



Universidad Nacional Autónoma de México
Facultad de Ingeniería



Análisis del Comportamiento Dinámico del Protocolo IEEE 802.16 (WiMAX)

Tesis que para obtener el título de

Ingeniero en Telecomunicaciones

presenta

Antonio Godínez González

Ingeniero en Computación

presenta

Roberto Marco Siten Salgado

Director de Tesis

Dr. Víctor Rangel Licea

Ciudad Universitaria, México, D. F.

Diciembre de 2005



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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.

*A mis padres y hermanos,
Con profundo agradecimiento y amor
Antonio Godínez*

*A mi familia y amigos que siempre me han apoyado en todo.
Muchas Gracias.
Roberto Marco Siten*

Contenido

CONTENIDO	I
LISTA DE TABLAS	VI
LISTA DE FIGURAS	VII
INTRODUCCIÓN	1
1.1. Definición del Problema	1
1.2. Modelado de Redes de Comunicaciones	3
1.2.1. Descripción de las redes BWA.....	3
1.2.2. Propuestas de redes BWA	4
1.3. Objetivos y Contribuciones	5
1.4. Estructura de la Tesis	6
ESTADO DEL ARTE DE LAS REDES DE TERCERA Y CUARTA GENERACIÓN	7
2.1. Introducción	7
2.2. Evolución de las redes de comunicaciones	7
2.2.1. La primera generación 1G	7
2.2.2. La segunda generación 2G	8
2.2.3. La generación 2.5G.....	8
2.2.4. La tercera generación 3G.....	8
2.2.4.1. Arquitectura de los Sistemas de Tercera Generación	10
2.2.4.2. Características Operacionales	11
2.2.5. La cuarta generación 4G.....	11
2.2.5.1. Mobile Multimedia Communication	11
2.3. Arquitectura de los sistemas BWA	12
2.3.1. Definición de ámbito e interfaces	13
2.3.2. Arquitectura BWA.....	14
2.3.2.1. Sistema de Radio Frecuencia	16
2.3.2.1.1. Estación Base	16
2.3.2.1.2. Equipo de las premisas del cliente.....	16
2.3.2.2. Sistema de Acceso	16
2.3.2.3. Módem de estación base	16
2.3.2.3.1. Características QoS (Calidad de Servicio) de altas prestaciones proporcionadas por el estándar DOCSIS.	17
2.3.2.3.2. Módem del suscriptor	17
2.3.2.3.3. Conexión de red del BWA	17

2.4. Tecnología Cable Módem	18
2.5. Especificación de Protocolos y Estándares de las Redes de Cable TV	19
2.6. Tecnologías Alternativas	21
2.6.1. RDSI ó ISDN	21
2.6.2. GSM	23
2.6.2.1. Subsistemas de Radio	23
2.6.3. xDSL	24
2.6.4. GPRS	24
2.6.5. UMTS	25
2.6.6. LMDS	25
2.6.7. Satélite	25
2.7. Conclusiones	26
DESCRIPCIÓN DEL PROTOCOLO DE COMUNICACIONES IEEE 802.16	27
3.1. Introducción	27
3.2. Operación del Protocolo IEEE 802.16	28
3.2.1. Direccionamiento y definición de tipo de conexiones	28
3.2.2. Formatos de los paquetes de transmisión MAC	29
3.2.3. Fragmentación, Concatenación y Empaquetamiento	30
3.2.4. Paquetes de Control MAC	31
3.2.4.1. Mensaje Descriptor de Canal Descendente (DCD)	32
3.2.4.2. Mensaje de Mapa Descendente (DL-MAP)	32
3.2.4.3. Mensaje Descriptor del Canal Ascendente (UCD)	33
3.2.4.4. Mensaje Mapa del Canal Ascendente (UL-MAP)	35
3.2.4.5. Mensaje de Solicitud de Ranging (RNG-REQ) y Respuesta de Ranging (RNG-RSP)	36
3.2.4.6. Mensaje de Solicitud de Registro (REG-REQ) y Respuesta de Registro (REG-RSP)	36
3.2.5. Servicio de programación de transmisión ascendente	36
3.2.5.1. Servicio Garantizado sin Solicitud (UGS)	37
3.2.5.2. Servicio de Propuesta en Tiempo Real (rtPS)	37
3.2.5.3. Servicio de Propuesta no en Tiempo Real (nrtPS)	37
3.2.5.4. Servicio de Mejor Esfuerzo (BE)	38
3.2.6. Mecanismos de Solicitud y Asignación de Ancho de Banda	38
3.2.6.1. Solicitudes	38
3.2.6.2. Modo de Asignación por Conexión (GPC)	39
3.2.6.3. Modo de Asignación por Estación Suscriptora (GPSS)	40
3.2.6.4. Consulta (Polling)	41
3.2.6.4.1. Consulta Unicast	41
3.2.6.4.2. Consulta Multicast o Broadcast	43
3.2.7. Resolución de Colisiones	44
3.2.8. Ingreso a la red e Inicialización	45
3.2.8.1. Búsqueda y sincronía del canal descendente	46
3.2.8.2. Obtención de parámetros del canal descendente	46
3.2.8.3. Obtención de parámetros del canal ascendente	47
3.2.8.4. Ranging inicial y ajustes automáticos	47
3.2.8.5. Negociación de capacidades básicas	47
3.2.8.6. Autorización de SS e intercambio de llaves	47
3.2.8.7. Registro	48
3.2.8.8. Establecimiento de la Conectividad IP	48
3.2.8.9. Establecimiento de la hora del día	48
3.2.8.10. Transferencia de parámetros operacionales	48

3.2.8.11. Establecimiento de conexiones	49
3.3. Conclusiones	49
DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO DE SIMULACIÓN PARA EL PROTOCOLO IEEE 802.16.....	50
4.1. Introducción.....	50
4.1.1. Especificación	50
4.1.2. Simulación y Recolección de Información	51
4.1.3. Análisis	51
4.2. Diseño de la Unidad Estación Base.....	51
4.2.1. Realización de las funciones MAC	51
4.2.1.1. HE_MAC	51
4.2.1.1.1. Init	51
4.2.1.1.2. Ranging.....	51
4.2.1.1.3. Rng_Rcvd.....	51
4.2.1.1.4. Rng_complete	51
4.2.1.1.5. Idle	51
4.2.1.1.6. Upstream.....	51
4.2.1.1.7. Downstream.	51
4.2.1.1.8. Mtn_MAP	51
4.2.1.1.9. MAP_Time.....	51
4.2.1.1.10. UCD_Time.....	51
4.2.1.1.11. Syn_Time.....	51
4.2.1.1.12. Init.....	51
4.2.1.1.13. Idle	51
4.2.1.1.14. Q_Data.....	51
4.2.1.1.15. Send_Data	51
4.2.1.1.16. TX_Busy	51
4.2.2. Transmisión y recepción punto a punto	51
4.2.2.1. From_network_cloud_rx.....	51
4.2.2.2. To_network_cloud_tx	51
4.2.2.3. To_stats_collection_tx.....	51
4.2.3. Transmisión y recepción inalámbricas.....	51
4.2.3.1. Ant_rx	51
4.2.3.2. Ant_tx.....	51
4.2.3.3. From_link_rx	51
4.2.3.4. To_link_tx	51
4.2.4. Funciones Adicionales.....	51
4.2.4.1. Rx_point.....	51
4.3. Diseño de la Unidad Estación Suscriptora.....	51
4.3.1. Generación y eliminación de paquetes de información	51
4.3.1.1. Src_type_1	51
4.3.1.1.1. Start	51
4.3.1.1.2. Create_child.....	51
4.3.1.1.3. Wait.....	51
4.3.1.1.4. Init.....	51
4.3.1.1.5. ON.....	51
4.3.1.1.6. OFF.....	51
4.3.1.2. Downstream_sink.....	51
4.3.1.2.1. Init	51
4.3.1.2.2. Wait.....	51

4.3.1.2.3. Receive	51
4.3.1.2.4. End	51
4.3.2. Realización de las funciones MAC	51
4.3.2.1. MAC	51
4.3.2.1.1. Init	51
4.3.2.1.2. Ranging	51
4.3.2.1.3. Syn_Rsp	51
4.3.2.1.4. Idle	51
4.3.2.1.5. App_Traffic	51
4.3.2.1.6. From_Downstream	51
4.3.2.1.7. Down_Data	51
4.3.2.1.8. MAP_Arrival	51
4.3.2.1.9. Syn_Arvl y UCD_Arrival	51
4.3.2.1.10. Init	51
4.3.2.1.11. Q_Empty	51
4.3.2.1.12. No_Request_Outstanding	51
4.3.2.1.13. Request_Outstanding	51
4.3.2.1.14. Tx_Opp_Pending	51
4.3.2.1.15. Collision_Resolution	51
4.3.3. Transmisión y recepción inalámbricas	51
4.3.3.1. Ant_rx	51
4.3.3.2. Ant_tx	51
4.3.3.3. From_link_rx	51
4.3.3.4. To_link_tx	51
4.4. Conclusiones	51
ANÁLISIS Y OPTIMIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DEL PROTOCOLO IEEE 802.16	51
5.1. Introducción	51
5.2. Definición de los análisis a realizar.	51
5.3. Caracterización de Tráfico y Parámetros de Configuración del Protocolo de Acceso Inalámbrico de Banda Ancha IEEE 802.16.	51
5.3.1. Tráfico de Internet	51
5.3.2. Voz sobre IP (VoIP)	51
5.3.3. Tráfico Isócrono	51
5.4. Parámetros de Simulación	51
5.5. Resultados del Comportamiento	51
5.5.1. Efectos de la variación del Packet Size en tráfico Isócrono.	51
5.5.2. Efectos de los slots de contención para transmisiones de datos.	51
5.5.3. Estudios con el EBA (Exponential Back-Off Algorithm).	51
5.5.4. QoS sobre diferentes tipos de tráfico	51
5.6. Conclusiones	51
CONCLUSIONES	51
6.1. Discusiones Finales	51

6.2. Trabajo Futuro.....	51
6.3. Contribuciones.....	51
6.4. Conclusiones Finales	51
REFERENCIAS.....	51
ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS	51
MENSAJES ADICIONALES DE LA SUBCAPA MAC	51
B.1. Mensajes de Control de Llave de Privacidad (PKM-REQ/PKM-RSP).....	51
B.2. Mensajes de Solicitud, Respuesta y Confirmación de Agregación Dinámica de Servicio (DSA-REQ, DSA-RSP, DSA-ACK).....	51
B.3. Mensajes de Solicitud, Respuesta y Confirmación de Modificación Dinámica de Servicio (DSC-REQ, DSC-RSP, DSC-ACK).....	51
B.4. Mensajes de Solicitud y Respuesta de Eliminación Dinámica de Servicio (DSD-REQ, DSD-RSP)	51
B.5. Mensajes de Solicitud y Respuesta de Asignación a Grupos Multicast de Consulta (MCA-REQ, MCA-RSP)....	51
B.6. Mensajes de Solicitud y Respuesta de Modificación del Perfil de Transmisión Descendente (DBPC-REQ, DBPC-RSP)	51
B.7. Mensaje de Comando de Reseteo (RES-CMD)	51
B.8. Mensajes de Solicitud y Respuesta de Capacidades Básicas (SBC-REQ, SBC-RSP)	51
B.9. Mensaje de Comparación de Reloj (CLK-CMP)	51
B.10. Mensaje de Finalización o Renovación de Registro (DREG-CMD).....	51
B.11. Mensaje de Recepción de DSx (DSX-RVD).....	51
B.12. Mensajes de Finalización y Respuesta de Configuración de Archivo TFTP (TFTP-CPLT, TFTP-RSP).....	51
PORCIONES DE CÓDIGO DE MODELOS OPNET.....	51
C.1. Generación del paquete Mapa en la BS	51
C.2. Establecimiento de deferencia en la SS	51
C.3. Establecimiento de QoS en un paquete en la SS	51

Lista de Tablas

TABLA 2-1: SISTEMAS DE COMUNICACIONES MÓVILES DE TERCERA GENERACIÓN.....	9
TABLA 2-2: ESTANDARIZACIÓN DE SISTEMAS DE TERCERA GENERACIÓN.....	9
TABLA 2-3: COMPARACIÓN DE SISTEMAS DE SEGUNDA Y TERCERA GENERACIÓN.....	11
TABLA 2-4: CRONOLOGÍA DE ESTÁNDARES CATV.....	19
TABLA 2-5: MCNS/DOCSIS vs DVB/DAVIC.....	20
TABLA 3-1: CAMPOS DEL ENCABEZADO MAC GENÉRICO.....	29
TABLA 3-2: VALORES POSIBLES DEL CAMPO TYPE EN EL ENCABEZADO MAC GENÉRICO.....	30
TABLA 3-3: CAMPOS DEL ENCABEZADO MAC DE SOLICITUD DE ANCHO DE BANDA.....	30
TABLA 3-4: MENSAJES DE CONTROL MAC.....	32
TABLA 3-5: CODIFICACIONES TLV DE PARÁMETROS DESCRIPTORES DEL CANAL ASCENDENTE.....	34
TABLA 3-6: CODIFICACIONES TLV DE LOS PARÁMETROS FÍSICOS DESCRIPTORES DEL CANAL ASCENDENTE.....	34
TABLA 3-7: ELEMENTOS DE INFORMACIÓN (INFORMATION ELEMENTS, IE) DE LOS MENSAJES DE CONTROL MAPA.....	35
TABLA 3-8: CARACTERÍSTICAS DE LOS SERVICIOS DE PROGRAMACIÓN EN TRANSMISIÓN ASCENDENTE.....	37
TABLA 4-1: DESCRIPCIÓN DE LOS ESTADOS DEL PROCESO BWA_WM_CHILD.....	51
TABLA 5-1: DISTRIBUCIÓN DEL TAMAÑO DE PAQUETES PARA TRÁFICO IP.....	51
TABLA 5-2: CÓDECS DE VOIP (G.711 Y G.723).....	51
TABLA 5-3: ANCHO DE BANDA EFECTIVO EN STREAMS ISÓCRONOS (KBPS).....	51
TABLA 5-4: PARÁMETROS DE SIMULACIÓN.....	51
TABLA 5-5: VALORES DE MEAN INTERARRIVAL TIME DE ACUERDO CON PACKET SIZE Y STREAM.....	51
TABLA 5-6: RELACIÓN ENTRE STEAMS Y NÚMERO MÁXIMO DE USUARIOS.....	51
TABLA 5-7: NÚMERO MÁXIMO DE NODOS SOPORTADOS POR LA RED.....	51
TABLA 5-8: NÚMERO MÁXIMO DE NODOS SOPORTADOS POR LA RED, PIGGYBACK HABILITADO.....	51
TABLA 5-9: PRIORIDADES EDF-BWA.....	51

