleo y retardo de grant vs número de SSs

El throughput, o el número de bytes recibidos durante el tiempo de simulación, nos indica de forma clara el punto de saturación de la red. En la figura 5.4, puede observarse que el throughput mantiene una tendencia creciente y casi lineal hasta el punto de saturación, después del cual se estabiliza debido a las restricciones físicas del canal de radiofrecuencia.

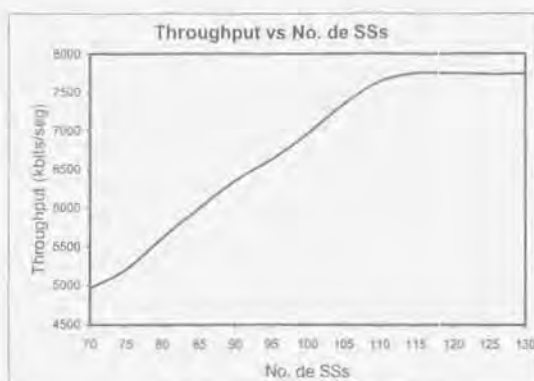


Figura 5.4 Throughput vs número de SSs

La figura 5.5 muestra la manera en la que fue designado el ancho de banda por parte de la BS. Sin importar el número de nodos, la utilización de datos o información útil ocupa la mayor parte del ancho de banda asignado, después la utilización de encabezados MAC de fragmentación y así hasta llegar, en último lugar, a la utilización de bits de relleno. En la figura 5.5 también se ve reflejada la disminución en el uso de slots de poleo debido a la saturación de la red, como se explicó en los párrafos anteriores. En esta gráfica también se incluye el conteo de peticiones sin datos, y se observa nuevamente su disminución después del punto de saturación,

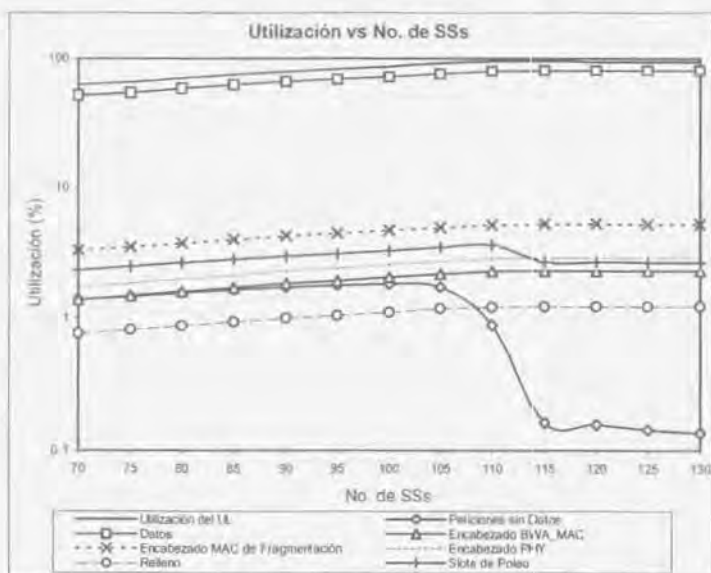


Figura 5.5 Utilización del canal de radiofrecuencia vs número de SSs

5.2.2 Escenario B

Con los resultados obtenidos en el escenario anterior observamos que el retardo ETE era grande incluso cuando no existía congestión en la red. Después de un análisis de los resultados notamos que el retardo más significativo era el de poleo. Así que el objetivo de este escenario es disminuir el retardo de poleo, con el fin de reducir el tiempo en el que el usuario hace su petición de ancho de banda.

Este escenario está configurado de manera similar que el anterior (ver Tabla 5.2), excepto por las peticiones en contención que si son permitidas. Las peticiones en contención se permiten cuando un usuario no ha recibido el slot de poleo en 5 mapas. Es decir, si un usuario genera un paquete cuando su cola de servicio estaba vacía, dicho usuario esperará 5 mapas el slot de poleo y en caso de no detectarlo programará una petición en contención para solicitar el ancho de banda necesario. Los resultados de este escenario se muestran a continuación así como también los beneficios obtenidos al implementar esta técnica.

En la figura 5.6 se observa que el número de peticiones de ancho de banda sin datos, realizadas durante cada simulación, aumenta conforme aumenta el número de SSS hasta el punto en el que se satura el canal, después las peticiones de ancho de banda son en su mayoría piggyback. En dicha figura también se muestra el número de peticiones en poleo y en contención, siendo mucho mayor las de contención. Lo cual indica que el slot de poleo tardaba más de cinco mapas en ser recibido. Esto permite que las SSS dispongan de más slots de reservación para transmitir datos lo cual se verá más adelante.



Figura 5.6 Peticiones de Ancho de Banda en Contención y en Poleo.

Ahora veremos cual es el comportamiento del retardo de los paquetes después de permitir las peticiones de ancho de banda en contención. En este análisis solamente veremos el comportamiento del retardo de poleo y cual es el efecto sobre el retardo ETE. Como se puede observar en la figura 5.7 el retardo de poleo para este escenario es mucho menor que en el escenario A, esto como ya se menciona anteriormente es

debido a que se realizan peticiones en contención para disminuir el tiempo en el que la BS le concede los slots de reservación para que la SS pueda transmitir dicho paquete. Con esta técnica se logra reducir el retardo de poleo en casi un 80% lo que influye considerablemente en el retardo ETE. En la figura 5.8 se presentan los retardos ETE del escenario A y B, y como se esperaba el retardo ETE del escenario A es mayor que el del escenario B, con esto verificamos que esta técnica es muy eficiente si se utiliza cuando el tráfico en la red no logra saturar el canal de transmisión.



Figura 5.7 Retardo de Poleo para el Escenario A y B.

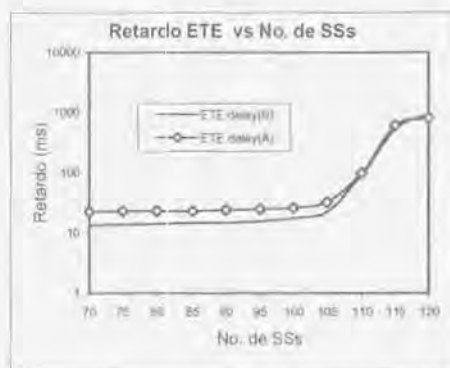


Figura 5.8 Retardo ETE para el Escenario A y B.

La tabla 5.3 presenta los valores más importantes para esta simulación, con ella se pueden comparar los retardos numéricamente ya que para el retardo ETE se utilizó una escala logarítmica. Esta tabla nos permite ver claramente que el retardo de poleo para el escenario A es casi igual que el retardo ETE en el escenario B. Esto es un cambio considerable entre los dos escenarios. En este escenario se logró reducir el retardo ETE en casi un 40%. Aunque el servicio nrtPS es tolerante al retardo esta técnica permite que el servicio sea más eficiente y que se puedan transmitir más paquetes.

Usuarios	70	75	80	85	90	95	100	105
Retardo de Poleo (ms)								
Escenario A	13.23	13.19	13.18	13.05	12.72	12.63	12.17	10.00
Escenario B	2.69	2.654	2.554	2.497	2.467	2.258	2.049	1.662
Retardo ETE (ms)								
Escenario A	22.38	22.81	22.88	23.17	24.07	24.74	25.97	32.48
Escenario B	13.44	13.65	13.99	14.57	14.90	15.66	17.40	22.35

Tabla 5.3 Retardos de Poleo y ETE.

Para concluir con el análisis de este escenario se hará una comparación entre el throughput y la utilización del escenario A y B. Como se observa en la figura 5.9 el escenario B presenta un throughput muy parecido al del primer escenario, aunque ligeramente mayor. El hecho de que el throughput sea mayor en este escenario nos confirma que debido a las peticiones en contención se logró recibir una mayor

cantidad de bits durante la simulación. En el caso de la utilización, la figura 5.10 muestra un comportamiento lineal ascendente hasta el punto de saturación en el cual se estabiliza, indicando que el canal de transmisión está a su máxima capacidad. La utilización de este escenario es, al igual que el throughput, ligeramente mayor debido a que se utilizan los slots de la zona de contención. Dado que solo se utilizan los slots de contención cuando han pasado más de cinco mapas, la utilización no puede ser del 100% ya que al saturarse la red, predominan las peticiones piggyback, ocasionando que se desperdicien los 7 slots de contención por mapa. Lo anterior equivale a casi un 4.5% de la utilización del canal.



Figura 5.9 Throughput. Escenario A y B.



Figura 5.10 Utilización del canal de subida. Escenario A y B.

5.2.3 Escenario C

Descripción. En este escenario se utiliza al servicio nrtPS para el transporte de tráfico con paquetes de tamaño constante. La siguiente tabla contiene los atributos configurados en el nodo generador de tráfico:

Atributo	Valor
Distribución del periodo de inactividad	
off-period_distribution	Exponencial
mean_off_time	100 mseg
Distribución del periodo de actividad	
on-period_distribution	Constante
mean_on_time	500 seg
Distribución de las llegadas de los frames o paquetes	
on_period_arrival_distribution	Exponencial
mean_interarrival_time	188 mseg
Distribución del tamaño de los paquetes	
packet_distribution	Constante
mean_packet_size	1500 bytes

Tabla 5.4 Características del tráfico utilizado en el escenario de simulación C.

De la tabla 5.4 podemos observar que los paquetes de tamaño constante serán generados utilizando una distribución exponencial con media igual a 188 milisegundos, consiguiendo con esto que cada nodo genere tráfico a una tasa promedio de 64 kbps en la capa Ethernet MAC.

Las características restantes del escenario C son idénticas a las mostradas en la tabla 5.2, con la única excepción de que el tipo de tráfico generado ya no es de tipo Internet, sino que su comportamiento se encuentra regido por los parámetros mostrados en la tabla 5.4.

A continuación se analizarán los resultados obtenidos de la simulación.

En la figura 5.11 puede observarse la tendencia lineal creciente que existe en la gráfica de paquetes generados y paquetes recibidos. En el caso de éstos últimos, la curva muestra un cambio de tendencia que puede observarse a partir del punto de saturación. En este punto (con 130 usuarios activos) el canal de transmisión alcanza su máxima capacidad y los paquetes generados en la SS no logran llegar en su totalidad a la BS. De manera similar al escenario A, se comprueba que las peticiones contabilizadas son prácticamente iguales a los paquetes recibidos, indicando que los paquetes restantes se mantuvieron en cola y no consiguieron enviar su petición.

Las variaciones en el tiempo de creación entre los paquetes, resultado de utilizar una distribución exponencial, se manifiestan en la gráfica como pequeñas oscilaciones.

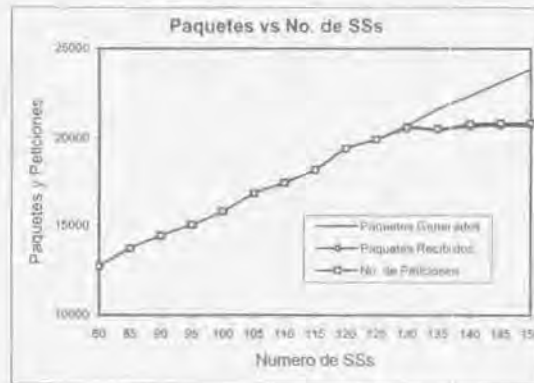


Figura 5.11 Paquetes generados, recibidos y peticiones totales vs número de SSs.

A continuación se muestra en la figura 5.12 el comportamiento de las peticiones en poleo (o peticiones sin datos) y las peticiones piggyback. De inmediato puede notarse la total ausencia del uso de peticiones piggyback sin fragmentar, resultado de utilizar paquetes de longitud relativamente grande y que no pudieron ser transmitidos en un solo UL-Frame. En el intervalo comprendido entre los 125 y 130 usuarios, se registra un decremento e incremento drásticos en las peticiones de poleo y piggyback en fragmentación, respectivamente. Esto indica que al llegar al punto de saturación, la cantidad de paquetes encolados es tal que la mayor parte de las peticiones se

insertan con los datos, y el poleo comienza a desaparecer. Dada la ausencia de peticiones en piggyback sin fragmentar y al comportamiento constante de las peticiones totales, se puede concluir que al aumentar las peticiones de piggyback en fragmentación, las peticiones en poleo disminuyen de forma proporcional, a partir del punto de saturación.



Figura 5.12 Peticiones totales, peticiones con datos y peticiones en piggyback vs número de SSs.

En la figura 5.13 se grafica el número de SSs contra los diferentes tipos de retardos en escala logarítmica. Para 125 usuarios, los retardos de encolamiento y de grant comienzan a dispararse, mientras que a los 130 usuarios se registra un máximo local (o pico) en ambos retardos. Posteriormente, a partir de 135 usuarios, la tendencia creciente en el retardo de encolamiento es más notoria hasta llegar a un máximo total en 145 usuarios para el retardo de encolamiento, mientras que el retardo de grant consigue estabilizarse.

Estas oscilaciones, más marcadas en el retardo de encolamiento, son consecuencia directa del uso de una distribución exponencial para el tiempo de creación entre paquetes. Por otro lado, la estabilidad que se logra tener en el retardo de grant se deriva del uso de una distribución constante para el tamaño de los paquetes.

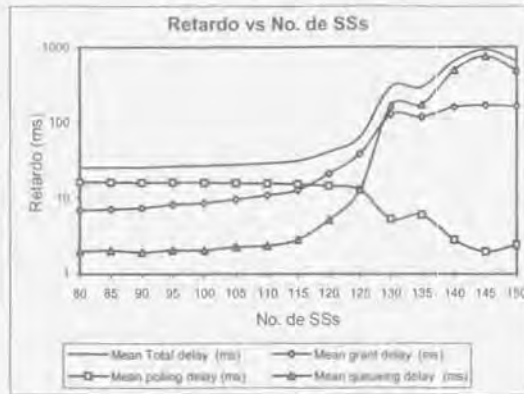


Figura 5.13 Retardo End-to-end, retardo de encolamiento, retardo de poleo y retardo de grant vs número de SSs

Así mismo la gráfica de la utilización del canal, mostrada en la figura 5.14, nos muestra una tendencia creciente y casi lineal hasta aproximadamente 125 usuarios, después de los cuales el canal comienza a saturarse, estabilizándose el comportamiento de la utilización con un valor de aproximadamente 95%. El 5% del ancho de banda no utilizado, corresponde al espacio ocupado por los slots de contención, que como se mencionó anteriormente no fueron utilizados en este escenario.



Figura 5.14 Utilización del canal de radiofrecuencia vs número de SSs

5.2.4 Escenario de Tráfico Mixto

En este escenario se analizará el comportamiento de los cuatro tipos de calidad de servicio (UGS, rtPS, nrtPS y BE) implementados en el modelo de simulación. A fin de tener un adecuado funcionamiento, cada servicio utiliza los recursos de la red en base a las características del tráfico que transporta. Teniendo esto en cuenta, la asignación del ancho de banda para cada servicio se realizó como se muestra en la tabla 5.5.

Servicio	Porcentaje del canal de subida	Slots por mapa
UGS	36.4	52
rtP	30	43
nrtP	23.8	34
BE	Lo que resta, mínimo 9.8	Los que restan, mínimo 14

Tabla 5.5 Asignación del Ancho de Banda

Dado que este escenario contiene varios tipos de tráfico, se procedió a construir una red de 200 nodos conformada por grupos de 5 nodos. Cada grupo contiene un usuario para los servicios UGS, rtPS, nrtPS y dos para el servicio BE. Las características del tipo de tráfico, así como la forma en la que éste será tratado por la BS son explicadas a continuación.

Servicio UGS.

El tráfico de Voz sobre IP transportado en este servicio, se genera usando el códec G711, el cual produce una tasa de transmisión aproximada de 116 kbps en la capa Ethernet-MAC. Considerando que se trata de un servicio en tiempo real, los paquetes con un retardo mayor a 10 ms son eliminados desde la SS, es decir, los paquetes pueden enviarse como máximo 10 ms después de que fueron creados.

A fin de mantener la Calidad de Servicio, la BS solo permite un máximo de 20 usuarios activos, ya que para un número mayor de usuarios el ancho de banda asignado al servicio es insuficiente, por lo que la pérdida de paquetes aumenta considerablemente perjudicando el servicio.

Servicio rtPS.

Este servicio utiliza un generador de video sobre demanda (VoD) en formato MPEG, el cual produce una tasa de 70kbps en la capa Ethernet-MAC. De forma similar a UGS, los paquetes con un retardo mayor a 1 segundo son eliminados. El poleo para este servicio es realizado con un periodo de 10 ms.

Servicio nrtPS.

El generador de tráfico para este servicio produce paquetes de 1024 bytes de tamaño constante, con un tiempo de arribo que sigue una distribución exponencial cuya media es de 117ms, originando una tasa de transmisión de 70kbps en la capa Ethernet-MAC. El poleo en este servicio se realiza cada 40ms y no se permiten peticiones en contención. Dado que este servicio es más tolerante a los retardos ningún paquete es eliminado, permitiéndoles permanecer en la cola de servicio el tiempo necesario hasta que sean atendidos.

Servicio BE

El tráfico para este servicio es de tipo Internet, con una tasa de transmisión de 70kbps en la capa Ethernet-MAC. Debido a su gran tolerancia al retardo, ninguno de los paquete es eliminado en este servicio. Dado que este servicio está diseñado para soportar tráfico que no presenta los requerimientos mínimos asociados a algún nivel de servicio, puede ser manejado en base al espacio disponible en el canal de comunicación, por eso y por que algun otro servicio puede no utilizar su ancho de banda, este servicio utiliza el ancho de banda restante.

Los resultados obtenidos para este escenario se muestran a continuación.

En la figura 5.15 se muestra el número de paquetes recibidos para cada tipo de servicio. Puede observarse que el servicio UGS transmite mayor cantidad de paquetes que los demás servicios, lo cual es razonable dado el tamaño relativamente pequeño de los mismos y considerando que éste servicio recibe una mayor porción del ancho de banda.

El tráfico rPS registra un comportamiento similar a UGS, con la diferencia de que el ancho de banda asignado es ocupado en su totalidad con aproximadamente 30 usuarios, después de los cuales la BS no permite la incorporación de usuarios adicionales. Esto se debe a que un usuario de rPS genera menos tráfico que un usuario de UGS. Por ejemplo, en un grupo de 160 usuarios, habrá 20 de UGS, 30 de rPS, 32 de nrPS, 64 de BE y 14 sin permiso de transmisión.

El servicio nrPS registra la menor cantidad de paquetes recibidos, debido a que el tiempo de arribo es considerablemente mayor en comparación con cualquiera de los otros servicios. En este caso, la BS no realiza bloqueo de usuarios una vez que el ancho de banda es saturado, sin embargo, el uso de peticiones piggyback ayuda a dar una mejor atención a los usuarios con paquetes encolados.

El servicio BE hace uso del ancho de banda desaprovechado por los demás servicios. El número de paquetes recibidos de BE comienza a disminuir una vez que los demás servicios saturan su porción de ancho de banda, limitándose a casi una décima parte del ancho de banda disponible. Se observa que al disminuir el número de paquetes recibidos por los servicios rPS y nrPS, aumentan los paquetes recibidos por el servicio BE.

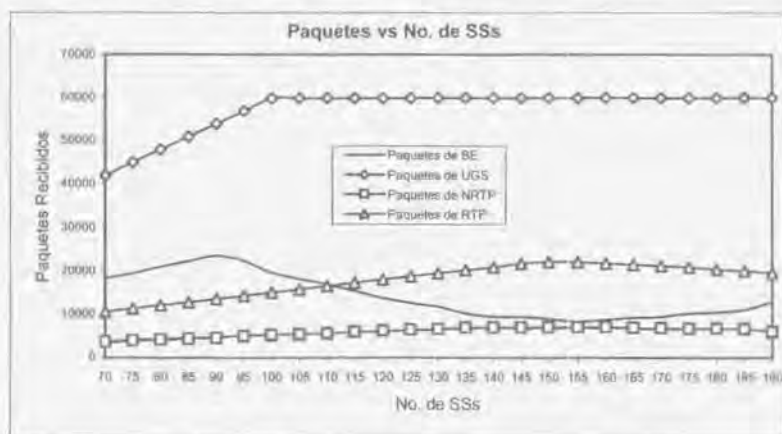


Figura 5.15 Paquetes recibidos de cada servicio.

La figura 5.16 muestra que el retardo para el servicio UGS se mantiene por debajo de los 2.5 ms, con lo cual se observa que para 20 usuarios es posible mantener la calidad de servicio ofrecida. En cuanto al retardo de BE, se observa que crece considerablemente al saturarse la red, hasta estabilizarse con un valor de aproximadamente 10 segundos. El retardo de rTPS crece al aumentar la cantidad de usuarios hasta estabilizarse con un valor de aproximadamente 1 segundo, manteniendo la calidad de servicio en cuanto al retardo permitido para el tráfico de video. Se observa que al haber poco tráfico en la red, el servicio nrtPS muestra un retardo mayor en comparación con los demás, debido al tiempo que tiene que esperar para hacer su petición de ancho de banda. Dicho retardo continúa creciendo hasta un punto de saturación, en el cual las peticiones por poleo son todavía usadas y después del cual la mayor parte de las peticiones de ancho de banda son de tipo piggyback, manifestándose una caída en el throughput como lo muestra la figura 5.17.