Lista de Figuras

FIGURA 1-1: RED DE ACCESO INALÁMBRICO DE BANDA ANCHA.....	3
FIGURA 1-2: REGIONES DE OPERACIÓN DEL CANAL UPLINK.....	4
FIGURA 2-1: RED MULTI-FUNCIONAL.....	10
FIGURA 2-2: EVOLUCIÓN DE LOS SISTEMAS MÓVILES.....	12
FIGURA 2-3: INTERFACES DE RED WAN Y BWA.....	14
FIGURA 2-4: ARQUITECTURA DEL SISTEMA BWA.....	15
FIGURA 2-5: RED BÁSICA CABLE MODEM.....	18
FIGURA 2-6: ESTÁNDARES DE CABLE MÓDEM EN EL MUNDO.....	21
FIGURA 2-7: NORMATIVAS DE TELEVISIÓN DIGITAL EN EL MUNDO.....	21
FIGURA 3-1: FORMATO DEL ENCABEZADO MAC GENÉRICO.....	29
FIGURA 3-2: FORMATO DEL ENCABEZADO MAC DE SOLICITUD DE ANCHO DE BANDA.....	30
FIGURA 3-3: FLUJO DE SS EN MODO GPC.....	39
FIGURA 3-4: FLUJO DE SS EN MODO GPSS.....	40
FIGURA 3-5: CONSULTA UNICAST.....	42
FIGURA 3-6: CONSULTA MULTICAST Y BROADCAST.....	43
FIGURA 3-7: ALGORITMO EXPONENCIAL BACKOFF.....	45
FIGURA 3-8: PROCESO DE INICIALIZACIÓN DE LA SS.....	46
FIGURA 4-1. MODELO DE SIMULACIÓN BWA.....	51
FIGURA 4-1: NODO DE LA ESTACIÓN BASE.....	51
FIGURA 4-2: MÓDULO HE_MAC.....	51
FIGURA 4-3: PROCESO ADMINISTRATIVO BWA_BE_MGR.....	51
FIGURA 4-4: PROCESO HIJO BWA_BE_TXCTL.....	51
FIGURA 4-5: MÓDULO FROM_NETWORK_CLOUD_RX.....	51
FIGURA 4-6: MÓDULO TO_NETWORK_CLOUD_TX.....	51
FIGURA 4-7: MÓDULO TO_STATS_COLLECTION_TX.....	51
FIGURA 4-8: MÓDULO ANT_RX.....	51
FIGURA 4-9: PATRÓN DE RADIACIÓN DE LA ANTENA DE LA SS.....	51
FIGURA 4-10: MÓDULO ANT_TX.....	51
FIGURA 4-11: MÓDULO FROM_LINK_RX.....	51
FIGURA 4-12: MÓDULO TO_LINK_TX.....	51
FIGURA 4-13: MÓDULO RX_POINT.....	51
FIGURA 4-14: PROCESO BWA_RX_POINT_REF.....	51
FIGURA 4-15: NODO DE LA ESTACIÓN SUSCRIPTORA.....	51
FIGURA 4-16: MÓDULO SRC_TYPE_1.....	51
FIGURA 4-17: PROCESO ADMINISTRATIVO BWA_GEN_ROOT.....	51
FIGURA 4-18: PROCESO HIJO BWA_GEN_SRC.....	51
FIGURA 4-19: MÓDULO DOWNSTREAM_SINK.....	51
FIGURA 4-20: PROCESO BWA_DOWN_SINK.....	51
FIGURA 4-21: MÓDULO MAC.....	51
FIGURA 4-22: PROCESO ADMINISTRATIVO BWA_WM_MGR.....	51
FIGURA 4-23: PROCESO HIJO BWA_WM_CHILD.....	51
FIGURA 4-24: MÓDULO ANT_RX.....	51
FIGURA 4-25: PATRÓN DE RADIACIÓN DE LA ANTENA DE LA SS.....	51
FIGURA 4-26: MÓDULO ANT_TX.....	51
FIGURA 4-27: MÓDULO FROM_LINK_RX.....	51
FIGURA 4-28: MÓDULO TO_LINK_TX.....	51
FIGURA 5-1: DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDAD DEL TAMAÑO DE PAQUETES.....	51

FIGURA 5-2: 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.....	51
FIGURA 5-3: A) RETARDO PARA STREAMS DE 32 KBPS. B) THROUGHPUT PERFORMANCE PARA STREAMS DE 32 KBPS. C) RETARDO PARA STREAMS DE 64 KBPS. D) THROUGHPUT PERFORMANCE PARA STREAMS DE 64 KBPS.	51
FIGURA 5-4: A) RETARDO PARA STREAMS DE 128 KBPS. B) RETARDO PARA STREAMS DE 256 KBPS. C) THROUGHPUT PERFORMANCE PARA STREAMS DE 128 KBPS. D) THROUGHPUT PERFORMANCE PARA STREAMS DE 256 KBPS.	51
FIGURA 5-7: THROUGHPUT DEL SISTEMA VARIANDO EL NÚMERO DE SLOTS DE CONTENCIÓN.	51
FIGURA 5-8: RETARDO DEL SISTEMA VARIANDO EL NÚMERO DE SLOTS DE CONTENCIÓN.	51
FIGURA 5-9: RETARDO DEL SISTEMA VARIANDO LOS VALORES MIN/MAX DEL EBA.	51
FIGURA 5-10: THROUGHPUT DEL SISTEMA VARIANDO EL NÚMERO DE SLOTS DE CONTENCIÓN.	51
FIGURA 5-12: RED BWA CON 150 USUARIOS (SSs).	51
FIGURA 5-13: CODIFICACIÓN DE UNA SEÑAL DE VOZ BASADA EN G.711.	51
FIGURA 5-14: CÁLCULO DEL NÚMERO DE SLOTS A SOLICITAR (GRANT SIZE) CUANDO SE UTILIZAN PALABRAS DE CÓDIGO CORTAS.	51
FIGURA 5-15: DISTRIBUCIÓN DE TRÁFICO UGS.....	51
FIGURA 5-16: THROUGHPUT PARA TODOS LOS TIPOS DE TRÁFICO.	51
FIGURA 5-17: RETARDO VS TIEMPO (112 SSS).	51
FIGURA 5-18: PROBABILIDAD ACUMULADA VS RETARDO.	51
FIGURA 5-19: RETARDO VS TIEMPO (135 SSS).....	51
TABLA 5-9: PRIORIDADES EDF-BWA.....	51

Capítulo 1

Introducción

1.1. Definición del Problema

Las necesidades de comunicación actuales requieren soluciones tecnológicas que permitan integrar en un solo servicio el transporte de diversas fuentes de información tan diversas como datos, voz, video y multimedia con la máxima optimización de recursos y gran flexibilidad de escalamiento y adaptabilidad a otras tecnologías. Por otra parte, es necesario que puedan satisfacerse otros requisitos que permiten la mayor adaptación de la tecnología de comunicaciones al uso cotidiano. Entre ellos, el canal inalámbrico es uno de los retos más importantes en los desarrollos de las últimas décadas, ya que, además de emplear un medio universalmente accesible, permite el acceso a la información a las comunidades para las cuales la implementación de conectividad puede resultar bastante costosa.

En la actualidad la gran demanda de nuevos servicios de información como aplicaciones sobre la red Internet (FTP, e-mail, www), aplicaciones de telefonía sobre el protocolo IP (VoIP, Fax-IP), de audio (MPEG2) y de video (videoconferencia, videotelefonía, video en demanda, pago por evento, etc.), ha motivado no solamente a la industria a extender y mejorar sus redes de comunicaciones, sino también a las instituciones de investigación a desarrollar nuevos protocolos de comunicaciones que puedan soportar eficientemente tales aplicaciones.

Actualmente estos servicios de telecomunicaciones pueden ser ofrecidos a través de una variedad de tecnologías como son las redes de cable UTP/STP, de Cable-TV (o cablevisión), de fibra óptica, redes inalámbricas fijas y móviles, y satelitales. De estos sistemas de comunicaciones, la arquitectura que parece más prometedora por su accesibilidad a corto plazo y sobre todo por su gran ancho de banda, requerido para el soporte de estos servicios de información, son las redes de Cable-TV. Sin embargo, además de las exigencias de ancho de banda para el desarrollo de las diversas aplicaciones de comunicación, en los últimos años se ha incrementado la necesidad de contar con sistemas de acceso inalámbrico tanto fijos como móviles, que ofrezcan conectividad de banda ancha en todo momento y lugar.

En este contexto, la gran variedad y demanda de aplicaciones sobre las redes de acceso inalámbrico de banda ancha ha motivado a realizar el presente proyecto, el cual tiene como objetivo primordial desarrollar un modelo de simulación que permita presentar un análisis del comportamiento dinámico del protocolo de redes inalámbricas de banda ancha IEEE 802.16 basándose en el modelo actual para el análisis de redes de Cable-TV(DOCSIS) para determinar hasta qué punto y bajo qué condiciones estos servicios de información pueden ser soportados por la arquitectura que presentan este tipo de redes. Este estudio también contempla identificar las posibles ineficiencias y limitaciones, además de presentar algoritmos o mecanismos novedosos que permitan una mayor eficiencia cuando estos servicios sean transmitidos sobre las redes de acceso inalámbrico de banda ancha.

El programa de simulación de redes OPNET cuenta con un modelo para el estudio de las redes de Cable-TV que operan bajo el protocolo DOCSIS 1.0 y DOCSIS 1.1¹, las cuales cuentan con una velocidad de transmisión de datos de 10 Mbps en cada canal upstream y hasta 40 Mbps en los canales downstream. En este proyecto se realizaron las modificaciones a este modelo que permitieron realizar un análisis del desempeño dinámico del protocolo DOCSIS cuando el medio de transmisión es inalámbrico, en otras palabras el protocolo 802.16 y que actualmente se le conoce como WiMax.

La necesidad de servicios de acceso inalámbrico de banda ancha se debe a la reciente des-regularización del mercado mundial de telecomunicaciones. Esta des-regularización ha creado un nuevo ambiente en el cual nuevos operadores pueden competir con los operadores consolidados u operadores que antes tenían el monopolio en algunos países.

Hoy en día, la forma más común de acceder el Internet es desde el hogar, (con un 75% de todos los usuarios) a través de un módem (a 56 kbps). Pero desgraciadamente, la velocidad de transmisión es muy reducida y muchas de las veces resulta en una situación muy frustrante al tener que esperar por varios minutos para poder descargar o enviar un simple archivo de datos. Tecnologías alternativas para el envío de datos y voz, entre las cuales se encuentran la serie de protocolos de las compañías telefónicas (xDSL y ISDL) y las compañías de televisión por cable (CATV), resultan muy costosas para los usuarios de un nivel socioeconómico bajo/medio. Además, estos servicios (xDSL, ISDL, CATV) solo existen en zonas residenciales, donde las compañías tienen cobertura, o las casas se encuentran relativamente cerca de la oficina telefónica/ (o de la oficina CATV). Otra de las alternativas es a través de las redes de telefonía celular, pero resultan excesivamente costosos los servicios de envío de datos (approx. 100 pesos por un Mbyte de información enviado).

Esta situación es uno de los principales factores que nos motivó a basar nuestra investigación sobre una de las tecnologías que empezó a tomar forma a inicios de esta década y que pretende satisfacer la necesidad de comunicación que hoy en día se requiere, no solamente en el hogar, si no también en las escuelas, hospitales, oficinas, centros de investigación, y que disponga de una gran cobertura y alta capacidad de transmisión. A esta tecnología de radio frecuencia (RF) se le conoce como *Acceso Inalámbrico de Banda Ancha* (Broadband Wireless Access-BWA), la cual queda dentro de categoría de las redes inalámbricas de cobertura metropolitana (Wireless-MAN). A diferencia de las redes celulares actuales (GSM y CDMA), las redes BWA tienen un ancho de banda muy superior a las redes celulares en la banda SHF (Super High Frequency) y ESF (Extremely High Frequency), con velocidades de transmisión de datos por arriba de los 100 Mbps.

Los estudios obtenidos mediante este proyecto permitirán determinar cuáles son las aplicaciones de comunicaciones más convenientes que pueden utilizarse bajo un esquema de acceso inalámbrico de banda ancha, con base en un conjunto de consideraciones relativas a la capa de enlace de datos, principalmente, del modelo de referencia de Interconexión de Sistemas Abiertos, OSI.

¹ Data-Over-Cable Service Interface Specifications. Radio Frequency Interface Specification. Cable Television Laboratories, Inc. 2001.

Asimismo, los resultados generados por este proyecto permitirán llevar a cabo futuros desarrollos para mejorar el desempeño de los sistemas de acceso inalámbrico de banda ancha basados en las normas IEEE 802.16² y DOCSIS 1.1.

1.2. Modelado de Redes de Comunicaciones

1.2.1. Descripción de las redes BWA

Una representación genérica de una red de este tipo se muestra en la figura 1-1. La arquitectura de una red BWA consiste de una o más Estaciones Base (BE) y varios subscriptores o usuarios. El tiempo de transmisión ascendente (canal uplink, usuario → BE) es dividido en ranuras (o *slots*), basándose en la técnica TDMA (Time División Múltiple Access), mientras que el canal descendente (canal downlink, BE → usuario) usa la técnica continua TDM (Time Division Multiplexing).

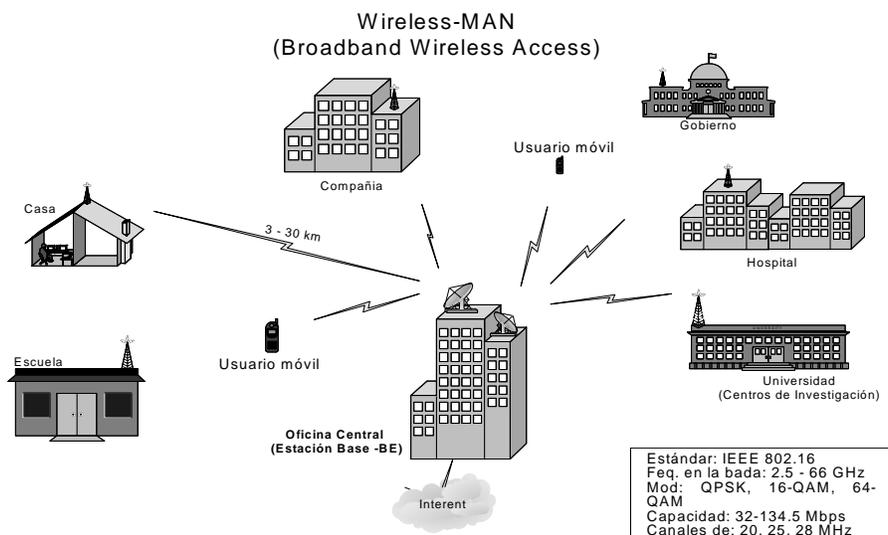


Figura 1-1: Red de Acceso Inalámbrico de Banda Ancha.

Para que un usuario pueda transmitir información, primero se debe enviar un mensaje de reservación a la BE a través del modem inalámbrico. Este mensaje de reservación indica el tiempo (o el número de slots) que requiere para poder realizar la transmisión de datos de un usuario.