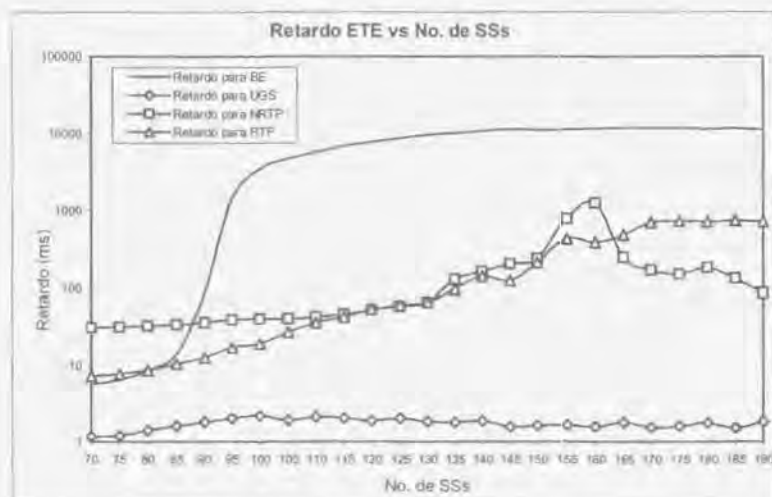


Figura 5.16 Retardo total para cada servicio.

En la figura 5.17 se observa que el throughput total aumenta linealmente hasta llegar al punto de saturación, a partir del cual consigue estabilizarse. Para este escenario el throughput alcanzado (aproximadamente de 7.2Mbps) fue menor que en los anteriores, cercano a 7.6Mbps. Esta diferencia se debe a los encabezados dado que la mayoría de los paquetes son pequeños ocasionando que disminuya la eficiencia del stack de protocolos, junto con el throughput. De esta figura también se puede observar el número de bits que se transmitió a través de cada servicio. Obviamente el servicio UGS fue el que transmitió mayor cantidad de bits, puesto que tiene mayor ancho de banda asignado y el tiempo de creación de los paquetes es muy pequeño. Para los servicios de rTPS y nrtPS el comportamiento es similar, aumentan linealmente hasta que saturan su ancho de banda estabilizándose y presentando una ligera caída al existir un exceso de usuarios. El throughput del servicio BE es similar al número de paquetes recibidos, cuando no existe congestión en la red este servicio utiliza gran parte del ancho de banda para transmitir todo lo que pueda, hay que considerar que

existen dos usuarios por cada grupo de cinco, lo que genera mucho tráfico el cual aumenta en cada simulación. Al momento en que los demás servicios saturan su ancho de banda asignado, la cantidad de bits transmitidos por este servicio disminuye considerablemente, y cuando una porción del ancho de banda es desaprovechado este lo utiliza como se observa en las últimas simulaciones.

Cabe señalar que el throughput para los servicios rPS y nrtPS es muy parecido, aunque la cantidad de paquetes recibidos para rPS es mayor que para el servicio nrtPS. De lo anterior se puede comprobar que nrtPS tuvo un tiempo de arribo mucho mayor a rPS y manejó paquetes más grandes, mientras que rPS manejó paquetes pequeños creados con mayor frecuencia.

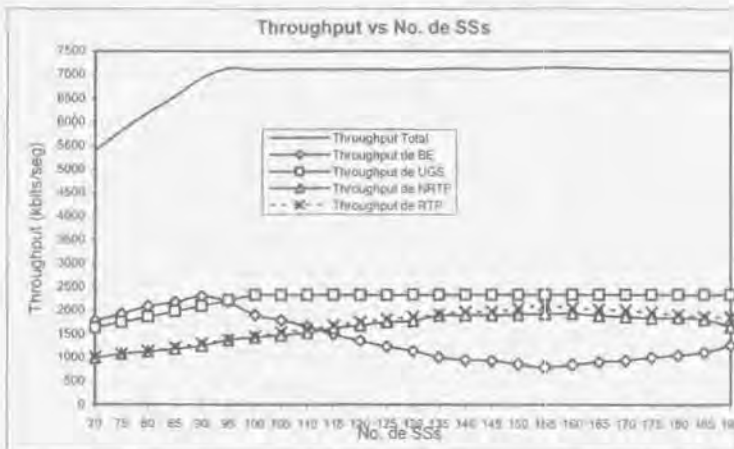


Figura 5.17 Bits recibidos durante el tiempo de simulación de cada servicio

La figura 5.18 presenta la utilización del canal de subida así como también la utilización correspondiente a cada tipo de servicio. Esta grafica aunque muy parecida a la del throughput nos proporciona información que no se puede obtener a partir de la grafica anterior. Un dato importante mostrado en esta figura es la utilización alcanzada, la cual es la mayor de los cuatro escenarios. La utilización de este escenario esta alrededor del 97%. Siendo BE el único permitido para hacer peticiones en contención, es el único que puede usar la región de contención y dado que existe una gran cantidad de usuarios de BE, los slots de contención son casi usados en su totalidad. En cuanto a la utilización correspondiente a cada servicio y como era de esperarse es prácticamente igual a la porción del ancho de banda asignada a cada servicio (ver tabla 5.5).

Al observar la figura 5.18, nos damos cuenta de que el servicio UGS es el que cuenta con el mayor porcentaje de utilización del canal, después sigue el servicio rPS con una utilización de casi el 30%, seguido por nrtPS con un 23% y finalmente BE con lo restante. Lo anterior es antes de que disminuya la utilización de rPS y nrtPS debido a un exceso de usuarios.

También puede observarse que la utilización de BE se encuentra subordinada al espacio desaprovechado por los servicios rtPS y nrPS.

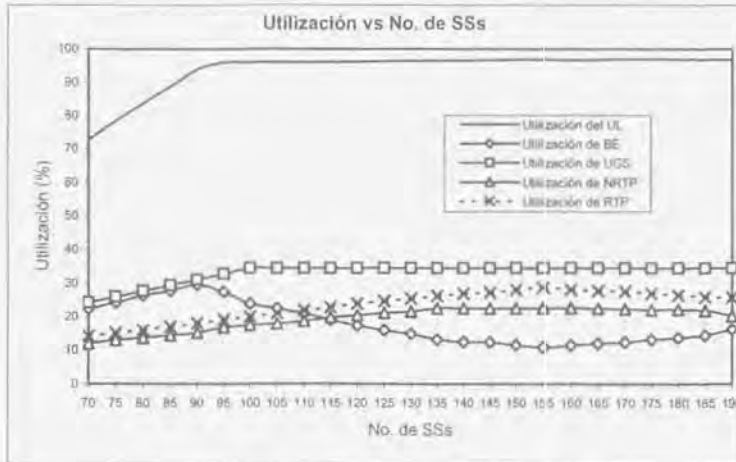


Figura 5.18 Utilización del Enlace de Subida.

En las siguientes dos gráficas se muestra el porcentaje de paquetes desechados para los servicios UGS y rtPS. En la figura 5.19 puede observarse que el porcentaje de paquetes desechados fue prácticamente despreciable, alcanzando un valor máximo de 0.1%, con lo cual se asegura que la mayor parte de los paquetes de voz llegaron a su destino.



Figura 5.19 Porcentaje de paquetes perdidos para el servicio UGS.

La figura 5.20 muestra el porcentaje de paquetes desechados por el servicio rPS. Puede observarse que el porcentaje de paquetes desechados por el servicio rPS fue mayor que el de UGS, a pesar de que el retardo permitido fue de 1 segundo. Esto es debido principalmente al tamaño variable de los paquetes de video y al proceso de poleo necesario para el envío de cada uno de ellos, el cual provoca un aumento en el tiempo de encolamiento de los paquetes.



Figura 5.20 Porcentaje de paquetes perdidos para el servicio RTP.

5.3 Conclusiones

En este escenario se presentaron diferentes resultados con los cuales conseguimos evaluar las características y el desempeño del servicio nrtPS. Los cuatro escenarios presentados nos permitieron hacer un mejor análisis sobre las técnicas utilizadas para implementar este servicio.

Con el primer escenario presentado pudimos comprobar que el servicio nrtPS es mejor que el servicio BE, ya que obtuvimos mejores resultados transportando en mismo tipo de tráfico. La ventaja más importante del servicio nrtPS fue asegurar la oportunidad de transmisión incluso cuando existe congestión en la red. El retardo ETE obtenido en condiciones de saturación también fue mucho mejor que para el servicio BE, lo cual se consiguió con ayuda de las peticiones piggyback y de la prioridad utilizada para cada paquete.

Después de observar que el servicio nrtPS era bueno en condiciones de saturación del canal, notamos que los paquetes presentaban un gran retardo cuando sobraba ancho de banda. Como se mencionó anteriormente, este retardo se debía al tiempo de poleo, por lo que en el escenario B se implementó un mecanismo que consiguió reducir el tiempo de poleo utilizando peticiones en contención, y que adicionalmente logro incrementar el throughput.

El tráfico de Internet generado en los primeros dos escenarios fue utilizado para comparar el servicio nrtPS con BE, pero en realidad nrtPS fue pensado para

transportar otro tipo de tráfico. Es por eso que en el escenario C el tráfico generado fue diferente a los ya existentes (VoIP, VoD e Internet). Este tráfico pretende ser una simulación de tráfico FTP, debido a que consiste en paquetes con tamaño y tiempo de arribo relativamente grandes. En este escenario se observó que independientemente del tráfico que transporte, el servicio nrtPS continua teniendo el mismo comportamiento.

Finalmente se creó una red en la que se integraron los cuatro tipos de servicio, con la finalidad de realizar una comparación entre cada uno de ellos. Este último escenario es de gran importancia ya que se acerca más a una verdadera red inalámbrica, en la que se transportan tráficos con diferentes características y requerimientos. En este escenario se pudo constatar que el comportamiento de cada servicio es independiente de los demás, a excepción de BE, que al no tener una porción asignada del ancho de banda, modifica su comportamiento en base al ancho de banda desperdiciado por los demás servicios.

Capítulo 6

Conclusiones

6.1 Discusiones Finales

Con base a los resultados obtenidos mediante el simulador OPNET Modeler 8.1 pueden agregarse las siguientes observaciones:

Los anteriores escenarios de simulación han considerado situaciones observadas en las redes comerciales, como son los casos de congestión de la red y el transporte de tráfico mixto. Sin embargo, es importante notar que los resultados obtenidos consideran un máximo de doscientos usuarios, por lo que solo es posible garantizar el comportamiento observado para redes con este tipo de dimensionamiento.