Para la realización de este estudio, es indispensable que primero se construya un modelo de simulación el cual considere las tres regiones de operación del canal Uplink, como se indica en la figura 1-2. La región de contención se usa solamente para mandar los mensajes de reservación del canal uplink y también para el envío de mensajes de control y administración. La siguiente región de reservación se debe usar para la transmisión de datos de usuario una vez que ya ha sido reservado el canal, y la tercera región se debe usar para la transmisión de servicios en tiempo real (e.g. VoIP) y que requieren que se les asigne un espacio en el canal durante toda la conexión.

² IEEE Standard for Local and metropolitan area networks. Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems. The Institute of Electrical and Electronics Engineers. December, 2001.

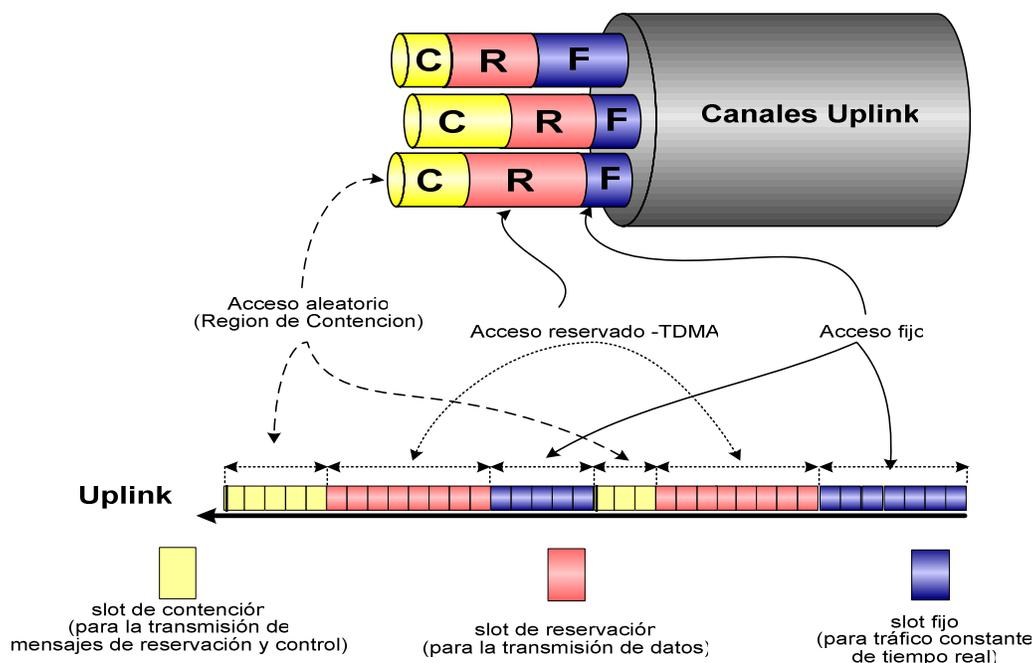


Figura 1-2: Regiones de operación del canal Uplink.

1.2.2. Propuestas de redes BWA

En la actualidad existen dos propuestas diferentes para redes BWA, ETSI BRAN y IEEE 802.16. La primera propuesta (ETSI Broadband Radio Access Networks o HIPERLAN) [6], es un protocolo europeo, el cual pretende que opere en la banda de los 5GHz y 17GHz, y lograr velocidades de transmisión de datos de 25-54 Mbps (para la banda de 5GHz) y 155 Mbps (a 17GHz). El protocolo que considera la banda de operación en los 5GHz soporta movilidad pero su mayor desventaja es que un usuario móvil solamente se podrá mover dentro del área de cobertura local, y no será posible cambiar de estación base.

La propuesta del protocolo IEEE 802.16 operará en la banda 2.5 – 11 GHz para sistemas fijos y móviles y 11-66 GHz para sistemas fijos solamente. Este protocolo es mucho más robusto que el protocolo ETSI BRAN, al ser una propuesta que se deriva del estándar americano de televisión por cable para la transmisión de datos (DOCSIS-Data over Cable Service Interface Specification) [5], el cual cuenta con 6 tipos diferentes de reservación (o calidad de servicio QoS) y modulación (QPSK, 16-QA y 64-QAM), para la transmisión de servicios en tiempo real (e.g. Voz sobre IP, video telefonía) y la transmisión de tráfico en ráfagas (eg. video conferencias, tráfico web a gran velocidad, etc.). Las velocidades de transmisión del protocolo IEEE 802.16 se espera que oscilen entre los 32Mbps y 134Mbps aproximadamente, y se tiene pensado que lleguen hasta los 310Mbps en la segunda etapa de su desarrollo, cuando se disponga de sistemas radioeléctricos que utilicen esquemas de modulación de orden superior.

En general ambas propuestas se encuentran en una etapa de revisión y antes que sean consideradas como posibles estándares es necesario que primero se resuelvan algunas deficiencias en la capa de control de acceso al medio (MAC) y la capa física (PHY), las cuales se describen a continuación:

Capa física (PHY Layer). Una limitación de las redes BWA, es que mientras más alejado se encuentre un usuario de la estación base, menor será la capacidad de transmisión de datos que se puede obtener por varias razones e.g. interferencias, condiciones climatológicas, obstáculos que obstruyen el paso de la señal de RF (conocido como *multipath fading*), etc. Uno de los mayores problemas a resolver es como hacer que un enlace inalámbrico parezca como un enlace con cables. En la actualidad se tiene toda una área de investigación que se enfoca al estudio del canal físico de las redes donde se pretende presentar nuevas técnicas de modulación (e.g. Ortogonal-FDMA, modulación adaptiva), uso de antenas múltiples en los receptores y transmisores, antenas adaptivas, etc.

Capa MAC: En esta capa se tienen problemas de baja eficiencia en periodos de congestión a causa de retransmisiones excesivas, periodos largos de contención, distribución ineficiente de slots de contención y reservación, y una baja calidad de servicio en el proceso de handover.

1.3. Objetivos y Contribuciones

El objetivo principal de este proyecto es realizar investigación de vanguardia que permita incrementar y extender el conocimiento actual de las redes inalámbricas de banda ancha. Así mismo, contribuir al fortalecimiento y desarrollo de la investigación científica y tecnológica en el país. La herramienta principal para lograr este objetivo es, por su alcance y difusión, la publicación de nuestros resultados. El publicar estos resultados permite a la comunidad científica internacional entrar en conocimiento de los resultados de nuestro trabajo, lo que sirve como base para que otros investigadores extiendan todavía más los trabajos de investigación en esta área de las telecomunicaciones.

Otro de los objetivos que se persigue es realizar un análisis detallado acerca del comportamiento dinámico de los bwa-módems que permita la caracterización del protocolo de comunicaciones de acceso inalámbrico de banda ancha 802.16. Los resultados que se espera obtener de este modelo de simulación son:

- Estimación de la máxima capacidad de transmisión de información sobre el canal uplink.
- Tiempo promedio de transmisión de paquetes de información.
- Máxima capacidad de transmisión de datos (throughput) por usuario.
- Escalabilidad de la red de cuarta generación de acceso inalámbrico de banda ancha IEEE 802.16 usando diferentes tamaños de paquetes de información.
- Escalabilidad del canal uplink en términos de la carga de información recibida (generada por varios usuarios) y la máxima capacidad de transmisión que se puede obtener usando varias configuraciones y diferentes escenarios de tráfico de información. Se considerará el tráfico de Internet (www, ftp, email, etc.), tráfico de telefonía sobre el protocolo de Internet (VoIP, fax, mensajería de voz), y tráfico de carga constante, CBR (voz, audio, video).
- Estimación del número de conexiones que pueden ser soportadas para el envío de voz y video usando diferentes Codecs.

El conocimiento de estas características del protocolo de comunicaciones de acceso inalámbrico de banda ancha IEEE 802.16 es fundamental porque permite al administrador de la red inalámbrica planear las aplicaciones y los servicios que pueden ser ofrecidos a los usuarios; así como estimar los costos y tarifas por cliente y, finalmente, implementar la topología de la red que pueda soportar dichos servicios y aplicaciones.

Así mismo, estos resultados servirán para la culminación de un proyecto mucho más grande y ambicioso sobre el estudio de las redes inalámbricas de banda ancha, donde se toman en cuenta muchos otros factores importantes del protocolo como Calidad de Servicio, Handover, Evaluación de nuevas técnicas de control de acceso al medio, técnicas de mejoramiento de asignación de slots (de reservación y fijos) en el canal uplink para la transmisión de datos. Que en conjunto servirán para mejorar los problemas actuales del protocolo y poder usarse de manera comercial.

De estos resultados se está escribiendo un artículo, el cual se piensa enviar a la revista internacional "IEEE Broadcasting Technologies" para una posible publicación. Esta tesis se realizó dentro del marco de investigación del proyecto PAPIIT IN-110805 "Técnicas de mejoramiento de capacidad de redes inalámbricas de banda ancha".

1.4. Estructura de la Tesis

El presente trabajo muestra el comportamiento dinámico de las redes inalámbricas de banda ancha IEEE 802.16, la cual contempla diferentes puntos.

En el capítulo dos se presenta el estado del arte de las redes de tercera y cuarta generación, donde se describen las tecnologías más representativas de las diferentes generaciones de comunicaciones, se muestra también la arquitectura de las redes inalámbricas de banda ancha, así como la tecnología cable módem y los protocolos y estándares de las redes de Cable-TV, también se hace un análisis de las tecnologías alternativas a las redes inalámbricas de banda ancha.

En el capítulo tres se hace una descripción del protocolo de comunicaciones IEEE 802.16 en donde se muestra la arquitectura del protocolo y se explica la operación del mismo, incluyendo los procesos de comunicación entre la Estación Base (BS) y las Estaciones Suscriptoras (SS) durante la inicialización de las conexiones y la operación normal de la red.

El capítulo cuatro está enfocado al diseño del modelo de simulación para el protocolo IEEE 802.16. Se presentan los diseños de la estación base (BS) y la estación suscriptora (SS). El diseño involucra los nodos, módulos, procesos, estados y directivas que determinan el comportamiento de las estaciones involucradas en una red de acceso inalámbrico de banda ancha.

En el capítulo cinco se muestra el análisis y optimización del protocolo IEEE 802.16, se detallan los análisis a realizar, los parámetros de simulación y se muestran los resultados obtenidos de las diferentes simulaciones realizadas, al mismo tiempo que se desarrolla un análisis de los mismos.

El capítulo seis está destinado a las conclusiones, las discusiones finales, se realiza un análisis del trabajo futuro, de las contribuciones de la presente tesis y 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 y Cuarta Generación

2.1. Introducción

Las tecnologías inalámbricas están teniendo mucho auge y desarrollo en los últimos años, una de las que ha tenido un gran desarrollo ha sido la telefonía celular. Desde sus inicios a finales de los 70s ha revolucionado enormemente las actividades que realizamos diariamente. Los teléfonos celulares se han convertido en una herramienta primordial para la gente común y de negocios, las hace sentir más segura y las hace más productivas.

A pesar que la telefonía celular fue concebida para la voz únicamente, debido a las limitaciones tecnológicas de esa época, la tecnología celular de hoy en día es capaz de brindar otro tipo de servicios tales como datos, audio y video con algunas limitaciones, pero la telefonía inalámbrica del mañana hará posible aplicaciones que requieran un mayor consumo de ancho banda.

Describiremos brevemente las generaciones de la tecnología inalámbrica que han surgido desde sus inicios hasta nuestros días.

2.2. Evolución de las redes de comunicaciones

2.2.1. La primera generación 1G

La 1G de la telefonía móvil hizo su aparición en 1979, se caracterizó por ser analógica y estrictamente para voz. La calidad de los enlaces de voz era muy baja (2400 bauds), la transferencia entre celdas era muy

imprecisa, tenían baja capacidad [basadas en FDMA, Frequency Divison Multiple Access] y la seguridad no existía. Los primeros sistemas de telefonía móvil terrestre, TACS, AMPS, NMT, TMA, NAMT. La tecnología predominante de esta generación es AMPS (Advanced Mobile Phone System). La compatibilidad entre terminales y redes de diferentes países no estaba muy extendida. NMT se utiliza en los países nórdicos, AMPS y TACS en EEUU, y NAMT en Japón.

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

2.2.2. La segunda generación 2G

La 2G arribó hasta 1990 y a diferencia de la primera se caracterizó por ser digital. El sistema 2G utiliza protocolos de codificación más sofisticados y son los sistemas de telefonía celular usados en la actualidad. Las tecnologías predominantes son: GSM (Global System for Mobile Communications); IS-136 (conocido también como TIA/EIA-136 o ANSI-136) y CDMA (Code Division Multiple Access) y PDC (Personal Digital Communications), éste último utilizado en Japón.

Los protocolos empleados en los sistemas 2G soportan velocidades de información más altas para voz pero limitados en comunicaciones de datos. Se pueden ofrecer servicios auxiliares tales como datos, fax y SMS (Short Message Service). La mayoría de los protocolos de 2G ofrecen diferentes niveles de encriptación. En los Estados Unidos y otros países se le conoce a 2G como PCS (Personal Communications Services).

2.2.3. La generación 2.5G

Muchos de los proveedores de servicios de telecomunicaciones (carriers) se moverán a las redes 2.5G antes de entrar masivamente a 3G. La tecnología 2.5G es más rápida y más económica para actualizar a 3G.

La generación 2.5G ofrece características extendidas para ofrecer capacidades adicionales que los sistemas 2G tales como GPRS (General Packet Radio System), HSCSD (High Speed Circuit Switched Data), EDGE (Enhanced Data Rates for Global Evolution), IS-136B, IS-95B, entre otros. Los carriers europeos y de Estados Unidos se movieron a 2.5G en el 2001. Mientras que Japón paso directo de 2G a 3G también en el 2001.

2.2.4. La tercera generación 3G

La 3G es tipificada por la convergencia de la voz y datos con acceso inalámbrico a Internet, aplicaciones multimedia y altas transmisiones de datos. Los protocolos empleados en los sistemas 3G soportan altas velocidades de información enfocados para aplicaciones mas allá de la voz tales como audio (MP3), video en movimiento (MPEG), video conferencia y acceso rápido a Internet, sólo por nombrar algunos. Las redes 3G empezaron a operar en el 2001 en Japón por NTT DoCoMo, en Europa y parte de Asia en el 2002, posteriormente en Estados Unidos y otros países.

Los sistemas 3G alcanzan velocidades de hasta 384 kbps permitiendo una movilidad total a usuarios viajando a 120 kilómetros por hora en ambientes exteriores. La tecnología 3G alcanzará una velocidad de transferencia máxima de 2 Mbps permitiendo una movilidad limitada a usuarios caminando a menos de 10 kilómetros por hora en ambientes estacionarios de corto alcance o en interiores. Entre las tecnologías contendientes de la tercera generación se encuentran UMTS (Universal Mobile Telephone Service), cdma2000, IMT-2000, ARIB[3GPP], UWC-136, entre otras.

El impulso de los estándares de la 3G está siendo apoyado por la ITU (International Telecommunications Union) y a este esfuerzo se le conoce como IMT-2000 (International Mobile Telephone).

En la tabla 2-1 se muestran los sistemas de comunicaciones móviles de tercera generación IMT-2000/UMTS.

Parámetro		Descripción	Comentario
1	Frecuencia/Banda de frecuencias	1900-1980 MHz Tx equipos de usuario. 2010-2025 MHz (modo TDD). 2110-2170 MHz Tx estaciones base (pareado con 1920-1980 MHz para operación en modo FDD).	Las bandas de frecuencia indicadas son para la componente terrenal de IMT-2000/UMTS Las frecuencias son las armonizadas por la ERC/DEC/(99)25
2	Canalización/Anchura de banda	Canalización basada en un raster de 200 kHz con un mínimo de 5 MHz	
3	Modulación	Digital QPSK	
4	Separación dúplex	Espectro reservado para las modalidades FDD y TDD 190 MHz FDD	
5	Nivel de potencia	Control dinámico de potencia Pot. Máxima equipos de usuario hasta 34 dBm	
6	Servicio radioeléctrico/tipo de dispositivo	Servicio móvil terrestre	
7	Norma técnica	Estándares europeos armonizados según normas técnicas del ETSI	La Recomendación UIT-R M.1457 contiene las especificaciones detalladas del interfaz radioeléctrico para IMT-2000
8	Licencia/uso	Si precisa licencia.	

Tabla 2-1: Sistemas de comunicaciones móviles de Tercera Generación.

Los objetivos de los sistemas de Tercera Generación, van más allá de los que caracterizaban a los sistemas de segunda generación IS-54, GSM o IS-95, en aspectos como:

- Una amplia gama de servicios: voz, video y datos, a altas tasas de transmisión de al menos 144 kbps, preferentemente de 384 kbps para usuarios de alta movilidad, en una amplia zona de cobertura, y de 2 Mbps para usuarios de baja movilidad, en un área de cobertura local.
- Altos niveles de calidad en el requerimiento de los servicios relacionados, con tasas de error (BER) menores a 1×10^{-6} .
- Operación en múltiples escenarios (macro, micro, pico, etcétera) y diferentes ambientes.
- Alta eficiencia espectral y flexibilidad en la asignación y manejo de los recursos.
- Alta flexibilidad para introducir nuevos servicios.

La estandarización de los sistemas de tercera generación ha progresado rápidamente en la mayor parte del mundo. Los estándares de tercera generación se aprobaron por la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU) en Noviembre de 1999 como Telecomunicaciones Móviles Internacionales 2000 (IMT-2000) y, bajo el Instituto de Estandarización Europea de Telecomunicaciones (ETSI) como Sistema Universal de Telecomunicaciones Móviles (UMTS) para extender los servicios provistos por los sistemas de segunda generación en Europa y Japón, en América el Instituto de Estandarización Americana (ANSI), como se observa en la tabla 2-2.

Estándares		
ITU (IMT-2000)	ETSI (UMTS o UTRA)	ANSI
IMT-DS (Direct Spread)	W-CDMA UTRA FDD (Europa y Japón)	
IMT-MC (mult-Carrier)		cdma-2000
IMTC-TC (Time Carrier)	TD-SCDMA y UTRA TD	
IMT-SC (Single Carrier)	UWC-136 EDGE	
IMT-FT (frequency time)	DECT (Europa)	

Tabla 2-2: Estandarización de Sistemas de Tercera Generación.

La tecnología seleccionada para los sistemas de tercera generación, depende de factores técnicos que involucran el requerimiento de la velocidad de transmisión y desempeño, de factores políticos que involucran

los acuerdos alcanzados por los diferentes estándares en distintos países y de su compatibilidad con las tecnologías preexistentes.

Tanto ETSI, como ANSI e ITU, han reconocido a los sistemas de tercera generación, que involucran la evolución de los sistemas de segunda generación. En Europa la estandarización del sistema UMTS se hizo considerando la evolución del GSM y la red de servicios integrados, con la idea de soportar los nuevos servicios y los provistos por GSM. En estados Unidos la evolución de IS-95, cdma2000, está basada en la utilización de tecnología de banda ancha para garantizar los requerimientos impuestos por IMT-2000, proveyendo una transición suave de los sistemas de segunda generación hacia los de tercera.

2.2.4.1. Arquitectura de los Sistemas de Tercera Generación

En los sistemas de tercera generación, el servicio en cualquier lugar y tiempo representa una parte fundamental de la funcionalidad. A ésta puede añadirse la necesidad de ampliar el área de servicio, unificar diversas tecnologías, integrar redes fijas y móviles, etcétera. Se puede esperar, entonces, que la diversidad de servicios que ofrecen los sistemas de tercera generación, represente un desafío para la arquitectura de los sistemas regulados por ITU. Ningún sistema en el pasado había pretendido proveer tan amplia gama de servicios de operación global y tan elevado nivel de capacidad y desempeño. En la Figura 2-1 se simplifican los alcances de los sistemas de tercera generación, donde se pueden ver distintos sistemas operando simultáneamente, desde un ambiente de alta capacidad en picoceldas y servicios de voz, hasta un ambiente de cobertura satelital y servicios multimedia.

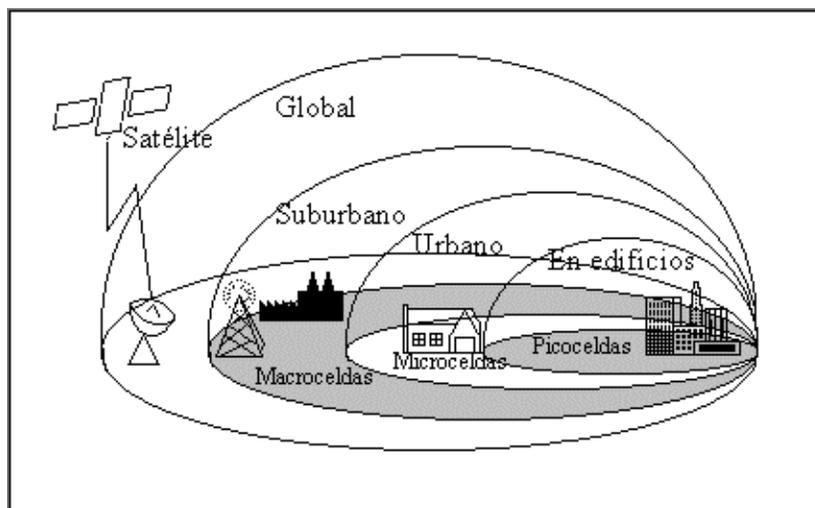


Figura 2-1: Red Multi-funcional.

ITU ha progresado en la estandarización de los sistemas de tercera generación, en una primera y segunda fases del IMT-2000, las cuales consideran conmutación de datos en circuitos y paquetes, incluyendo servicios de audio, video, voz, datos, multimedia, servicios suplementarios de búsqueda, ambientes virtuales, voiceo y seguridad, en configuraciones punto a punto, punto multipunto con terminales fijas o móviles.

En la tabla 2-3 se listan las principales características de los sistemas de tercera generación y las diferencias con los de segunda generación.

Aspectos	Sistemas de Segunda Generación	Sistemas de Tercera Generación
Tecnología Digital	Tecnología digital para modulación de voz, codificación de canal e implementación de canales de control y tráfico.	Incremento en el uso de tecnologías digitales incluyendo radios programables.
Operación en Distintos Ambientes	Están optimizados para operar en algunos ambientes, como vehicular y	Se busca la operación multi-ambientes.

	pedestre en redes fijas y móviles.	
Bandas de Frecuencia	800MHz. 900MHz., 1.5GHz y 1.8GHz.	Uso de una banda de frecuencia global para sistemas terrestres y satelitales.
Servicio de Datos	Velocidades menores a 100kbps	Altas velocidades y servicio de datos en conmutación de circuitos o paquetes.
Servicio de Búsqueda (Roaming)	Limitado a una región específica.	Búsqueda Global con la disponibilidad de cobertura satelital.

Tabla 2-3: Comparación de Sistemas de Segunda y Tercera Generación.

2.2.4.2. Características Operacionales

La causa principal del desarrollo de los sistemas de tercera generación, ha sido la implementación de servicios a elevadas tasas de transmisión de datos. Los sistemas de tercera generación deben ser capaces de ofrecer al menos 144 kbps. Las elevadas tasas de transmisión de datos en 3G, juegan un papel muy importante en el establecimiento de diversos servicios, de los cuales los más genéricos se mencionan a continuación: servicios de voz, básicos y mejorados, que incluyen aplicaciones como audio conferencias y correo de voz; servicios de transferencia de datos baja, que soportan correo de mensajes, correo electrónico y facsímil, entre otros; servicios de transferencia de datos media, los cuales soportan transferencia de archivos y acceso a Internet, a velocidades del orden de los 64-144 kbps, y servicios de transferencia de datos alta, que soportan transmisión de datos por conmutación de circuitos o en paquetes, a una alta velocidad, video conferencia y aplicaciones de cómputo en la red, a velocidades que van de los 64 kbps a los 2 Mbps. Adicionalmente a estos servicios, los sistemas de tercera generación proporcionarán servicios multimedia, mediante los cuales se soportarán aplicaciones interactivas de voz, datos y video, para distintos requerimientos de calidad de servicio.

El desarrollo de los sistemas de tercera generación UMTS/IMT-2000, el cual involucra un servicio de comunicación de cualquier persona a cualquier persona, en cualquier lugar y tiempo sin retardo, de cualquier forma y en cualquier medio para un nivel adecuado de calidad y seguridad, se ha convertido en el principal objetivo de los sistemas de comunicaciones actuales. En este contexto los sistemas de tercera generación han permitido extender los servicios de los sistemas de segunda generación, a áreas de cobertura más amplias y altas tasas de transmisión.

La evolución de los servicios provistos por los sistemas de segunda generación, implica la consideración de técnicas de control de acceso al medio y señalización más sofisticadas, que permiten sustentar servicios de transmisión de datos a altas velocidades, no sólo en aplicaciones de banda ancha (voz, video datos y multimedia), sino que ésta considera la eficiencia y flexibilidad requeridas, para orientar la infraestructura del sistema celular a la aplicación en diversos ambientes de radio.

2.2.5. La cuarta generación 4G

La cuarta generación es un proyecto a largo plazo que será 50 veces más rápida en velocidad que la tercera generación. Se planean hacer pruebas de esta tecnología hasta mediados del 2005 y se espera que se empiecen a comercializar la mayoría de los servicios hasta el 2007.

2.2.5.1. Mobile Multimedia Communication

Con el término multimedia se designa un sistema de comunicaciones con múltiples formas de presentar la información, como combinación de texto, datos gráficos, animación, imágenes, voz, sonido y vídeo. Quizá la característica más relevante para caracterizar las comunicaciones multimedia sea la posibilidad de interacción entre los sujetos de la comunicación. La evolución de los sistemas hacia lo que será esa cuarta generación se muestra en la Figura 2-2.

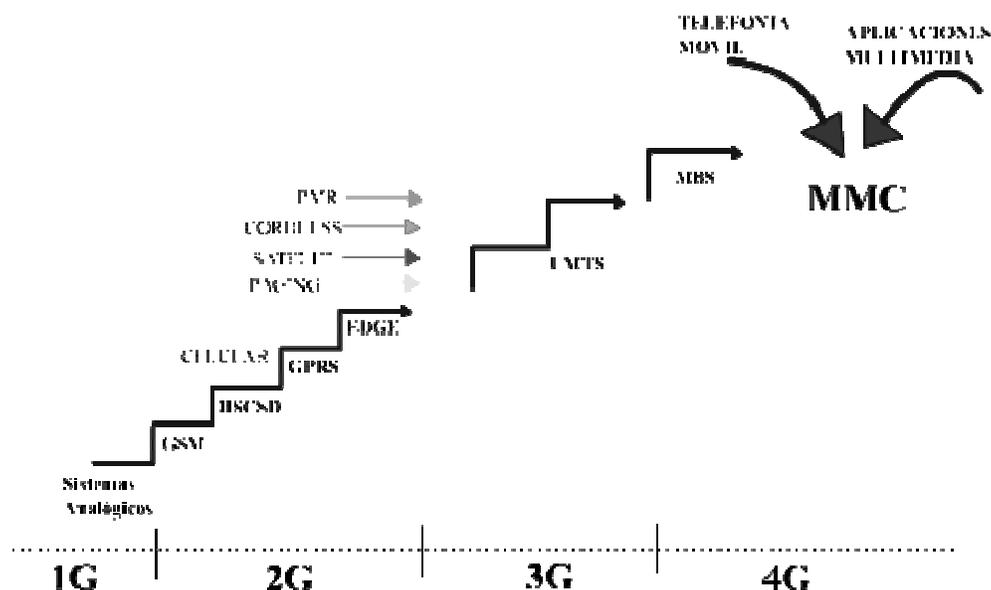


Figura 2-2: Evolución de los Sistemas Móviles.

Para sistemas de comunicaciones móviles de cuarta generación, es necesario desarrollar nuevos conceptos que quizá no sean encontrados únicamente mejorando los sistemas existentes.

Un nuevo concepto de comunicaciones se presenta en el proyecto denominado “**Mobile Multimedia Communication**”, MMC, proyecto multidisciplinario con las siguientes líneas características:

Aplicaciones: Multimedia ha resultado ser especialmente útil en situaciones laborales no habituales, situaciones en las que el profesional afronta un problema complejo que no puede ser resuelto por los medios comunes y para cuya resolución carece de experiencias. Estas situaciones se presentan de forma habitual en situaciones de emergencia, asistencia médica o desastres naturales.

Compresión. Reducir la tasa de transmisión es importante, pero no lo es todo en comunicaciones móviles. Debido a las características del canal móvil, la posibilidad de error en el canal será muy alta y será de gran importancia el realizar una codificación robusta frente a errores.

Protocolos de Transmisión. Se ha elegido una estructura jerárquica que proporciona diferentes calidades de servicio a diferentes tipos de tráfico utilizando para ello *Forward Error Correction (FEC)* y *Automatic Repeat reQuest (ARQ)*. La estructura jerárquica es realizada mediante una combinación TDM/FDM (*Time Division Multiplexing / Frequency Division Multiplexing*). Esta aproximación resultará fácil de ampliar en un futuro para integrar avances tecnológicos tanto en modulación como en codificación. Los siguientes pasos dados han sido en la dirección de completar el sistema de comunicaciones desarrollando un método para combinar datos de múltiples receptores en una red celular virtual (*virtual cellular network, VCN*).

Transmisión de señales en banda ancha. En comunicaciones móviles, una de las principales limitaciones para satisfacer las necesidades de la sociedad es la disponibilidad del espectro. Lo limitado del espectro ha llevado a que en los últimos años la atención mundial se centrara en las frecuencias milimétricas. En el proyecto MMC la transmisión se realiza en la banda V (de 40 a 75 GHz), centrada a 60 GHz y el esquema de modulación adoptado ha sido *Orthogonal Frequency Division Multiplex (OFDM)*.

2.3. Arquitectura de los sistemas BWA

Los sistemas de Acceso Inalámbrico de Banda Ancha, Broadband Wireless Access (BWA), ofrecen conectividad que responde a las necesidades de comunicación con el soporte de aplicaciones diversas, que

también incluyen servicios multimedia. Estas tecnologías se caracterizan tanto por la capacidad para transportar grandes cantidades de información así como por la integración de servicios diversos y la compatibilidad con los sistemas existentes.