Por otra parte, el modelado del tipo de tráfico FTP utiliza una aproximación que no considera en su totalidad todas sus características reales. El tráfico FTP se caracteriza por contener ráfagas altamente variables, con paquetes de hasta 20 megabytes y tiempos de arribo de hasta 180 segundos, lo cual provoca que los retardos medidos presenten una alta variabilidad, dificultando el análisis de resultados. Por esta razón el tráfico FTP fue modelado de la manera descrita en el escenario 3, con lo que se consiguieron resultados satisfactorios.

6.2 Trabajo Futuro

El estudio realizado en el presente documento ofrece un punto de partida para el desarrollo de nuevos esquemas de atención basados en Calidad de Servicio. La tendencia de los mercados actuales hacia la convergencia, ha hecho de la búsqueda de nuevas y mejores técnicas de atención, una constante necesidad.

Las ventajas y desventajas observadas en el servicio nrtPS nos han proporcionado una idea más clara de la manera en la que sería posible mejorarlo. Corresponderá a estudios posteriores la implementación de nuevos mecanismos que sean sensibles al estado de la red, para que en base a ello los esquemas de poleo y de uso de peticiones en contención, puedan ser modificados a fin de aumentar la eficiencia del servicio y de mejorar su desempeño.

Por otra parte, es importante conocer el comportamiento de otros tipos de tráfico que también podrían ser enviados utilizando el servicio nrtPS, entre los que destacan las aplicaciones para juegos en línea. Para ello podría obtenerse experimentalmente el modelado del tráfico, además de considerarse diferentes parámetros para el uso de peticiones en reservación, en contención o en piggyback, basándose en el comportamiento de este tipo de tráfico.

Los estudios posteriores deberán considerar con más detalle los procesos realizados entre las capas 3 y 7 del modelo de referencia OSI, entre los que se encuentran principalmente el enrutamiento, la seguridad y la encriptación entre muchos otros. No obstante el presente estudio considera la adición de encabezados a partir de la capa de aplicación, es importante conocer el efecto y las complicaciones que los mencionados procesos individuales añadirían al proceso total, de ser tratados con mayor profundidad.

6.3 Contribuciones

El presente proyecto ofrece un punto de referencia para el estudio de las redes BWA, debido a que su objetivo principal ha sido la incorporación del servicio nrtPS, adicionalmente a los servicios UGS, rtPS y BE que se encontraban previamente implementados, con base a lo definido en el estándar IEEE 802.16. Esta integración nos permite por lo tanto profundizar en nuestro conocimiento sobre las redes BWA, planteando a su vez nuevos retos a realizar para su mejoramiento.

El servicio implementado integra características como el poleo periódico usado en rtPS, y el uso de peticiones piggyback y en contención utilizadas por el servicio BE. Esta integración ha permitido la formación de un servicio más completo y con mejor desempeño que BE, cuando se trata de transportar tráfico de Internet o de aplicaciones como FTP, garantizando un mejor servicio en situaciones de congestión de la red.

El hecho de contar con un modelo de simulación ofrece numerosas ventajas a los proveedores de servicios WiMAX, debido a que esto permite predecir con un grado adecuado de exactitud el comportamiento que tendría una red al variar diversos parámetros de interés, tales como la distancia entre la BS y las SSSs, el número de usuarios, tipo de tráfico, bloqueo de usuarios, el impacto del uso de encabezados y diferentes mecanismos de petición de ancho de banda, entre otros.

6.4 Conclusiones Finales

El estudio realizado nos proporciona elementos que permiten considerar a las redes WiMAX como una eficaz alternativa a las anteriores tecnologías alámbricas de banda ancha, dado que permite ofrecer conectividad de última milla con la capacidad de soportar el creciente número de usuarios y aplicaciones.

Basados en los resultados obtenidos, podemos concluir que el objetivo planteado al comienzo de este trabajo ha sido cumplido de manera satisfactoria, logrando un avance dentro del trabajo a realizar hasta llegar a cubrir todos los aspectos planteados en el estándar IEEE 802.16.

Finalmente, es posible decir que el presente trabajo nos ha brindado un conocimiento más amplio acerca una tecnología que se perfila como una de las principales soluciones a utilizar en las comunicaciones de un futuro cercano.

Referencias

- [1] "IEEE Standard for Local and metropolitan area networks, Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems", IEEE, June 2004.
- [2] Carl Eklund, Roger B. Marks, Kenneth L. Stanwood, Stanley Wang, "IEEE Standard 802.16: A Technical Overview of the WirelessMAN™ Air Interface for Broadband Wireless Access", IEEE Communications Magazine, June 2002.
- [3] "Mobile WiMAX – Part 1: A Technical Overview and Performance Evaluation", WiMAX Forum, August 2006.
- [4] V. Rangel, J. Gómez, J. Ortiz, "Performance Analysis of QoS Scheduling in Broadband IEEE 802.16 Based Networks", Laboratorio de Investigación de Redes Inalámbricas, UNAM, 2006.
- [5] V. Paxson, "Empirically-Derived Analytic Models of Wide-Area TCP Connections", IEEE/ACM Transactions on Networking, August 1994.
- [6] Whitehead Philip, "Broadband Wireless Access (BWA) System Overview (first draft)", IEEE 802.16 Broadband Wireless Access Working Group, 24 December 1999. (IEEE 802.16cc-99/37)
- [7] P. Guillemette, E. Wibowo, "MAC Protocol Proposal for Fixed Networks Based on DOCSIS", IEEE 802.16 Broadband Wireless Access Working Group, 29 October 1999. (IEEE 802.16mc-99/13)
- [8] Seiichi Sampei, "Applications of Digital Wireless Technologies to Global Wireless Communications", Prentice Hall, 1997
- [9] William K. Wong, Helen Tang, Shanzeng Guo, Victor C. M. Leung, "Scheduling Algorithm in a Point-to-Multipoint Broadband Wireless Access Network", Vehicular Technology Conference, IEEE, October 2003.
- [10] S. Sezer, E. Garcia-Palacios, C. Toal, S. Dawson, "Architecture and Implementation of a novel Tag Computation Circuit for Broadband Wireless Access Packet Scheduling", IEEE International Conference on Communications, June 2004.
- [11] Cable Television Laboratories, Inc., "Data Over Cable Service Interface Specifications DOCSIS 3.0", 2006.
- [12] Mukta Kar, Greg White, "DOCSIS 2.0 - The Next Revolution in Cable Modem Technology", International Conference on Consumer Electronics, IEEE, 2002.

Websites

[13] International Engineering Consortium
<http://www.iec.org/online/tutorials/gsm/>

[14] 3rd Generation Partnership Project (3GPP)
<http://www.3gpp.org/specs/specs.htm>

[15] Cable Labs
<http://www.cablernodem.com/>

[16] GSM World
<http://www.gsmworld.com/>

[17] CDMA Development Group (CDG)
<http://www.cdg.org/technology/3g.asp>

[18] LMDS Wireless
<http://www.lmdswireless.com/page.php?id=2>

[19] Association for Computing Machinery
<http://www.acm.org/crossroads/espanol/xrds7-2/cellular.html>

Apéndice A

GLOSARIO

Data Grant Burst. Es un tipo de elemento de información (IE) que proporciona a la SS una oportunidad para transmitir uno o más PDUs. Estos elementos de información son enviados ya sea como respuesta a la petición de una estación, o debido a políticas administrativas.

Burst Profile. El perfil de ráfaga es un conjunto de parámetros que describe las propiedades de los flujos de información de subida o bajada. Cada perfil es identificado por un código (Interval Usage Code) y contiene parámetros tales como el tipo de modulación, el tipo de método de corrección de errores (FEC), longitud de preámbulos, tiempos de guarda, etc.

Payload. Este término se usa para designar a la parte de un paquete que contiene la información útil que se desea transmitir, sin incluir los encabezados que son agregados en el procesamiento de alguna de las capas del estándar.

Traffic Priority. El valor de este parámetro especifica la prioridad asignada al flujo de servicio. Dados 2 flujos de servicio idénticos en todos los parámetros excepto en la prioridad, se le asignará al de mayor prioridad un menor retraso y mayor preferencia en el almacenamiento.

Maximum sustained traffic rate. Este parámetro define la tasa de información pico del servicio, expresada en bits por segundo y sin incluir encabezados de la capa MAC. Su valor solamente define un límite, más no una garantía concerniente al ancho de banda disponible.

Minimum reserved traffic rate. Este parámetro especifica la tasa mínima de datos reservada para el flujo de servicio, expresada en bits por segundo. En caso de que la SS requiera un ancho de banda inferior al valor de este parámetro, la BS podrá asignar el ancho de banda sobrante para otras aplicaciones.

Request/transmission policy. El valor de este parámetro permite especificar ciertos atributos con respecto al flujo de servicio asociado. Estos atributos incluyen opciones acerca de la formación de PDUs, los flujos de servicio de subida y restricciones acerca del tipo de *solicitud de ancho de banda*.

Tolerated jitter. Este parámetro define el máximo jitter (variación del delay) para la conexión.

Maximum latency. El valor de este parámetro especifica la latencia máxima entre la recepción de un paquete por parte de la BS (o SS) en la interfase de red, y el envío de dicho paquete a la interfase de RF. Tanto la BS como la SS no necesitan cumplir con este requerimiento, para flujos de servicio que excedan su mínima tasa de tráfico reservada (*Minimum reserved traffic rate*).

Latencia (latency). Es el periodo de tiempo en el que un *frame* es retenido en un dispositivo de red antes de ser reenviado.

Throughput. Es una medida de la cantidad de información transferida en un periodo de tiempo, usualmente expresada en kbits por segundo. El throughput es una buena medida de la capacidad de un canal de comunicaciones, ya que equivale a la tasa en la que un dispositivo o red envía o recibe información.

Conexión. Es un mapeo unidireccional entre las capas MAC (Medium Access Control) de una estación base (BS) y una estación subscriptora (SS), que tiene el propósito de transportar tráfico correspondiente a un flujo de servicio. Cada conexión posee un identificador o CID (Connection Identifier). Todo el tráfico es transportado mediante una conexión, incluso para flujos de servicio que utilizan protocolos no orientados a conexión, como el protocolo IP (Internet Protocol).

Conexión básica. Es una conexión establecida durante el proceso de ranking inicial de una estación subscriptora (SS), utilizada para enviar mensajes administrativos MAC (Medium Access Control), que no son tolerantes al delay.