La recomendación ITU-R 9B/134-E de la Unión Internacional de Telecomunicaciones³ corresponde a la especificación funcional de los Sistemas Fijos de Acceso Inalámbrico de Banda Ancha, generada a partir de los Sistemas de Cable (Anexo B de la recomendación ITU-T J.112⁴). Estos sistemas se implementan conforme a las configuraciones Punto a Punto, Punto – Multipunto y Multipunto – Multipunto o malla, para transmisiones desde 1.5 Mbps hasta 45 Mbps. Estas tasas permiten el transporte de datos, imágenes, audio y video en las bandas de 2.5 a 66 GHz del espectro electromagnético, por lo que a estas tecnologías también se le conoce como Sistemas Inalámbricos Multimedia (Multimedia Fixed Systems, MWS).

Como lo indica su nombre, esta recomendación se basa en la tecnología de Cable MODEM, que también ofrece conectividad de banda ancha para el transporte de servicios multimedia en configuraciones Punto a Punto y Punto – Multipunto. Se incorporan algunas modificaciones que permiten la coexistencia de los sistemas BWA con otros medios inalámbricos como los servicios satelitales, así como consideraciones relacionadas con línea de vista, control de potencia, señalización, etc.

El acceso al canal compartido también se efectúa con base en un esquema de contención y asignación de oportunidades de transmisión, dirigidas por la estación transmisora central que envía periódicamente mensajes de control que describen las características de los canales de transmisión, la distribución de las oportunidades de contención, transmisión y mantenimiento, etc.

2.3.1. Definición de ámbito e interfaces

Con la finalidad de especificar los alcances de la recomendación, se toma como referencia las interfaces entre los equipos de la red de área amplia (WAN), la estación transmisora y los sistemas del cliente, como se muestra en la figura 2-3.

³ _Radio Transmisión Systems for Fixed Broadband Wireless Access (BWA) Based on Cable Modem Standards, International Telecommunication Union, Radiocommunication Study Groups

⁴ Draft New Recommendation ITU-R F.BWA. Radio Transmission Systems for Fixed Broadband Wireless Access (BWA) Based on Cable MODEM Standards (Annex B of ITU-T Rec J.112). International Telecommunications Union. April, 1999.

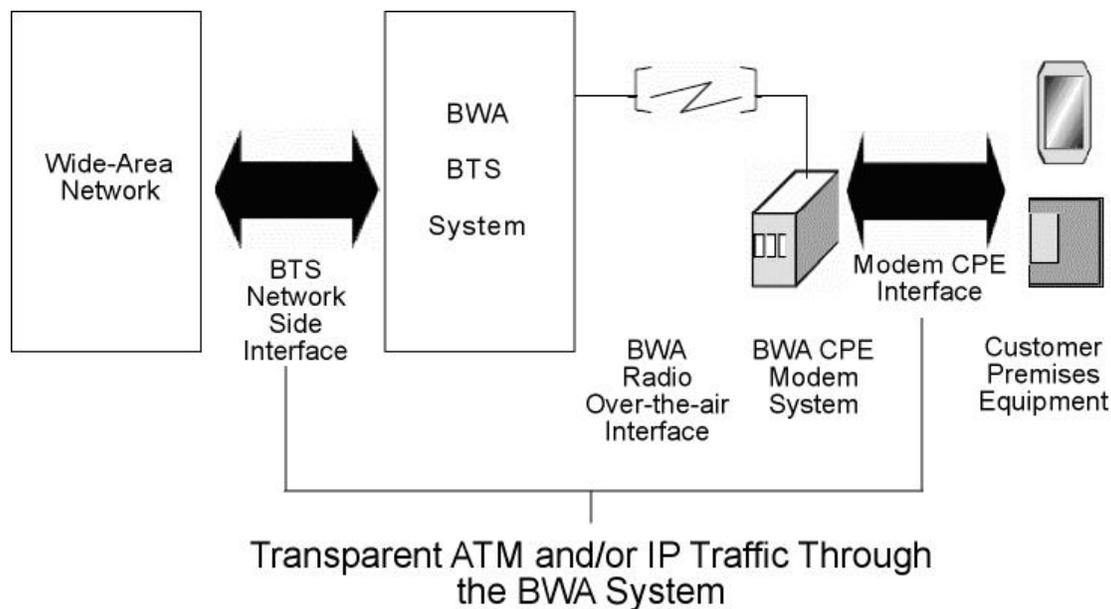


Figura 2-3: Interfaces de red WAN y BWA.

La interfaz entre la red WAN y el sistema de la estación base transreceptora de acceso inalámbrico de banda ancha (BWA BTS) es la Interfaz de la Sección de Red (BTS Network Side Interface, BTS NSI). Por otro lado, el equipo local del usuario, (Customer Premises Equipment, CPE) se comunica a través de la Interfaz MODEM CPE (CPE MODEM to Customer Premises Interface, CMCI) con el Sistema MODEM de acceso inalámbrico de banda ancha (BWA CPE). La transmisión inalámbrica se realiza entre el sistema BWA BTS y el sistema BWA CPE a través de la interfaz aérea de radio BWA.

El objetivo de la recomendación ITU-R 9B/134-E es el de especificar los servicios y la infraestructura suficientes para realizar el transporte transparente de tráfico IP y/o ATM entre la BWA NSI y la Interfaz MODEM CPE.

2.3.2. Arquitectura BWA

El sistema de Acceso Inalámbrico de Banda Ancha se organiza mediante la arquitectura mostrada en la figura 2-4:

2.3.2.1. Sistema de Radio Frecuencia

El sistema de RF consiste en uno o más transceptores y antenas en la estación base y un CPE (transceptor integrado con antena, llamado CPE o equipo de las Premisas del Cliente por sus siglas en inglés) en cada sitio del suscriptor.

2.3.2.1.1. Estación Base

En la estación base, los módulos de transmisión y recepción del transceptor están conectados en un lado con el equipo de acceso de datos de la estación base y por el otro lado con una antena omnidireccional (que proporciona 360 grados de cobertura) o con una antena sectorial que proporciona 180, 90, o 45 grados de cobertura, dependiendo de los requisitos del sistema. El transceptor está configurado para manejar los canales de bajada y de retorno, según los requisitos de carga determinados en el análisis del sistema.

2.3.2.1.2. Equipo de las premisas del cliente

En las estaciones remotas, un transceptor CPE recibe la señal de bajada de la estación base y la pasa al módem de cada suscriptor. Simultáneamente, recibe el tráfico de retorno del módem del suscriptor y lo transmite a la estación base.

El transceptor CPE viene integrado con una antena en una caja especialmente diseñada para instalación a la intemperie y para fácil alineación con la estación base. Un solo cable coaxial conecta el transceptor con el módem del suscriptor en el interior de cada vivienda u oficina. Este cable lleva las siguientes señales:

- La señal de bajada desde el transceptor CPE al módem de abonado.
- La señal de subida desde el módem de abonado al transceptor CPE.
- La corriente DC de alimentación del transceptor.

2.3.2.2. Sistema de Acceso

El sistema de acceso hace el papel de la interfase de comunicación entre el punto de presencia de la red de datos (por ejemplo Internet, un ISP o Servidores) en la estación base y cualquier módem instalado en la casa u oficinas del suscriptor. Es responsable de la estructuración y manejo del tráfico de señal de bajada o subida con dirección al Sistema de RF.

El BWA es un sistema celular basado en el "acceso compartido". Los suscriptores "comparten en el tiempo" los canales de bajada y subida que se les asignan en cada célula o en cada sector de cada célula. Al igual que en la mayoría de los sistemas fijos inalámbricos, en cada canal de bajada el sistema proporciona acceso basado en el concepto TDM (Time Domain Multiplexing o Multiplexación en el Tiempo) con modulación 64-QAM, mientras que el retorno se utiliza el concepto TDMA (Time Domain Multiple Access o Acceso Múltiple en el Tiempo) usando modulación QPSK o 16-QAM, estas modulaciones se eligen de acuerdo a los diferentes tipos de servicios que se usen en la red.

Este Sistema de Acceso consiste en un módem de estación base o CMTS (Cable módem Termination System o Sistema de Terminación de Modems de Cable), el cual modula el tráfico de bajada y demodula el tráfico de retorno, y el módem del suscriptor, que hace lo inverso, así como de un Sistema de Gestión de Red (NMS o Network Management System, por sus siglas en inglés), que configura y controla esta actividad.

2.3.2.3. Módem de estación base

El módem de la estación base es una unidad basada en un ruteador que maneja la comunicación de datos de doble vía entre los suscriptores y la conexión a Internet. Este módem permite todo los tipos de aplicaciones y protocolos que se utilizan comúnmente en el Internet. Las principales aplicaciones que se usan con el sistema son el acceso a Internet, acceso de alta velocidad a servidores multimedia, vídeo conferencia y "streaming",

además de otras aplicaciones avanzadas. El acceso al PSTN (red telefónica pública) para las aplicaciones de VoIP se puede proporcionar vía un portal (Gateway) de VoIP.

2.3.2.3.1. Características QoS (Calidad de Servicio) de altas prestaciones proporcionadas por el estándar DOCSIS.

El módem de la estación base se caracteriza por disponer de una amplia gama de protocolos de QoS para proporcionar servicios múltiples. El sistema está basado en los estándares DOCSIS 1.0, DOCSIS 1.1, DOCSIS 2.0, y PacketCable 1.0. La clasificación de QoS se realiza a velocidades operativas para más de 16.000 sesiones de datos (8,000 en bajada y 8,000 en subida). La mayoría de las funciones características de QoS se integran completamente dentro del módem de la estación base, reduciendo así la necesidad de tener que instalar equipos QoS adicionales.

El módem de estación base permite a los operadores crear los protocolos de QoS y los perfiles del servicio que pueden aplicarse a cada suscriptor o a grupos de suscriptores, teniendo por resultado la capacidad de ofrecer acuerdos de nivel de servicio (SLAs). Las características de gerencia del suscriptor se basan en interfaces de sistemas abiertos que permiten a los operadores que establezcan las normas de uso del servicio. Esto simplifica el proceso de aprovisionamiento y agiliza la adición de nuevos clientes.

El módem de la estación base se puede configurar como ruteador o como puente. Esta flexibilidad permite que el operador pueda optimizar la capacidad del sistema en base al tamaño de su red. Por ejemplo, en el despliegue inicial del sistema, cuando la red es pequeña, el módem de la estación base se puede configurar como puente, lo que simplifica la puesta en marcha de la red. A medida que crezca la base de suscriptores en el sistema, el módem de estación base puede configurarse como ruteador para reducir el tráfico de difusión, mejorando así los servicios ofrecidos al suscriptor. Y al mismo tiempo añadiendo la seguridad proporcionada por un ruteador.

2.3.2.3.2. Módem del suscriptor

El módem del suscriptor conecta al transceptor CPE vía un solo cable coaxial en el que se transmiten las señales de bajada y de subida. Este módem demodula, descifra, y recupera los datos de bajada que llegan de la estación base. Cuando el suscriptor envía datos a la estación base, el módem del suscriptor modula, codifica y procesa las ráfagas de datos que se envían al transceptor CPE por el cable coaxial.

Los módems del suscriptor están basados en el protocolo DOCSIS y pueden utilizarse en residencias, oficinas o pequeñas empresas. Cualquier módem de cable que cumpla los requisitos DOCSIS puede utilizarse con el sistema BWA-2000. Algunos modelos conectan simultáneamente hasta 31 computadoras por conexión serial USB y pueden conectarse más de 31 a través de una conexión Ethernet 10/100BaseT vía conexión de red, hub o ruteador.

2.3.2.3.3. Conexión de red del BWA

La conexión de red del BWA-2000 es para los servicios de voz y datos. En la estación base la conexión de red es específica para cada tipo de servicio.

- La conexión de datos es mediante un ruteador que convierte y dirige los paquetes de datos a la conexión del “backbone” de Internet.
- Para aplicaciones de VoIP la conexión con el Conmutador de Telefonía consiste en un Gateway para VoIP y un Gestor de Llamadas.
- Para aplicaciones de video “multicast” IP, cualquier fuente de vídeo IP puede conectarse directamente a la BS.

En las premisas del cliente, la conexión de red consta de módems de datos para el acceso a Internet, MTAs (Adaptadores Terminales) para la conexión a teléfonos estándar y decodificadores o “Set Top Boxes” para la TV.

2.4. Tecnología Cable Módem

Una de las tecnologías de Banda Ancha más usadas en la actualidad es la del cable módem, la cual brinda múltiples aplicaciones de envío de voz y datos con gran efectividad. Las redes de Cable TV están diseñadas para enviar video, como resultado, tiene mucho más ancho de banda. Este mayor ancho de banda permite a las redes de Cable TV transmitir más información por segundo. Por lo tanto es capaz de transmitir a muy altas velocidades.

La red básica consiste en dos canales lógicos (upstream y downstream). Los clientes o suscriptores los cuales son referidos como Cable Modems (CM's) o estaciones que están conectadas para transmitir peticiones y datos por el canal upstream hacia el Headend también nombrado como el Cable MODEM Termination System o CMTS. El CMTS procesa todos los datos que llegan del canal upstream y envía la respuesta a cada CM por el canal downstream. La figura 2-5 muestra un esquema simplificado de la red Cable MODEM.

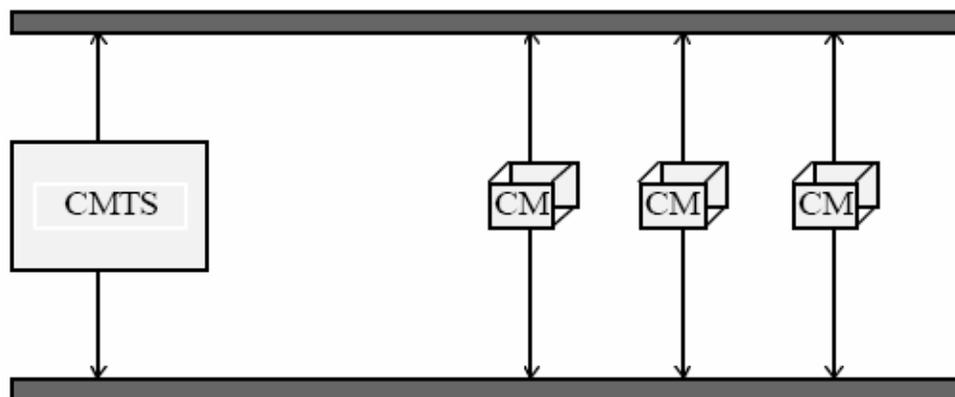


Figura 2-5: Red Básica Cable MODEM.

El CMTS se encarga de organizar el envío y recepción de datos de tal forma que asigna a cada CM un determinado tiempo para que sus peticiones sean atendidas y cada CM tenga oportunidad de transmitir y recibir información.

Cuando un CM es encendido, este sigue uno de dos escenarios. Si se está autenticando en la red por primera vez (o la configuración a cambiado), el CM automáticamente busca la frecuencia del espectro de recepción de datos. Si el CM ha accedido previamente a la red, este inmediatamente afinará el canal de recepción de datos (la frecuencia de la sesión anterior está almacenada). Una vez el CM encuentra la señal de datos, este espera el mensaje que contiene los parámetros básicos para el canal de envío de datos (frecuencia, modulación, rango, índice distintivo, parámetros FEC, etc.). El CM entonces transmite un mensaje al CMTS solicitando información adicional que lo habilitará para conectarse a la red.

A través de una serie de mensajes e interacciones, el CM establece una conectividad IP utilizando DHCP, o direccionamiento dinámico y entonces recibe un archivo vía TFTP que tiene parámetros adicionales que el CM necesita para configurarse. Luego que el CM está configurado, se registra con el CMTS y se le autoriza el uso de la red.

En cuanto el CM ha sido configurado y autorizado, este puede utilizar la red con las características estándar de una red Ethernet. El Sistema de Soporte de Operaciones (Operations Support System "OSS") software que se encuentra en el CMTS se comunica con todos los CM's y tiene la capacidad de reconfigurarlos para el uso distinto de canales, cambiar sus parámetros, y deshabilitarlos en el uso de la red.

2.5. Especificación de Protocolos y Estándares de las Redes de Cable TV

En mayo de 1994 el IEEE crea un subcomité para las redes de CATV denominado 802.14, un año más tarde para 1995 el DAVIC (Digital Audio Visual Council) empieza a desarrollar estándares para CATV. DAVIC 1.2 se publica en diciembre de 1996.

En enero de 1996 cuatro operadores crean MCNS (Multimedia Cable Network System) para desarrollar estándares DOCSIS (Data Over Cable Service Interface Specification), más tarde en marzo de 1997 se publica DOCSIS 1.0. El desarrollo histórico de los sistemas anteriores se resume en la tabla 2-4.

	IEEE 802.14	DAVIC	MCNS
5/94	Creación		
12/95		DAVIC 1.0	
1/96			Creación
9/96		DAVIC 1.1	
12/96		DAVIC 1.2	
3/97			DOCSIS 1.0
9/98	Publicación borrador		
3/99			DOCSIS 1.1
2000	Aprobada su disolución		

Tabla 2-4: Cronología de Estándares CATV.

El IEEE 802.14 es un grupo de trabajo creado en 1984, es una parte de la larga serie de estándares 802 de LAN/MAN. Los estándares IEEE 802 para Ethernet y Token Ring, son los comunes en las redes de comunicación, el primer borrador de especificaciones se publicó en 1998.

El grupo de trabajo está caracterizado por crear estándares para transportar información sobre el cable tradicional de redes de TV. La arquitectura especifica un híbrido fibra óptica/coaxial que puede abarcar un radio de 80 kilómetros desde la cabecera. El objetivo primordial del protocolo de red en el diseño es el de transportar diferentes tipos de tráfico del IEEE 802.2 LLC (Control de enlace Lógico).

Las principales características de éste estándar es que en el nivel físico se pueden tener canales ascendentes de 30 Mb/s con enlaces simétricos, el nivel MAC se caracteriza por tener nuevos protocolos más complejos y eficientes, sin embargo este estándar no duró mucho y en la espera de su aprobación vino una inesperada disolución del grupo, ya que hubo poco interés en la industria por las propuestas del IEEE 802.14.

El DAVIC (Digital Audio Visual Council) es una asociación sin fines de lucro establecida en Ginebra Suiza y tiene como objetivo potenciar la implantación de las nuevas aplicaciones y servicios audiovisuales emergentes mediante la disponibilidad de normas internacionales sobre interfaces abiertas y protocolos que maximicen la interoperabilidad de los sistemas. DAVIC tiene un campo de actuación que incluye todas aquellas aplicaciones y servicios que contienen un componente importante de audio y video. Está formado por más de 200 empresas de más de 20 países.

El proyecto DVB es un grupo de más de 200 organizaciones de 25 países que cooperan para establecer una base técnica para la introducción de sistemas que se emplearán para la difusión digital de video, voz y datos. Algunas de las corporaciones más importantes que proporcionan servicios y productos relacionados con las tecnologías MCNS/DOCSIS y DVB/DAVIC se muestran en la tabla 2-5.



3Com	Alcatel
Broadcom	Cocom
Cisco Systems	DivCom
Dassault	Hughes Network Systems
General Instruments	Nokia
Motorola	Sagem
Pace	Simac
Thomson	Thomson Broadcast Systems
	Thomson Multimedia

Tabla 2-5: MCNS/DOCSIS vs DVB/DAVIC.

El DVB desarrolla un conjunto de especificaciones para llevar la televisión digital hasta los hogares y está trabajando sobre normas para sistemas de satélite, cable, transmisión digital terrestre, servicios de transmisión de datos, sistemas de codificación, y una interfaz de acceso condicional común que pueda beneficiarse de las economías de escala por hacer uso de todo un conjunto de componentes tecnológicos comunes.

Los puntos más sobresalientes sobre los estándares de redes de CATV son los siguientes:

- DOCSIS: estándar más extendido.
- Productos DAVIC 1.2 aproximadamente un año por detrás.
- DOCSIS: desarrollo USA. Caso europeo (Euro-DOCSIS) contemplado a posteriori (solo cambia nivel físico).
- DAVIC: desarrollo europeo.
- CMs actuales: DOCSIS 1.0 (sobre todo), también DVB 1.2 y propietarios.
- ITU-T ha adoptado tanto DOCSIS 1.0 como DAVIC 1.2.

La distribución mundial de los estándares de Cable MODEM en el mundo así como de las tecnologías de televisión digital se muestran en las figuras 2-6 y 2-7, respectivamente.

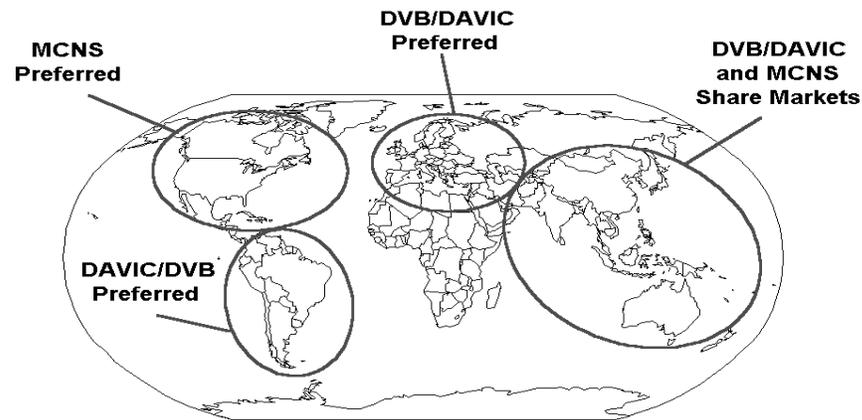


Figura 2-6: Estándares de Cable Módem en el Mundo.

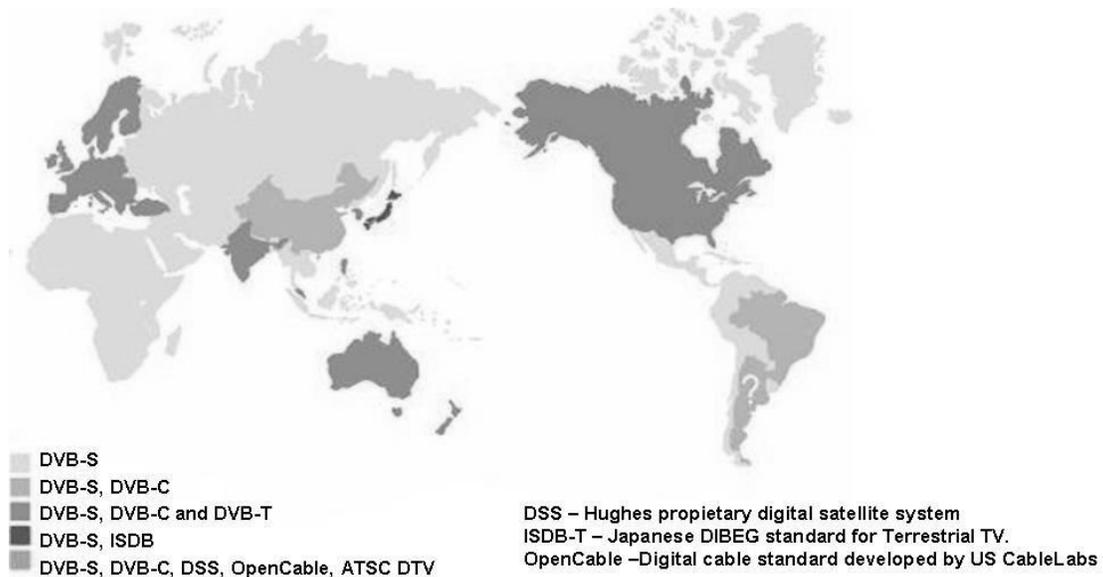


Figura 2-7: Normativas de televisión digital en el mundo.

2.6. Tecnologías Alternativas

En la actualidad la oferta disponible de redes de acceso de banda ancha es muy completa y variada tanto las basadas en sistemas cableados como inalámbricos, los métodos de acceso convencional son RTC, RDSI (Red Digital de Servicios Integrados) y GSM (Groupe Special Mobile), los métodos con conexión permanente cableada son xDSL, las redes de cable (Cable MODEM), y otras tecnologías con ondas portadoras, mientras que los métodos de conexión permanente inalámbricos son GPRS/UMTS, LMDS, Satélite, TV digital terrestre, BWA, Wi-Fi, entre otras.

2.6.1. RDSI ó ISDN

En 1984 la CCITT definía la RDSI (Red Digital de Servicios Integrados), como una red, en general evolucionada de una red digital integrada telefónica, que proporciona, de un extremo a otro, conectividad

digital, soportando un amplio abanico de servicios, ya sean vocales u otros, y a la que los usuarios pueden tener acceso mediante dispositivos o interfaces multi-propósito.

El término sajón original es ISDN (Integrated Service Digital Network), acuñado en 1972 por Japón y homologado en 1984 por CCITT.

Los estudios del CCITT hicieron patente la absoluta necesidad de que los servicios primarios de RDSI, evolucionaran a partir de las actuales redes telefónicas, entre otras razones para el aprovechamiento de las inversiones en los actuales cables de cobre. Sin embargo, es de esperar la evolución en instalaciones de mayor calidad para transferencias digitales, que a largo plazo son sin duda más rentables, como por ejemplo, fibra óptica.

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

1) Conmutación de circuitos:

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

2) - Conmutación de paquetes:

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

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

- Telefonía: Conversación a 3,1 KHz.
- Videoconferencia: a través de dos o más canales B.
- Teletexto: Según norma CCITT F.200.
- Telefax: Comunicaciones según norma CCITT Grupo 4.
- Modo mixto: Teletexto y fax grupo 4 combinados (F.200 anexo C).
- Videotexto: Almacenamiento y recuperación de textos y gráficos de buzones.
- Telex: Intercambio de mensajes en modo carácter, de un modo muy similar a los mecanismos actuales, pero con mayúsculas y minúsculas.
- Vigilancia y seguridad remotas, a través de líneas no dedicadas.
- Aplicaciones médicas: transferencia de rayos X, telemedicina, ultrasonidos y scanners.
- Transmisiones de radio de alta calidad de audio.
- Trabajo desde el hogar (home-working).
- Servicios de telefonía integrados con ordenador: venta de billetes con cargo automático a tarjetas de crédito, telemarketing, mensajería, estadísticas, análisis de audiencias.

Aparte de los servicios mencionados existen además otros servicios suplementarios, para su uso en combinación con servicios básicos o tele-servicios.

2.6.2. GSM

El GSM nació en 1982, cuando la Conferencia Europea de Administraciones de Correos y Telecomunicaciones (CEPT) tomó dos decisiones.

- La primera fue crear un equipo, con el nombre de GSM (Groupe Special Mobile), cuya misión era desarrollar un conjunto de estándares para una futura red de comunicaciones móviles dentro del ámbito europeo.
- La segunda fue recomendar la reserva de dos sub-bandas de frecuencia próximas a 900 Mhz para este sistema.

La arquitectura GSM distingue claramente dos partes: el BSS (Base Station Subsystem o Subsistema de Estación de Base) y el NSS (Network and Switching Subsystem o Subsistema de Red y Conmutación). El BSS está encargado de proporcionar y gestionar el interfaz radio entre las estaciones móviles y el resto del GSM. El NSS debe gestionar las comunicaciones y conectar las estaciones móviles a las redes adecuadas o a otras estaciones móviles. El NSS no está en contacto directo con las estaciones móviles y el BSS tampoco está en contacto directo con otras redes externas.

El interfaz entre el BSS y la estación móvil es el denominado interfaz radio (Um) mientras que el interfaz entre el BSS y el NSS se ha denominado interfaz A en las especificaciones.

2.6.2.1. Subsistemas de Radio

En términos generales, el Subsistema de radio, Subsistema de Estaciones de Base o BSS agrupa las máquinas específicas a los aspectos de radio y celulares del GSM. El BSS está en contacto directo con las estaciones móviles a través del interfaz radio. Como tal, incluye los elementos a cargo de la transmisión y recepción del trayecto radio y la gestión del mismo. Por otro lado, el BSS está en contacto con las centrales de conmutación del NSS. La función del BSS se puede resumir como la conexión entre estaciones móviles y el NSS y, por tanto, la conexión entre un usuario móvil con otro usuario de telecomunicaciones.

El BSS incluye dos tipos de elementos: la Estación de Base (BTS, Base Transceiver Station), en contacto con las estaciones móviles a través del interfaz radio, y el Controlador de Estaciones de Base (BSC, Base Station Controller), este último en contacto con las centrales de conmutación del NSS. La división funcional es básicamente entre un equipo de transmisión, la BTS, y un equipo de gestión, el BSC.

Una BTS contiene dispositivos de transmisión y recepción, incluyendo las antenas, y también el procesado de señal necesario para el interfaz de radio. La BTS pueden considerarse como módems de radio complejos, teniendo pocas funciones adicionales.

El interfaz radio del GSM utiliza una combinación de Acceso Múltiple por División en Frecuencia (FDMA) y Acceso Múltiple por División en el Tiempo (TDMA), con una pizca de Salto en Frecuencia (FH, Frequency Hopping).

El concepto básico es que la unidad de transmisión es una serie de bits modulados y se denomina ráfaga. Las ráfagas se envían en ventanas de frecuencia y tiempo que denominamos ranuras o slots. Las frecuencias centrales de los slots se sitúan cada 200 KHz en la banda de frecuencias del sistema (aspecto FDMA), y ocurren durante 0.577ms, o más exactamente 15/26 ms (aspecto TDMA).

Con esta unidad básica, asumiendo una sola ventana de frecuencias, el aspecto TDMA del sistema de transmisión se agrupa en tramas, multitramas e hipertramas, organizándose así el envío de información por el aire.

Dentro de esta organización, se agrupan los distintos canales lógicos soportados en el sistema GSM para el transporte de información entre usuarios, o sencillamente información de control del propio sistema.