Identificador de Conexión (CID). Es un valor de 16 bits que relaciona una conexión con las entidades equivalentes en la capa MAC de la estación base (BS) y de la estación subscriptora (SS). El CID mapea a un identificador de flujo de servicio (Service Flow Identifier o SFID), que define los parámetros de calidad de servicio, que dicho flujo tiene con la conexión en cuestión.

Frame. Es una secuencia de datos estructurada y de duración fija, usada por algunas especificaciones de la capa física (PHY). Un frame puede contener tanto un subframe de subida como un subframe de bajada.

Minislot. Es una unidad designada para la ubicación de ancho de banda en el canal de subida, equivalente a n slots físicos (PSS), donde $n = 2^m$ y m es un entero en el rango de 0 a 7.

Slot Físico o PS (Physical Slot). Es una unidad de tiempo, que depende de las especificaciones de la capa física, para asignar ancho de banda.

PDU (Protocol Data Unit). Es una unidad de datos intercambiada entre entidades semejantes dentro de la capa de un protocolo. En la dirección descendente, es la unidad de datos que se envía a la capa inferior, después de su procesamiento en la capa actual. En la dirección ascendente, es la unidad de datos que se recibe de la capa inferior, y que debe procesarse en la capa actual antes de enviarse a la capa superior (ver figura A.1).

SDU (Service Data Unit). Es la unidad de datos intercambiada entre dos capas de protocolo adyacentes. En la dirección descendente, es la unidad de datos recibida de la capa inmediata superior. En la dirección ascendente, es la unidad de datos enviada a la capa inmediata superior (ver figura A.1).

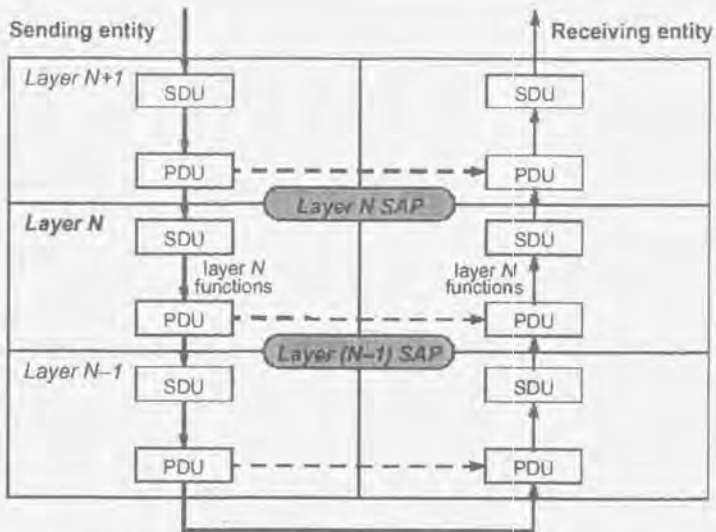


Figura A.1 Las unidades PDU y SDU en un stack de protocolos.

TTG (Transmit/receive Transition Gap). Es un espacio ubicado entre la ráfaga de bajada y la subsiguiente ráfaga de subida, dentro de un esquema de duplexión TDD. Este espacio le proporciona tiempo a la estación base (BS) para cambiar de modo de transmisión a modo de recepción y a la estación subscriptora para realizar la operación contraria. No es aplicable a sistemas FDD.

ACRONIMOS

AK	authorization key
ARP	address resolution protocol
ARQ	automatic repeat request
ATDD	adaptive time division duplexing
ATM	asynchronous transfer mode
BCC	block convolutional code
BE	best effort
BNI	base station network interface
BR	bandwidth request
BS	base station
BTC	block turbo code
BWA	broadband wireless access

C/(I+N)	carrier-to/(interference plus noise) ratio
C/I	carrier-to-interference ratio
C/N	carrier-to-noise ratio
CA	certification authority
CBC	cipher block chaining
CC	confirmation code
CCS	common channel signaling
CCV	clock comparison value
CEPT	European Conference of Postal and Telecommunications Administrations
CG	continuous grant
ChID	Channel Identifier
CID	Connection Identifier
CLP	Cell Loss Priority
CPS	common part sublayer
CRC	cyclic redundancy check
CS	convergence sublayer
DAMA	demand assigned multiple access
DCD	Downlink Channel Descriptor
DES	data encryption standard
DHCP	dynamic host configuration protocol
DIUC	Downlink Interval Usage Code
DL	downlink
DSA	dynamic service addition
DSC	dynamic service change
DSCP	differentiated services codepoint
DSD	dynamic service deletion
DSx	dynamic service addition, change, or deletion
EC	encryption control
ECB	electronic code book
EDE	encrypt-decrypt-encrypt
EIRP	effective isotropic radiated power
EKS	encryption key sequence
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
EUI	extended unique identifier
EVM	error vector magnitude
FC	fragmentation control
FDD	Frequency division duplex
FEC	forward error correction
FIPS	Federal Information Processing Standard
FSH	fragmentation subheader
FSN	fragment sequence number
GF	Galois field
GM	grant management
GPC	grant per connection

GPSS	grant per subscriber station
HCS	header check sequence
HEC	header error check
HMAC	Hashed Message Authentication Code
HT	header type
IANA	Internet Assigned Numbers Authority
IE	information element
IETF	Internet Engineering Task Force
IGMP	Internet Group Management Protocol
IP	Internet Protocol
ITU	International Telecommunications Union
IUC	Interval Usage Code
IWF	interworking function
KEK	key encryption key
LAN	local area network
LFSR	linear feedback shift registers
LLC	logical link control
LMDS	local multipoint distribution service
lsb	least significant bit
LSB	least significant byte
MAC	medium access control layer
MAN	metropolitan area network
MIB	management information base
MIC	message integrity check
MMDS	multichannel multipoint distribution service
MPEG	Moving Pictures Experts Group
MPLS	multiprotocol label switching
msb	most significant bit
MSB	most significant byte
NNI	network-to-network interface (or network node interface)
nrTPS	non-real-time polling service
OID	object identifier
PBR	piggyback request
PDH	plesiochronous digital hierarchy
PDU	protocol data unit
PHS	Payload Header Suppression
PHSF	Payload Header Suppression Field
PHSI	Payload Header Suppression Index

PHSM	Payload Header Suppression Mask
PHSS	Payload Header Suppression Size
PHSV	Payload Header Suppression Valid
PHY	physical layer
PKM	privacy key management
PM	poll-me bit
PMD	physical medium dependent
ppm	parts per million
PPP	Point-to-Point Protocol
PS	physical slot
PSH	Packing Subheader
PTI	Payload Type Indicator
PVC	Permanent Virtual Circuit
QAM	quadrature amplitude modulation
QoS	Quality of Service
QPSK	quadrature phase-shift keying
RS	Reed-Solomon
RSSI	receive signal strength indicator
rTPS	real-time polling service
Rx	reception
SA	security association
SAID	security association identifier
SAP	service access point
SCTE	Society of Cable Telecommunications Engineers
SDH	Synchronous Digital Hierarchy
SDU	service data unit
SF	service flow
SFID	Service Flow Identifier
SHA	secure hash algorithm
SI	slip indicator
SNMP	Simple Network Management Protocol
SS	subscriber station
SVC	Switched Virtual Circuit
TC	transmission convergence sublayer
TCP	Transmission Control Protocol
TDD	time division duplex
TDM	time division multiplex
TDMA	time division multiple access
TEK	traffic encryption key
TFTP	Trivial File Transfer Protocol
TLV	type-length-value
Tx	transmission
UCD	Uplink Channel Descriptor

UDP	User Datagram Protocol
UGS	unsolicited grant service
UIUC	Uplink Interval Usage Code
UL	uplink
UNI	user-to-network interface
UTC	Coordinated Universal Time
VC	virtual channel
VCJ	virtual channel identifier
VLAN	virtual local area network
VP	virtual path
VPI	Virtual Path Identifier
XOR	exclusive or

Apéndice B

Código para generar tráfico FTP

```

void nrtps_pk_size_delay(void)
{
    int j; // Loop Control
    double session_size; // Session Size
    double total_connection_size; // Byte count of all connections
    double burst; // Current burst size
    int FLAG_session_full; // Session size filled with connections
    int FLAG_connection_burst[MAX_CONNECTIONS]; // Flag to signify burst connection
    double size_aux;

    FIN(nrtps_pk_size_delay());

    /***** Paso 1: Calculo del tamaño de la sesión *****/
    session_size = MAX_PACKET_SIZE;

    while(session_size >= MAX_PACKET_SIZE || session_size < MIN_Connection_SIZE)
        session_size = log2normal(mean_session,sd_session); //Tamaño en bytes del paquete

    /***** Paso 2: Generación de las conexiones en una sesión *****/
    FLAG_session_full = 0;
    number_of_connections=0;
    total_connection_size=0;
    while (!FLAG_session_full)
    {
        size_aux = log2normal(mean_connection,sd_connection);

        while(size_aux < MIN_Connection_SIZE || size_aux > MAX_Connection_SIZE)
            size_aux = log2normal(mean_connection,sd_connection);

        connection[number_of_connections] = size_aux;

        if ((total_connection_size + connection[number_of_connections]) >= session_size)
        {
            connection[number_of_connections] = session_size - total_connection_size;
            FLAG_session_full=1;
        }
        else
        {
            total_connection_size += connection[number_of_connections];
            if (number_of_connections==(MAX_CONNECTIONS-1))
            {
                FLAG_session_full=1;
                printf("\nWARNING: Session has reached the maximum of %d
connections.\n",MAX_CONNECTIONS);
                printf(" Session connections terminated prematurely.\n");
            }
            else
                number_of_connections++;
        }
    }
}

```

```

/***** Paso 3: Calculo de los Bursts *****/
for (j=0; j<=number_of_connections; j++)
    {
    FLAG_connection_burst[j]=0;
    if ((j==0)||((FLAG_connection_burst[j-1] == 0)))
        {
        burst = op_dist_outcome(op_dist_load("uniform",0,1));
        if (burst < PARETO_SPLIT)
            burst = log2normal(burst_body_mean,burst_body_sd);
        else
            burst = pareto(burst_tail_mean, burst_tail_shape);
        }
    if ((burst -> connection[j])>=0)
        FLAG_connection_burst[j]=1;
    }

/***** Paso 4: Calculo de los Delays entre conexiones *****/
for (j=0; j<=number_of_connections; j++)
    {
    if ((FLAG_connection_burst[j]==1)&&(FLAG_connection_burst[j+1]==1))
        {
        double delay_split = op_dist_outcome(op_dist_load("uniform",0,1));
        if (delay_split < burst_delay_split)
            {
            delay[j] = burst_delay_lower_min+1;
            while (delay[j] > burst_delay_lower_min)
                delay[j] = op_dist_exponential(burst_delay_upper_ave);
            }
        else
            delay[j]=op_dist_outcome(op_dist_load("uniform",burst_delay_lower_min,burst_delay_lower_max));
        }
    else
        {
        delay[j] = maximum_delay+1;
        while (delay[j] > maximum_delay)
            {
            delay[j] = normal_delay_offset + log2normal(normal_delay_ave,normal_delay_sd);
            }
        }
    if (delay[j]<0.005) // ns technically <-----
        delay[j]=0.005;
    }
}
FOUT:
}

```

Código para resolución de Peticiones

Peticiones sin datos

```

if (strcmp(hdr_format, BWA_REQ_MAC_HDR_FMT))
    {
    op_pk_nfd_get(hdr_ptr, "BR", &req_size);
    if (req_size > 0)
        {
        int type, conn_delay;
        qosMasterEntry *qm_ptr;
        qosEntryStruct *qe_ptr;
        int req_sid, pk_grant_size;
        double pk_interarrival;
        }
    }

```



```

op_pk_nfd_get(hdr_ptr, "CID", &req_sid);
if(contention_flag[req_sid-1000] == 1)
{
    contention_flag[req_sid-1000] = 0;
    contention_req++;
}
qm_ptr = master_entry_from_sid(req_sid);
if (qm_ptr != OPC_NIL && qm_ptr->serviceType == QOS_SVC_NRT_POLLING)
{
    qm_ptr->shaping->message_size_pending = req_size;
    qm_ptr->shaping->grant_required=
    compute_slots_needed(req_size,current_minislot_size,current_Long_data_FEC_codeword
    current_Long_data_FEC_parity,current_Long_data_preamble,current_Long_data_Guardband,Mac_packing);

    qm_ptr->shaping->grant_pending = 1;
    req_size = qm_ptr->shaping->grant_required;
    requests_received++;
    requests_received_for_nrtpp++;
}

```

Peticiones piggyback sin fragmentar

```

else if (tstrcmp(hdr_format, CMTS_PDU_MAC_HDR_FMT))
{
    int req_sid;
    qosMasterEntry *qm_ptr;

    op_pk_nfd_get(hdr_ptr, "EHDR_ON", &ehdr_on);
    op_pk_nfd_get(hdr_ptr, "EH_SID", &req_sid);

    if (ehdr_on == EHDR_ON)
    {
        op_pk_nfd_get(hdr_ptr, "EH_TYPE", &eh_type);
        if (eh_type == EH_TYPE_REQUEST || EH_TYPE_REQ_AND_ACK_REQED)
        {
            op_pk_nfd_get(hdr_ptr, "EH_VALUE", &req_size);

            if (req_size > 0)
            {
                qm_ptr = master_entry_from_sid(req_sid);
                if (qm_ptr->serviceType == QOS_SVC_NRT_POLLING)
                {
                    qm_ptr->shaping->message_size_pending = req_size;
                    req_size=compute_slots_needed(qm_ptr->shaping->
                    message_size_pending,current_minislot_size,current_Long_data_FEC_codeword,current_Long_data_FEC_p
                    arity,current_Long_data_preamble,current_Long_data_Guardband,Mac_packing);
                    qm_ptr->shaping->grant_required = req_size;
                    qm_ptr->shaping->grant_pending = 1;
                    piggy_req[req_sid-1000] = 1;
                    ++BS_piggy_req_for_new_PDU;
                }
            }

            printf("\n- Got PIGGY request for %d slots from SID=%d at time %f delay is %f", req_size, req_sid, time_now,
            time_now-last_time);
        }
    }

    op_pk_nfd_set(pk_ptr, "grant_delay",op_sim_time());
    op_pk_send(pk_ptr, STAT_DEST_STREAM);
}

```

Peticiones piggyback en fragmentación

```

else if (!strcmp (hd_format, CMTS_FRAG_MAC_HD_FMT))
{
    int req_sid;
    qosMasterEntry *qm_ptr;
    op_pk_nfd_get (hdr_ptr, "EH_REQ", &req_size);
    op_pk_nfd_get (hdr_ptr, "EH_SID", &req_sid);
    while (op_sar_rsmbuf_pk_count(recBuf) > 0)
    {
        pk_ptr = op_sar_rsmbuf_pk_remove(recBuf);
        op_pk_nfd_set (pk_ptr, "grant_delay", op_sim_time());
        op_pk_send (pk_ptr, STAT_DEST_STREAM);
        if (req_size > 0)
        {
            if (qm_ptr->serviceType == QOS_SVC_NRT_POLLING)
            {
                qm_ptr->shaping->message_size_pending = req_size;
                req_size=compute_slots_needed(qm_ptr->shaping->
message_size_pending,current_minislot_size,current_Long_data_FEC_codeword,current_Long_data_FEC_p
arity,current_Long_data_preamble,current_Long_data_Guardband,Mac_packing);
                qm_ptr->shaping->grant_required = req_size;
                qm_ptr->shaping->grant_pending = 1;
                piggy_req[req_sid-1000] = 1;

                printf("\n- Got PIGGY request for %d slots from SID=%d at time %f delay is %f", req_size, req_sid, time_now,
time_now-last_time);
            }
            BS_piggy_req_for_new_PDU_in_frag++;
        }
    }
}
}
}

```

Algoritmo de atención del servicio nrtPS

```

static void lev_nRTP_with_EDF_grant (lev_data *ld_ptr)
{
    qosMasterEntry *qm_ptr;
    qosEntryStruct *qe_ptr;
    int list_size, i, priority;
    int slots_available;

    FIN(lev_nRTP_with_EDF_grant());

    list_size = op_prg_list_size (masterList);
    Max_nrtP_priorities = 0;
    for (i = 0; i < list_size; i++)
    {
        qm_ptr = op_prg_list_access (masterList, i);
        if (qm_ptr->serviceType == QOS_SVC_NRT_POLLING && qm_ptr->SID <= max_active_data_voice_sid)
        {
            qe_ptr = op_prg_list_access (qosNRTPollingList, qm_ptr->listIndex);
            if (qm_ptr->shaping->click_req((void*)qm_ptr->shaping))
                printf("\n!Schedule a Polling Req Slot for the nRTP WM SID %d \n",qe_ptr->SID);
            if(piggy_req[qm_ptr->SID- 1000] == 1)
                qm_ptr->shaping->grant_priority = -nrtP_jitter + qm_ptr->shaping->state;
        }
    }

    if (nrtPS_Grants_pending == 1)
    {
        nRTP_service_index = last_nrtPS_user_granted;//lenia RTP_service_index
    }
}

```

```

    nrtPS_Grants_pending = 0;
  }
else
  nRTP_service_index = last_nrtPS_user_granted;

if (map_2nd_time == 0)
  printf("\n***New MAP (%d): nRTP_service_index %d, SID %d at %f \n", MAP_ctr+1, nRTP_service_index,
nRTP_service_index + 1001, op_sim_time());
else
  printf("\n***MAP (%d) 2nd time: nRTP_service_index %d, SID %d at %f \n", MAP_ctr+1,
nRTP_service_index, nRTP_service_index + 1001, op_sim_time());

if (map_2nd_time == 0)
  slots_available = max_slots_given_after_nrtPS - ld_ptr->num_slots;
else
  slots_available = max_slots_in_map - ld_ptr->num_slots;

for (priority = Max_nrtP_priorities; priority >= -nrtP_jitter && !lev_complete(ld_ptr, OPC_FALSE); priority--)
{
  for (i = 0; i < list_size && !lev_complete(ld_ptr, OPC_FALSE); i++)
  {
    qm_ptr = op_prg_list_access (masterList, nRTP_service_index);
    nRTP_service_index++;
    if (nRTP_service_index==list_size)
      nRTP_service_index = 0;

    if(qm_ptr->serviceType == QOS_SVC_NRT_POLLING && qm_ptr->SID <= max_active_data_voice_sid
&& qm_ptr->shaping->active_service == 1)
    {
      qe_ptr = op_prg_list_access (qosNRTPollingList, qm_ptr->listIndex);
      if (qm_ptr->shaping->grant_priority == priority)
      {
        validate_grant = 0;
        if ((qm_ptr->shaping->grant_pending == 1) && (slots_available > 2)&& (qm_ptr->shaping->
grant_required > 2))
        {
          lev_ie_add (ld_ptr, IE_TYPE_LONG_DATA_GRANT,qm_ptr->SID, qm_ptr->shaping->
grant_required, ie_list_long);
          piggy_req[qm_ptr->SID - 1000] = 0;
          ld_ptr->num_grant_ies++;
        }
        else if ((qm_ptr->shaping->last_unicast_slot_time+slot_time < op_sim_time())&&(qm_ptr->shaping->
grant_required < 2))
        {
          printf("\nA unicast tx opp is required for SID %d, ld_ptr->num_slots = %d",qm_ptr->SID, ld_ptr->
num_slots);
          lev_ie_request_prim(ld_ptr, qm_ptr->SID, 1);
          qm_ptr->shaping->grant_required = qm_ptr->shaping->grant_required-1;
          if (qm_ptr->shaping->grant_required < 0)
            qm_ptr->shaping->grant_required = 0;
        }
      }
    }
  }
if (map_2nd_time == 0)
  slots_available = max_slots_given_after_nrtPS - ld_ptr->num_slots;
else
  slots_available = max_slots_in_map - ld_ptr->num_slots;
}
}
}
FOUT;
}

```

Apéndice C

Resultados Complementarios

Esta parte presenta el contenido numerico de todas las figuras mostradas en el capítulo 5. Es decir, cada una de las tablas mostradas a continuación contiene los diferentes resultados obtenidos y presentados en cada escenario de simulación. Los resultados se encuentran en orden de aparición.

Escenario A

No. de SSs	Paquetes Generados	Paquetes Recibidos	Peticiones Totales	Peticiones sin datos	Peticiones Piggyback	Peticiones Piggyback en frag.
70	50079	50041	50048	30564	14744	4740
75	53197	53161	53166	32491	15526	5149
80	56727	56680	56688	34571	16483	5634
85	60498	60447	60456	36521	17590	6345
90	64565	64507	64514	38209	18898	7407
95	67180	67129	67142	39601	19775	7766
100	71070	71023	71034	40683	21712	8639
105	74818	74771	74780	38403	25842	10535
110	78004	77709	77789	19610	42403	15776
115	81793	78700	78813	3630	56676	18507
120	85717	78658	78776	3531	56839	18406
125	89254	78524	78621	3225	56895	18501
130	92540	78318	78448	3049	56883	18516

Tabla C.1 Paquetes y Peticiones. Escenario A.