De acuerdo con la información transportada, se definen dos tipos de canales lógicos: canales de control y canales de tráfico. Los canales de tráfico se utilizan exclusivamente para transportar la información del usuario. El uso principal de los canales de control es transferir la información de señalización. Los canales de control pueden dividirse en canales de control comunes y canales de control dedicados.

2.6.3. xDSL

xDSL es un nombre genérico para una variedad de tecnologías de DSL (Digital Subscriber Line, línea de suscriptor digital) como ADSL, SDSL, VDSL, etc. desarrollada en la década de 1980 para ofrecer a las compañías de telefonía un medio dentro de la industria de la televisión por cable al proporcionar demanda de vídeo en las líneas de teléfono regulares. Aunque xDSL precede el servicio de módem por cable por un par de años, su empleo casi se ha limitado a las pruebas de campo. La tecnología carece de normas para toda la industria.

Las tecnologías de DSL son muy rápidas pues ofrecen velocidades de carga de hasta 32Mb y velocidad de descarga que va de 32Kb hasta más de 1Mb, lo cual puede probar buena suerte para compañías que buscan ofrecer acceso de alta velocidad a Internet.

La xDSL tiene varias similitudes con la ISDN. Ambas tecnologías requieren que las líneas telefónicas de cobre estén "limpias" de electricidad, y las dos pueden operar solo en líneas que tienen corridas relativamente cortas hacia la oficina central de la compañía de teléfonos. Dado que la xDSL se basa en teléfono, es más probable que el cable este disponible en áreas donde solo hay negocios.

En la mayor parte de los casos, la xDSL puede operar en cables telefónicos de par retorcido de grado de voz sin afectar la conexión de servicio de telefonía obsoleto (POTS), lo cual significa que las compañías de telefonía locales no tendrán que operar líneas adicionales para proporcionar el servicio de xDSL. En la actualidad muy pocas compañías telefónicas han escalado la plataforma para ofrecer servicio de xDSL.

Algunas compañías de teléfono están planeando ofrecer el servicio de xDSL de punto por punto, en gran parte porque en este momento ofrecen servicios de línea rentada de T1 y T3. Las compañías técnicamente inteligentes incluso pueden crear sus propias WAN de xDSL, si rentan líneas de una compañía de teléfonos local y las conectan a su propio equipo de xDSL.

2.6.4. GPRS

GPRS (Global Packet Radio Service) es una evolución no traumática de la actual red GSM: no conlleva grandes inversiones y reutiliza parte de las infraestructuras actuales de GSM. Por este motivo, GPRS tendrá, desde sus inicios, la misma cobertura que la actual red GSM.

GPRS es una tecnología que subsana las deficiencias de GSM:

- Velocidad de transferencia de hasta 144 Kbps.
- Conexión permanente. Tiempo de establecimiento de conexión inferior al segundo.
- Pago por cantidad de información transmitida, no por tiempo de conexión.

GPRS puede combinar hasta 8 canales para transferir datos, y cada canal puede transferir a una velocidad de 10 Kbps, aproximadamente. Los nuevos terminales GPRS contarán con diversas prestaciones en función del número de canales que utilicen. Debido a esto, contaremos con terminales 2 + 1 (que significa dos canales para recibir información y un canal para el envío), 3 + 1, 4 + 1, etc. También habrá terminales que permitirán transferir datos y mantener, al mismo tiempo, una llamada de voz. El uso de GPRS no se limita sólo a los teléfonos móviles; aparecerán tarjetas PCMCIA GPRS para conectar portátiles a Internet, tarjetas para conectar el ordenador de sobremesa, etc.

El uso de nuevos terminales GPRS como módem inalámbrico tendrá una aplicación inmediata y evidente. Los podremos conectar a ordenadores portátiles o de sobremesa como cualquier módem, pero, evidentemente, con las ventajas de ser inalámbrico.

Cuando se accede a servicios directamente desde nuestro terminal, la velocidad de transferencia, a diferencia de lo que puede parecer, no es el factor determinante. Tener una conexión permanente a Internet (lo que se traduce en acceder a servicios de manera casi instantánea) o el hecho de no estar pagando por tiempo de conexión son factores más relevantes que la velocidad de transmisión. Pero, por encima de todo, lo más importante es, sin duda, poder disponer de todos esos servicios.

La evolución natural de GPRS es UMTS (Universal Mobile Telephony System).

2.6.5. UMTS

UMTS (Universal Mobile Telecommunication System) requiere una nueva tecnología de radio (grandes inversiones en infraestructuras), una red de mayor capacidad (debido a que las velocidades de transferencia varían de 384 Kbps a 2 Mbps) y nuevos terminales. Estos factores hacen prever que UMTS tardará un cierto tiempo en establecerse y que GPRS, dada su mayor cobertura, mantendrá un uso elevado. Hay que ambas tecnologías no son excluyentes entre sí, de hecho las operadoras piensan ofrecer UMTS en los núcleos urbanos y dejar el GPRS para el resto de zonas (carreteras, grandes áreas rurales, etc).

Las últimas noticias confirman que, en Alemania, los operadores con licencia UMTS, y con objeto de ahorrar costes en gran parte disparados por los elevados precios que han tenido que pagar por las licencias obtenidas en las subastas, han decidido compartir sus infraestructuras de red. UMTS presenta, sin embargo, una limitación en la tasa de datos, que se eleva hasta un máximo de 2 Mbps cuando el terminal está fijo y a cierta distancia de la estación base. Esta velocidad impide la transmisión de vídeo de alta calidad, pero resulta suficiente para un servicio de videoconferencia con calidad limitada.

Actualmente, el desarrollo y despliegue de UMTS avanza lentamente, debido en parte al temprano estado de definición de la tecnología y al endeudamiento de los operadores por los elevados desembolsos que han tenido que afrontar para adquirir las licencias concedidas mediante el procedimiento de subasta en Europa, lo que está repercutiendo negativamente en las empresas del sector.

2.6.6. LMDS

LMDS (Local Multipoint Distribution System) ofrece, por su parte, unas prestaciones muy similares a las presentadas por los sistemas de cable, pero con las ventajas propias de los sistemas radioeléctricos. Entre ellas, se puede mencionar su menores costes de inversión inicial y tiempo de despliegue (varios meses, frente a cuatro o cinco años de una red HFC), así como las necesidades de obra civil sensiblemente inferiores (no es necesario levantar calles ni abrir zanjas para introducir el cableado, ni pedir los permisos pertinentes). Además, las inversiones se pueden acometer de forma proporcional al número de clientes: el mayor coste está en los equipos de usuario, que se van añadiendo a medida que se abonan al sistema, con lo que el riesgo en la inversión es menor. Asimismo, se trata de sistemas fácilmente escalables, ya que para aumentar su capacidad basta con añadir los transmisores necesarios, y permiten cubrir fácilmente zonas remotas o de difícil acceso, convirtiéndose así en un complemento ideal de los sistemas cableados en áreas dispersas o muy alejadas que no son rentables.

Pero no todo son ventajas en LMDS. El hecho de que aún no exista un estándar está retardando las economías de escala, y el operador se ve obligado a amoldarse a sistemas propietarios que no siempre serán compatible con otros sistemas o equipos. Por otra parte, la necesidad de línea de visión directa en los sistemas de alta frecuencia supone un problema en las ciudades, y obliga a situar repetidores adicionales para evitar las zonas de sombra. Igualmente, si bien son más económicos que los sistemas de cable, en zonas rurales escasamente pobladas pueden suponer un desperdicio del ancho de banda, con el consiguiente aumento de costes. Es decir, que son más baratos relativamente, por lo que seguirá habiendo zonas que económicamente no compensa cubrir mediante LMDS.

2.6.7. Satélite

Estos sistemas presentan como principal ventaja su cobertura global. Aún no tienen rival para cubrir extensas zonas de carácter desértico, selvático u oceánico, e incluso en regiones con muy bajo nivel de infraestructuras de telecomunicaciones -pues la infraestructura terrestre requerida es mínima, máxime si los satélites cuentan con procesamiento a bordo o enlaces intersatelitales ISL-, utilizados principalmente para difusión de televisión a gran escala, a nivel nacional o continental. Apenas existen zonas de sombra y en algunos casos permiten movilidad.

Actualmente, la mayoría de los sistemas de satélite que están operando lo hacen en órbitas geoestacionarias, con lo que el retardo que experimenta la señal al recorrer los casi 36.000 kilómetros que separan la Tierra de la órbita de Clark (casi un cuarto de segundo) limita el uso de estos satélites en aplicaciones de tiempo real, tales como la videoconferencia o los servicios de voz, pues, al superar el retardo máximo permitido, la calidad del servicio no es la adecuada. Intentos con constelaciones de órbita baja como Iridium, que ofrece servicio de

telefonía -y recientemente también transmisión de datos- a nivel mundial, fracasaron en un principio al cobrar unos precios por llamada excesivamente elevados (del orden de 800 pesetas minuto) como para que el usuario estuviera dispuesto a pagarlos a cambio de una cobertura global, cuando la cobertura de telefonía celular en gran parte de los países desarrollados llega a cotas cercanas al 100%. Sin embargo, y pese al precedente de Iridium y el consiguiente parón en otros proyectos similares por falta de patrocinadores, el espacio sigue apareciendo como un medio atractivo para las comunicaciones interactivas y de banda ancha, tal y como muestra la intención de Teledesic de continuar con su proyecto de instalar una red de banda ancha espacial.

2.7. Conclusiones

Existen varias tecnologías que ofrecen banda ancha en la actualidad, sin embargo las que tienen una mayor prospección para el futuro son las tecnologías inalámbricas, hay varias ventajas sobresalientes que sirven para inclinarse hacia la tecnología sin cables.

Los sistemas cableados tardan más tiempo en promedio para ofrecer toda la gama de los servicios. El tiempo de instalación de toda la infraestructura cableada puede durar por lo regular desde muchos meses hasta años con una razón de clientes potenciales del 70%, lo cual implica muchos gastos previos por el largo tiempo transcurrido en la instalación total del sistema.

En contraste, la gran mayoría de los sistemas inalámbricos pueden ser instalados en unos cuantos meses con una razón de clientes potenciales del 90%. Otra de las ventajas de las tecnologías inalámbricas es que pueden ser llevadas a áreas de difícil acceso geográfico y así ofrecer servicios a comunidades marginadas y alejadas, lugares donde los medios cableados son más difíciles de ofertarse.

Otra ventaja de los sistemas inalámbricos es que son adaptables al tráfico, es decir, pueden instalarse menos radio bases separadas a más distancia entre ellas en lugares donde el tráfico sea menor. De la misma manera, pueden instalarse más radio bases a más corta distancia entre ellas en lugares donde hay mucho tráfico como por ejemplo la zona metropolitana en una ciudad.

En general las comunicaciones vía inalámbrica proveen beneficios adicionales que no proveen los sistemas cableados. El público determinará cuales servicios son los más adecuados a sus necesidades, y desechará aquellos servicios que no le satisfagan. Es muy importante para el usuario final conocer sobre la tecnología que está detrás del servicio que el proveedor de servicios de telecomunicaciones. Así tendrá una visión más clara de las bondades o limitantes, así como la calidad del servicio que le están ofreciendo.

En el presente trabajo estudiaremos las redes inalámbricas de banda ancha (BWA), basándonos en el protocolo IEEE 802.16.

En el próximo capítulo se analizará con más detalle el funcionamiento de las redes inalámbricas de banda ancha, sus principales características descritas en el 802.16, su control de acceso al medio y en general el comportamiento dinámico de esta tecnología inalámbrica que en los años recientes ha sido estudiada con mayor atención en el mundo de las telecomunicaciones.

Capítulo 3

Descripción del Protocolo de Comunicaciones IEEE 802.16

3.1. Introducción

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

El protocolo IEEE 802.16 atiende estas necesidades mediante su descripción del funcionamiento de la subcapa MAC. El esquema presentado consiste en el envío periódico de mensajes de control desde la Estación Base (BS, Base Station) que determinan el tipo de transmisiones que podrán realizarse durante un intervalo futuro. Este método se lleva a cabo mediante la combinación de TDMA (Acceso Múltiple por División de Tiempo) y DAMA (Acceso Múltiple por Asignación de Demanda).

Las estaciones suscriptoras (SS, Subscriber Station) cuentan con periodos específicos durante los cuales intentan hacer solicitudes de asignación de ancho de banda, proceso conocido como Contención. A su vez, la BS responde, siempre que no haya ocurrido alguna colisión u otro tipo de error en la comunicación, mediante oportunidades exclusivas de transmisión asignadas a alguna conexión específica. Cabe señalar que el Protocolo introduce funciones que permiten a la BS contar con criterios que le permitan asignar las

oportunidades de transmisión diferenciadamente, lo cual significa que están contemplados los conceptos de Calidad de Servicio (QoS).

El proceso descrito anteriormente constituye la operación fundamental de la capa MAC del Protocolo, sin embargo, también se indican otras características que permiten hacer más robusta, versátil y dinámica la tecnología BWA. En primer lugar, se incluye un método de resolución de colisiones basado en el algoritmo exponencial Backoff, capaz de reducir los periodos de contención desperdiciados por el envío concurrente de paquetes de información o de mensajes de solicitud de asignación de ancho de banda desde equipos distintos.

Por otra parte, la optimización del uso del canal inalámbrico se mejora mediante las solicitudes anidadas en los paquetes de información durante una transmisión en periodos garantizados (solicitudes Piggyback), eliminando la necesidad de emplear las regiones de contención una vez que el sistema ha operado durante cierto tiempo. También se han definido distintos servicios ofrecidos a las SS's considerando el tipo de tráfico generado por cada una de ellas, lo cual permite distinguir las transmisiones en tiempo real, aquellas en las que se generan paquetes de información periódicamente, o bien con longitud constante, etc. Se han incorporado además funciones de cifrado en la subcapa de Privacidad, para mantener la confidencialidad de la información.

Éstas y otras funciones constituyen en conjunto una tecnología capaz de ofrecer servicios óptimos en diversos escenarios de operación. A lo largo de esta sección se describirán algunas de las especificaciones más importantes del Protocolo, así como su operación típica.

3.2. Operación del Protocolo IEEE 802.16

3.2.1. Direccionamiento y definición de tipo de conexiones

Las Estaciones Suscriptoras están identificadas por una dirección única de 48 bits de la capa MAC. Esta dirección permite distinguir las tomando en cuenta tanto el fabricante como el tipo de equipo, por lo que también se les considera como direcciones universales. Se emplea durante los procesos de registro así como en los de autenticación. Durante el registro, la dirección MAC permite a la Estación Base el establecimiento de todas las conexiones apropiadas que correspondan a una Estación Suscriptora en particular. Por otro lado, durante el proceso de autenticación la dirección MAC es requerida para la identificación mutua tanto de la Estación Base como de la Estación Suscriptora.

La proporción de servicios de conectividad es posible mediante conexiones realizadas entre la Estación Base y la Estación Suscriptora. Dichas conexiones se identifican mediante el CID (Connection ID), que consta de 16 bits, permitiendo hasta 65 536 conexiones en cada canal ascendente y descendente.