No. de SSs	ETE delay (ms)	Grant delay (ms)	Polling delay (ms)	Queuing delay (ms)	Throughput (kbits/seg)
70	22.39	3.20	13.23	5.95	4964.94
75	22.81	3.51	13.20	6.11	5211.12
80	22.88	3.56	13.18	6.14	5617.74
85	23.17	3.81	13.06	6.31	6002.72
90	24.07	4.52	12.72	6.83	6354.98
95	24.75	4.93	12.63	7.19	6624.81
100	25.97	5.64	12.17	8.15	6960.97
105	32.49	7.77	10.00	14.72	7345.99
110	97.79	14.62	3.35	79.82	7635.45
115	619.24	20.34	0.48	598.42	7747.31
120	812.51	19.89	0.48	792.13	7746.93
125	1444.44	19.86	0.49	1424.08	7734.82
130	1705.62	20.61	0.42	1684.60	7744.03

Tabla C.2 Retardos y Throughput. Escenario A.

No. de SSs	Utilización del UL	Peticiones sin Datos	Datos	Encabezado BWA_MAC	Encabezado MAC de Fragmentación	Encabezado PHY	Re lleno	Slots de Poleo
70	62.49	1.36	51.73	1.36	3.29	1.70	0.76	2.30
75	65.76	1.44	54.29	1.46	3.47	1.83	0.81	2.45
80	70.79	1.54	58.52	1.57	3.73	1.96	0.86	2.62
85	75.64	1.62	62.54	1.68	3.98	2.11	0.93	2.78
90	80.17	1.70	66.21	1.82	4.25	2.28	0.99	2.93
95	83.62	1.76	69.03	1.90	4.43	2.38	1.03	3.08
100	87.90	1.81	72.52	2.03	4.67	2.53	1.09	3.24
105	92.62	1.71	76.53	2.15	4.94	2.69	1.16	3.45
110	95.47	0.87	79.56	2.26	5.16	2.82	1.19	3.61
115	95.15	0.16	80.74	2.28	5.24	2.86	1.20	2.66
120	95.10	0.16	80.72	2.28	5.23	2.85	1.21	2.65
125	94.91	0.14	80.59	2.28	5.22	2.85	1.20	2.62
130	95.04	0.14	80.73	2.27	5.22	2.84	1.20	2.64

Tabla C.3 Utilización Escenario A.

Escenario B

No. de SSs	Paquetes Generados	Paquetes Recibidos	No. de Peticiones	Peticiones sin datos	Peticiones en Contención	Peticiones en Poleo
70	49870	49833	49951	37137	26447	10690
75	53011	52991	53119	39332	27905	11427
80	56891	56861	57018	41694	29537	12157
85	60633	60613	60763	43864	31071	12793
90	64488	64447	64640	46567	32674	13893
95	67672	67641	67840	48077	33788	14289
100	71262	71224	71510	49269	34111	15158
105	74701	74644	75020	47413	32780	14633
110	78331	78273	78511	24124	17205	8919
115	81895	78928	79098	7340	5379	1961
120	85345	78611	78762	6548	4632	1916

Tabla C.4 Paquetes y Peticiones. Escenario B.

No. de SSs	ETE delay (ms)	Grant delay (ms)	Polling delay (ms)	Queueing delay (ms)	Throughput (kbts/seg)	Utilización del UL
70	13.45	3.23	2.69	7.52	4921.19	62.16
75	13.65	3.34	2.65	7.66	5264.49	66.48
80	14.00	3.49	2.55	7.95	5594.05	70.72
85	14.58	3.73	2.50	8.35	5993.38	75.73
90	14.90	3.80	2.47	8.63	6279.90	79.53
95	15.67	4.09	2.26	9.31	6612.73	83.73
100	17.41	4.49	2.05	10.87	7027.22	88.88
105	22.36	5.63	1.66	15.06	7387.12	93.25
110	91.13	12.74	1.08	77.31	7721.62	95.65
115	524.08	13.92	0.36	509.80	7771.02	95.35
120	907.65	13.14	0.27	894.24	7700.93	94.55

Tabla C.5 Retardos, Throughput y Utilización. Escenario B.

Escenario C

No. de SSs	Paquetes Generados	Paquetes Recibidos	No. de Peticiones	Peticiones sin datos	Peticiones Piggyback	Peticiones Piggyback en frag.
80	12743	12731	12734	11137	0	1597
85	13754	13744	13747	12004	0	1743
90	14462	14449	14451	12685	0	1766
95	15078	15070	15071	13172	0	1899
100	15830	15818	15821	13852	0	1969
105	16841	16827	16832	14549	0	2283
110	17460	17446	17449	15069	0	2380
115	18193	18173	18182	15475	0	2707
120	19394	19340	19375	15698	0	3677
125	19939	19913	19922	14448	0	5474
130	20689	20511	20592	6247	0	14345
135	21632	20479	20516	6995	0	13521
140	22358	20658	20787	3325	0	17462
145	23111	20687	20826	2504	0	18322
150	23855	20700	20837	2872	0	17965

Tabla C.6 Paquetes y Peticiones. Escenario C.

No. de SSs	ETE delay (ms)	Grant delay (ms)	Polling delay (ms)	Queueing delay (ms)	Throughput (kbts/seg)	Utilización del UL
80	25.30	6.99	16.31	2.00	5092.40	60.53
85	25.49	7.17	16.26	2.06	5497.60	65.32
90	25.43	7.43	16.06	1.94	5779.60	68.72
95	26.38	8.25	16.07	2.06	6028.00	71.74
100	26.72	8.63	16.03	2.06	6327.20	75.33
105	27.60	9.64	15.69	2.27	6730.80	80.11
110	28.92	10.90	15.66	2.36	6978.40	83.13
115	30.90	12.77	15.28	2.86	7269.20	86.62
120	40.61	21.05	14.39	5.17	7736.00	92.05
125	64.40	38.58	12.80	13.02	7965.20	94.58
130	300.48	127.84	5.31	167.31	8204.40	95.18
135	296.71	117.97	6.02	172.71	8191.60	95.27
140	655.00	157.95	2.81	494.23	8263.20	95.15
145	925.01	166.87	1.97	756.17	8274.80	95.09
150	658.50	162.36	2.44	493.70	8280.00	95.16

Tabla C.7 Retardos, Throughput y Utilización. Escenario C.

Escenario Tráfico Mixto

No. de SSs	Paquetes Recibidos				Retardo ETE (ms)			
	BE	UGS	NRTP	RTP	BE	UGS	NRTP	RTP
70	18220	41861	3613	10476	5.71	1.19	31.17	7.28
75	19333	44845	3928	11223	6.55	1.22	32.20	7.72
80	20852	47841	4108	11972	8.65	1.44	33.50	8.66
85	22223	50836	4326	12721	14.32	1.65	34.57	10.53
90	23421	53814	4563	13470	88.85	1.64	36.36	12.72
95	22213	56795	5017	14219	1461.33	2.07	40.14	17.52
100	19569	59788	5240	14966	3493.34	2.25	40.94	19.64
105	18113	59806	5378	15715	4794.73	1.97	40.83	27.42
110	16858	59811	5603	16463	5741.69	2.13	43.88	36.98
115	15322	59824	5933	17201	6925.26	2.06	47.03	43.69
120	13689	59843	6159	17958	7760.12	1.93	53.59	55.00
125	12572	59852	6405	18695	8837.67	2.06	59.58	61.35
130	11768	59866	6522	19440	9640.12	1.89	67.78	68.21
135	10164	59868	6928	20142	10302.29	1.85	131.12	99.94
140	9481	59867	6946	20826	10801.65	1.90	166.03	145.84
145	9404	59894	6947	21682	11389.31	1.62	211.00	128.16
150	8917	59904	6990	22127	11233.43	1.68	241.99	217.41
155	8288	59872	7050	22079	11532.43	1.71	797.08	440.78
160	8752	59921	7062	21732	11684.73	1.60	1270.04	396.60
165	9208	59906	6905	21455	11859.99	1.85	253.52	494.92
170	9470	59887	6828	21163	11841.46	1.57	472.24	711.15
175	10203	59881	6712	20873	11833.77	1.63	154.41	735.38
180	10486	59912	6748	20318	11542.30	1.79	184.99	723.02
185	11075	59948	6613	19966	11603.37	1.56	134.02	758.83
190	12837	59875	6074	19520	11186.35	1.87	88.73	726.50

Tabla C.8 Paquetes Recibidos y Retardos. Escenario Final.

No. de SSs	Throughput (kbits/seg)					del UL	Utilización (%)				
	Total	BE	UGS	NRTP	RTP		BE	UGS	NRTP	RTP	
70	5395.93	1778.69	1629.79	986.59	1000.86	72.78	22.34	24.19	12.04	14.21	
75	5818.79	1927.47	1745.97	1072.61	1072.74	78.46	24.21	25.91	13.12	15.22	
80	6199.08	2086.33	1862.61	1121.76	1128.38	83.74	26.34	27.64	13.74	16.01	
85	6545.78	2174.98	1979.21	1181.29	1210.30	88.72	27.77	29.37	14.50	17.07	
90	6936.18	2302.80	2095.16	1246.00	1292.22	94.02	29.54	31.09	15.30	18.09	
95	7142.44	2187.11	2211.22	1369.98	1374.14	96.03	27.33	32.80	16.79	19.11	
100	7110.57	1905.90	2327.75	1430.87	1446.05	95.99	23.92	34.51	17.52	20.04	
105	7114.91	1789.95	2328.45	1468.55	1527.96	96.03	22.51	34.50	17.98	21.04	
110	7117.91	1659.37	2328.64	1529.99	1599.91	96.10	20.98	34.49	18.72	21.92	
115	7110.77	1490.11	2329.15	1620.10	1671.40	96.15	19.02	34.49	19.79	22.85	
120	7118.66	1353.31	2329.89	1681.82	1753.65	96.23	17.37	34.50	20.47	23.89	
125	7116.40	1228.43	2330.24	1748.99	1808.74	96.36	15.95	34.51	21.24	24.67	
130	7113.15	1137.27	2330.78	1780.94	1864.16	96.43	14.89	34.52	21.57	25.45	
135	7132.73	992.99	2330.86	1891.81	1917.07	96.51	13.21	34.52	22.57	26.21	
140	7136.77	940.25	2330.82	1896.72	1968.98	96.64	12.59	34.52	22.58	26.94	
145	7126.12	925.52	2331.87	1896.99	1971.74	96.69	12.43	34.53	22.52	27.20	
150	7131.80	852.55	2332.26	1908.74	2038.25	96.82	11.62	34.54	22.62	28.04	
155	7158.85	793.25	2331.02	1925.12	2109.46	96.91	10.94	34.52	22.66	28.79	
160	7149.59	841.41	2332.92	1928.40	2046.86	96.80	11.48	34.55	22.67	28.09	
165	7133.88	899.40	2332.34	1885.53	2016.62	96.87	12.13	34.54	22.42	27.78	
170	7129.71	931.04	2331.60	1864.50	2002.57	97.00	12.50	34.53	22.36	27.60	
175	7118.35	994.11	2331.37	1832.82	1960.05	96.96	13.24	34.53	22.09	27.10	
180	7115.10	1037.55	2332.57	1842.65	1902.32	96.88	13.74	34.54	22.18	26.42	
185	7107.32	1104.96	2333.98	1805.79	1862.60	96.87	14.50	34.56	21.90	25.91	
190	7100.22	1257.90	2331.13	1658.61	1852.58	96.86	16.30	34.52	20.28	25.76	

Tabla C.9 Throughput y Utilización. Escenario Final.

No. de SSs	G711	RTP	No. De SSs	G711	RTP
70	0	0	135	0	0.2427
75	0	0	140	0	0.4684
80	0	0	145	0	0.0783
85	0	0	150	0.0067	1.0155
90	0.0037	0	155	0.0134	2.9196
95	0	0	160	0.0200	1.9004
100	0	0	165	0.0350	2.9010
105	0.0050	0	170	0.0033	6.3543
110	0	0	175	0.0567	7.5352
115	0	0	180	0.1017	6.9561
120	0.0033	0	185	0.0267	8.4422
125	0	0	190	0.0584	7.4662
130	0	0			

Tabla C.10 Tasa de Pérdida de Paquetes.

Apéndice D

Inicialización e ingreso a la red de la SS

El proceso de inicialización e ingreso a la red se divide en las siguientes etapas:

- 1) Búsqueda del canal descendente y sincronización con la BS.
- 2) Obtención de los parámetros de transmisión.
- 3) Ranging Inicial.
- 4) Negociación de las capacidades básicas.
- 5) Autorización de la SS e intercambio de llaves.
- 6) Registro.
- 7) Establecimiento de la conectividad IP.
- 8) Se fija la hora del día.
- 9) Transferencia de parámetros operacionales
- 10) Se asignan las conexiones.



Figura D.1 Proceso de inicialización de la SS sin errores

Búsqueda del canal descendente y sincronización con la BS

Durante la inicialización o en la pérdida de señal, la SS busca algún canal en el cual se pueda comunicar con la BS. La SS cuenta con una memoria en la que almacena las características operacionales de el ultimo canal donde se realizo una transmisión exitosa, así que la SS intenta transmitir por dicho canal y si no tiene éxito comienza a buscar otro canal dentro de la banda operacional de frecuencias hasta que encuentre una señal valida en el *downlink*.

Una vez que se encontró el canal descendente, la SS debe sincronizarse con la BS para poder una comunicación correcta. Después de que se alcanza la sincronía, dada por una indicación de la capa PHY, la capa MAC debe adquirir los parámetros de control para el *downlink* y *uplink*.

Obtención de los parámetros de transmisión

Parámetros del *downlink*

Cuando la SS se ha sincronizado con la BS, comienza a procesar la información que recibe en espera de un mensaje DL-MAP. Como ya se menciona anteriormente, este mensaje contiene la información de acceso al canal descendente y es por eso que al recibir exitosamente este mensaje, la SS se sincroniza a nivel de capa MAC con la BS. La SS necesita al menos un mensaje DL-MAP para sincronizarse y se mantiene en sincronía siempre y cuando continúe recibiendo los mensajes DL-MAP y DCD para este canal.

Parámetros del *uplink*

Ya sincronizada la SS, debe esperar un mensaje UCD de la BS en el cual se indican los parámetros de transmisión para un posible canal de transmisión ascendente. Este mensaje es transmitido periódicamente para todos los canales ascendentes posibles con un direccionamiento tipo *broadcast*.

La SS determina si usa el canal ascendente descrito en el mensaje UCD. Si no puede usar dicho canal entonces la SS intentara con el siguiente canal disponible hasta que encuentre uno adecuado. Enseguida esperara por el siguiente mensaje DL-MAP y obtendrá el tiempo de sincronización, posteriormente la SS tendrá que esperar por la distribución de ancho de banda en el mapa para este canal y así poder transmitir.

La SS considerara valido el canal de transmisión actual mientras continúe recibiendo los mensajes UL-MAP y UCD. Si alguno de estos mensajes no es recibido en un intervalo de tiempo, la SS no usara el canal.

El siguiente paso es el ranging inicial, en caso de no tener éxito se seleccionara el siguiente canal ascendente.

Ranging Inicial

El proceso de ranging consiste en obtener el tiempo correcto para que las transmisiones de la SS estén alineadas a un símbolo que marque el comienzo de un minislot.

Primero, la SS debe estar sincronizada con el *downlink* y obtener las características del canal ascendente. Hecho esto la SS encontrará el intervalo inicial de mantenimiento con ayuda del mensaje UL-MAP. Cuando la oportunidad de transmisión en el intervalo de mantenimiento ocurra, la SS enviara el mensaje RNG-REQ. Una vez que la BS recibe exitosamente el mensaje, esta responderá con el mensaje RNG-RSP. En este mensaje se encuentran el CID básico y el CID primario de control, asignados a la SS.

El siguiente paso para la SS es esperar una región de mantenimiento de estación asignada a su CID básico. En esta región la SS podrá transmitir otro mensaje RNG-REQ. La BS responderá con otro mensaje RNG-RSP con información adicional para el ajuste de la sintonía y sincronía con el canal.

Este proceso se repetirá hasta que la respuesta indique un Ranging exitoso o cuando la BS aborte el ranging.

Negociación de las capacidades básicas

Después de completar el ranging, la SS informa a la BS de sus capacidades básicas transmitiendo un mensaje SBC-REQ, en dicho mensaje las capacidades de la SS se indican con un "on". La BS responde con un mensaje SBC-RSP en donde indica cuales son las capacidades comunes entre la SS y la BS.

Las capacidades de la SS se enlistan a continuación:

- Número de CIDs ascendentes que soporta.
- Parámetros físicos soportados. Tipos de moduladores y demoduladores. Tipos de código FEC ascendentes y descendentes.
- Número máximo de transacciones PKM (Control de Llaves de Privacidad), MCA (Asignación a grupos Multicast) y DSA, DSC o DSD (Adición, Modificación o Eliminación Dinámica de Servicio) en espera.
- Las propiedades para la asignación de ancho de banda por modo GPC o GPSS, además del tipo de comunicación *half-duplex* o *full-duplex*.
- La versión IP.
- El soporte del CRC a nivel MAC.
- Soporte a consultas para grupos Multicast.

Autorización de la SS e intercambio de llaves

En este proceso la BS confirma que la identificación de la SS cliente es autentica, después la BS proporciona la llave de autorización (*Authorization Key*, AK) con la que se obtiene la llave de cifrado de llave (*Key Encryption Key*, KEK) y las llaves de autenticación de mensajes. Enseguida la BS proporciona las identidades y propiedades de las asociaciones de seguridad primaria y estática con las cuales la SS esta autorizada a obtener información.

La SS comienza la autorización enviando un mensaje de autenticación de información a la BS. Inmediatamente después la SS envía un mensaje de Petición de autorización (*Authorization Request*) a la BS. Esta es una petición de una AK.

En respuesta al mensaje de solicitud de autorización, la BS valida la identificación de la SS, determina el algoritmo de encriptación y el protocolo que soportan ambas estaciones, activa una AK para la SS, la encripta con la llave publica de la SS y la envía a la SS en el mensaje de respuesta de autorización.

La BS al responder a la SS determinara si la SS solicitante esta autorizada para servicios básicos de unicast y a que servicios adicionales esta suscrito.

La SS deberá actualizar periódicamente su AK enviando la petición de autorización a la BS. El proceso de reautorización es idéntico al de autorización con la excepción de que la SS no necesita mandar el mensaje de autenticación de información.

Registro

En este proceso la SS recibe el CID secundario de control. Para esto la SS debe enviar el mensaje REG-REQ y la BS responderá con el mensaje REG-RSP en donde se incluye el CID. Cuando la SS recibe el REG-RSP la BS le indica puede comenzar a enviar tráfico a la red.

La SS puede incluir en el mensaje REG-REQ, las versiones IP que soporta en la conexión de control secundaria. Entonces la BS le indicara a la SS cual versión IP debe usar en la conexión de control secundaria. Obviamente la BS indicara una versión que soporta la SS.

Si se omite la versión IP en el mensaje REG-REQ, se considerara que solamente soporta la versión IPv4.

Establecimiento de la conectividad IP

En esta etapa la SS utiliza mecanismos DHCP (*Dynamic Host Configuration Protocol*) para obtener una dirección IP y otros parámetros necesarios para poder establecer una conexión IP. La respuesta DHCP indica el nombre de un archivo que contiene otros parámetros de configuración. El establecimiento de la conexión IP debe ser a través de la conexión de control secundaria.

Se fija la hora del día

La SS y la BS necesitan tener la fecha y hora actuales para poder registrar eventos con fines operativos en el sistema. Dado que esta información no es confidencial, el intercambio de dicha información no esta protegido.

La petición y la respuesta de ésta información se transfieren a través del protocolo UDP (*User Datagram Protocol*). El tiempo obtenido del servidor se debe combinar con el offset de tiempo recibido en la respuesta DHCP para establecer el tiempo local.

Este proceso se debe realizar en la conexión de control secundaria.

Transferencia de parámetros operacionales

Cuando la conectividad IP esta lista, la SS debe descargar el archivo de configuración de la SS usando el protocolo TFTP en la conexión de control secundaria.



Figura D.2 Estructura del archivo de configuración.

El archivo de configuración contiene tres tipos de parámetros de configuración.

- Parámetros de configuración estándar que deben estar presentes (SS MIC y marcador del final de la información).
- Parámetros de configuración estándar que pueden estar presentes (archivo de configuración para la actualización de software, control de acceso a escritura SNMP, objeto SNMP MIB, dirección IP del servidor de software y configuración de relleno).
- Parámetros de configuración del fabricante.

Se asignan las conexiones

Finalmente la BS deberá enviar un mensaje DSA-REQ a la SS para establecer las conexiones de los flujos de servicio pertenecientes a la SS. La SS responderá con el mensaje DSA-RSP.