Durante la inicialización de los servicios, la Estación Base proporciona 3 conexiones en ambas direcciones mediante los mensajes de control RNG-RSP y REG-RSP, cada conexión cuenta con parámetros distintos de QoS y sus características son las indicadas a continuación:

- Conexión Básica (Basic Connection). Empleada para la transmisión de mensajes cortos y urgentes de control MAC.
- Conexión Primaria (Primary Connection). Soporta el envío de mensajes de control MAC más largos y con mayor tolerancia a la latencia.
- Conexión Secundaria (Secondary Connection). Permiten la transmisión de mensajes de control con mayor tolerancia a los retrasos y basados en estándares como DHCP, TFTP, SNMP, etc.

El CID funciona como un apuntador hacia el destino de cada conexión y también proporciona información acerca del contexto en la que se realiza. El tipo de servicio que la Estación Base brinda está implícito en el CID. Adicionalmente, cada solicitud de asignación de ancho de banda que realizan las Estaciones Suscriptoras está basada en el CID, por lo que el ancho de banda disponible será distinto para conexiones diferentes. Adicionalmente, es posible que una sola conexión soporte tráfico proveniente de distintas sesiones de capas superiores.

3.2.2. Formatos de los paquetes de transmisión MAC

El transporte de la información a través de la capa MAC IEEE 802.16 se realiza mediante el procesamiento de los paquetes provenientes del Punto de Acceso al Servicio de la Subcapa de Convergencia. Dicho procesamiento consiste en la agregación de encabezados de control de 6 bytes. Se distinguen dos tipos de encabezados, Genérico y de Solicitud de Ancho de Banda.

- 1) Encabezado Genérico. Generado para los paquetes que incluyen información de usuario o de control. Puede contener información indicando que se ha agregado un subencabezado, aplicable en el caso de las transmisiones de paquetes de control, o bien cuando se emplean las funciones de fragmentación, concatenación o empaquetamiento, descritas más adelante. Su formato es el que se muestra en la figura 3-1 y la descripción de sus campos es la indicada en la tabla 3-1.

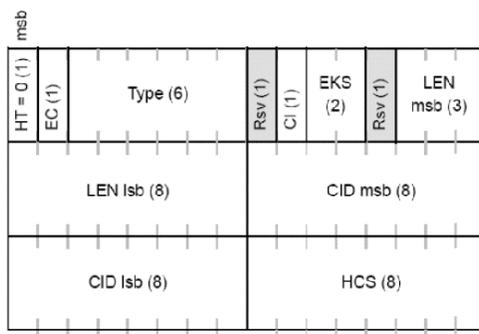


Figura 3-1: Formato del Encabezado MAC Genérico.

Campo	Nombre	Descripción
HT	Tipo de Encabezado (Header Type)	Debe tener el valor 0, indicando que el encabezado corresponde al tipo Genérico
EC	Control de Cifrado (Encryption Control)	Indica si se el encabezado se ha encriptado
Type	Tipo	Indica el tipo de carga útil (payload) incluida en el paquete
CI	Indicador CRC (CRC Indicator)	Indica si se ha empleado la Verificación de Redundancia Cíclica (Cyclic Redundancy Check) para el control de errores
EKS	Secuencia de Llave de Cifrado (Encryption Key Sequence)	Índice de la Llave de Cifrado y del Vector de Inicialización
LEN	Longitud	Longitud del paquete en bytes incluyendo el encabezado MAC
CID	Identificador de Conexión (Connection Identifier)	Empleado para identificar la conexión generadora del paquete
HCS	Secuencia Verificadora de Encabezado (Header Check Sequence)	Palabra empleada para identificar errores en el encabezado

Tabla 3-1: Campos del Encabezado MAC Genérico.

El campo Type puede tener los valores indicados en la tabla 3-2 de acuerdo con el canal desde donde se realiza la transmisión.

Canal	Valor	Descripción
Descendente (Downlink)	0	Sin subencabezados
	2	Subencabezado de empaquetamiento
	4	Subencabezado de fragmentación
	1, 3, 5 – 63	Reservado
Ascendente (Uplink)	0	Sin subencabezados
	1	Subencabezado de Control de Asignación de Ancho de Banda
	2	Subencabezado de empaquetamiento

	3	Subencabezados de Control de Asignación de Ancho de Banda y de Empaquetamiento
	4	Subencabezado de Fragmentación
	5	Subencabezados de Fragmentación y de Control de Asignación de Ancho de Banda
	6 – 63	Reservado

Tabla 3-2: Valores posibles del campo Type en el Encabezado MAC Genérico.

- 2) Encabezado de Solicitud de Ancho de Banda. Exclusivo para las peticiones de oportunidades de transmisión en el canal de subida. Su formato es el que se muestra en la figura 3-2 y la descripción de sus campos es la indicada en la tabla 3-3.

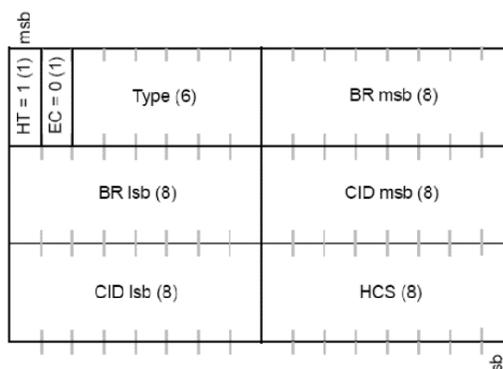


Figura 3-2: Formato del Encabezado MAC de Solicitud de Ancho de Banda.

Campo	Nombre	Descripción
HT	Tipo de Encabezado (Header Type)	Debe tener el valor 1, indicando que el encabezado corresponde al tipo de Asignación de Ancho de Banda
EC	Control de Cifrado (Encryption Control)	Debe tener el valor 0, ya que no es posible cifrar los paquetes de este tipo
Type	Tipo	Indica el tipo de solicitud que se realiza (incremental o agregada)
BR	Bytes solicitados (Bytes Requested)	Tamaño total de la información que desea transmitirse
CID	Identificador de Conexión (Connection Identifier)	Conexión que solicita la asignación de ancho de banda
HCS	Secuencia Verificadora de Encabezado (Header Check Sequence)	Palabra empleada para identificar errores en el encabezado

Tabla 3-3: Campos del Encabezado MAC de Solicitud de Ancho de Banda.

3.2.3. Fragmentación, Concatenación y Empaquetamiento

Para optimizar el uso del canal inalámbrico, se han incluido funciones que disminuyen dinámicamente el overhead agregado en las transmisiones. Se basan en la manipulación de la carga útil para conformar paquetes de longitud controlada. Estas funciones son las siguientes:

- 1) Fragmentación. Los paquetes que exceden la longitud máxima disponible para transmitir pueden ser divididos en otros más pequeños. La capacidad para realizar fragmentaciones se indica al momento de establecer la conexión.
- 2) Concatenación. Diversos paquetes pueden enviarse en una sola transmisión mediante la identificación de la conexión para cada uno de ellos.

- 3) Empaquetamiento. Se emplea para enviar en un solo paquete de información de diversas fuentes provenientes de capas superiores. Está soportado el empaquetamiento de paquetes de longitud fija o variable.

La diferencia entre la concatenación y el empaquetamiento radica en el origen de los paquetes. En el primer caso, se tratan todos de PDU's, generados en la subcapa MAC e identificables por su identificador de conexión, mientras que el empaquetamiento opera sobre SDU's, provenientes del CS SAP.

3.2.4. Paquetes de Control MAC

Los mensajes MAC de Control se envían dentro de la carga útil de un MAC PDU y cuentan con un campo que especifica el tipo de mensaje de control (Management Message Type) así como posibles campos adicionales que varían de acuerdo con el mensaje enviado. A diferencia de los Mensajes de Control MAC que se transmitan mediante conexiones Primarias, aquellas que correspondan a las conexiones Básicas, Broadcast o Initial Ranging no pueden ser fragmentadas ni empaquetadas.

La tabla 3-4 incluye la especificación de los Mensajes de Control MAC. Los mensajes de tipo 0 a 7 se describen en el presente capítulo debido a que son los de mayor uso en esta tesis, la descripción de los mensajes restantes se encuentra en el Apéndice B.

Tipo	Nombre del Mensaje	Descripción	Conexión
0	UCD	Descriptor de Canal Ascendente (Uplink Channel Descriptor)	Broadcast
1	DCD	Descriptor de Canal Descendente (Downlink Channel Descriptor)	Broadcast
2	DL-MAP	Definición de Acceso Descendente (Downlink Access Definition)	Broadcast
3	UL-MAP	Definición de Acceso Ascendente (Uplink Access Definition)	Broadcast
4	RNG-REQ	Solicitud de Ranging (Ranging Request)	Initial Ranging o Básica
5	RNG-RSP	Respuesta de Ranging (Ranging Response)	Initial Ranging o Básica
6	REG-REQ	Solicitud de Registro (Registration Request)	Control Primario
7	REG-RSP	Respuesta de Registro (Registration Response)	Control Primario
8	Reservados		
9	PKM-REQ	Solicitud de Control de Llave de Privacidad (Privacy Key Management Request)	Control Primario
10	PKM-RSP	Respuesta de Control de Llave de Privacidad (Privacy Key Management Response)	Control Primario
11	DSA-REQ	Solicitud de Agregación Dinámica de Servicio (Dynamic Service Addition Request)	Control Primario
12	DSA-RSP	Respuesta de Agregación Dinámica de Servicio (Dynamic Service Addition Response)	Control Primario
13	DSA-ACK	Notificación de Agregación Dinámica de Servicio (Dynamic Service Addition Acknowledge)	Control Primario
14	DSC-REQ	Solicitud de Cambio Dinámico de Servicio (Dynamic Service Change Request)	Control Primario
15	DSC-RSP	Respuesta de Cambio Dinámico de Servicio (Dynamic Service Change Response)	Control Primario
16	DSC-ACK	Notificación de Cambio Dinámico de Servicio (Dynamic Service Change Acknowledge)	Control Primario
17	DSD-REQ	Solicitud de Eliminación Dinámica de Servicio (Dynamic Service Deletion Request)	Control Primario
18	DSD-RSP	Respuesta de Eliminación Dinámica de Servicio (Dynamic Service Deletion Response)	Control Primario
19-20	Reservado		
21	MCA-REQ	Solicitud de Asignación Multicast (Multicast Assignment Request)	Básica
22	MCA-RSP	Respuesta de Asignación Multicast (Multicast Assignment Response)	Básica
23	DBPC-REQ	Solicitud de Cambio de Configuración de Transmisión Descendente (Downlink Burst Profile Change Request)	Básica
24	DBPC-RSP	Respuesta de Cambio de Configuración de Transmisión Descendente (Downlink Burst Profile Change Response)	Básica
25	RES-CMD	Comando de reinicio (Reset Command)	Básica

26	SBC-REQ	Solicitud de Capacidad Básica en Estación Suscriptora (SS Basic Capability Response)	Básica
27	SBC-RSP	Respuesta de Capacidad Básica en Estación Suscriptora (SS Basic Capability Response)	Básica
28	CLK-CMP	Comparación de Reloj de Red en Estación Suscriptora (SS Network Clock Comparison)	Broadcast
29	DREG-CMD	Comando de Término o Renovación de Registro (De/Re-register Command)	Básica
30	DSX-RVD	Mensaje Recibido DSx (DSx Received Message)	Control Primario
31	TFTP-CPLT	Mensaje de Configuración Completada de Archivo TFTP (Config File TFTP Complete Message)	Control Primario
32	TFTP-RSP	Respuesta de Configuración Completada de Archivo TFTP (Config File TFTP Complete Response)	Control Primario
33-255	Reservados		

Tabla 3-4: Mensajes de Control MAC.

3.2.4.1. Mensaje Descriptor de Canal Descendente (DCD)

Enviado periódicamente por al Estación Base, el mensaje DCD especifica las características del canal físico de transmisión descendente mediante los siguientes parámetros:

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

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

- **Número de Canal de RF (RF Channel number).** Desde 0 hasta el número máximo de canales soportados por el sistema.
- **Tasa de Símbolo (Symbol Rate).** 16 a 40 Mbaud.
- **Número de configuraciones activas (Number of active PHY burst profiles).** 1 a 13.
- **Inicio de la región activa en la trama (Start active region in frame).** 0 a 65535 símbolos.
- **Fin de la región activa en la trama (End active region in frame).** 0 a 65535 símbolos.

El Perfil de Transmisión Descendente está compuesto por elementos TLV que definen las características físicas empleadas en un Código de Uso de Intervalo Descendente (DIUC, Downlink Interval Usage Code). Cada uno de estos intervalos están asignados por el mensaje DL-MAP.

3.2.4.2. Mensaje de Mapa Descendente (DL-MAP)

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

- **Sincronización física (PHY Synchronization).** Depende de la especificación de la capa física.
- **Contador DCD (DCD Count).** Indica el valor del contador de cambios del DCD, que describe el Perfil de Transmisión Descendente.
- **Identificador de la Estación Base (Base Station ID).** Consta de 48 bits, de los cuales 24 constituyen un identificador de operación que al combinarse con el Identificador de Canal Descendente del mensaje DCD permite atender situaciones como borde de sector o borde de celda.

- **Número de Elementos (Number of Elements).** Indica la cantidad de Elementos de Información (IE, Information Elements) que están incluidos en el mensaje.

3.2.4.3. Mensaje Descriptor del Canal Ascendente (UCD)

Transmitido periódicamente por la Estación Base, el mensaje UCD indica las características de un canal ascendente en particular. Debe transmitirse uno por cada canal asociado al descendente. Incluye la información indicada a continuación:

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

A continuación, se incluyen los parámetros específicos que describen al canal de acuerdo con una codificación TLV (Tipo-Longitud-Valor), como se muestra en la tabla 3-5.

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

Tabla 3-5: Codificaciones TLV de parámetros descriptores del canal ascendente.

En el caso de los sistemas que emplean la banda de 10 a 66 GHz, los códigos TLV de los mensajes UCD es el mostrado en la tabla 3-6.

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

Tabla 3-6: Codificaciones TLV de los parámetros físicos descriptores del canal ascendente.

3.2.4.4. Mensaje Mapa del Canal Ascendente (UL-MAP)

Proporciona la información relativa al acceso al canal ascendente. Contiene la información siguiente:

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

El CID indica que la asignación del IE se ha hecho hacia una dirección Unicast, Multicast o Broadcast. Cuando el IE se refiere exclusivamente a una asignación de ancho de banda, el CID puede referirse a una SS en particular, o bien a un CID de transporte correspondiente a alguna de las conexiones establecidas por la Estación Suscriptora.

La tabla 3-7 muestra los posibles IEs que pueden incluirse en un Mapa.

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

Tabla 3-7: Elementos de Información (Information Elements, IE) de los mensajes de control Mapa.

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

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

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

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

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

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

3.2.5. Servicio de programación de transmisión ascendente

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

Existen tres funciones que intervienen en la caracterización de los servicios de programación: solicitudes anidadas (PiggyBack), robo de Ancho de Banda (Bandwidth stealing) y consulta (Polling).

- 1) PiggyBack Request. Se trata de solicitudes de asignación de ancho de banda incluidas en los encabezados de los paquetes enviados por las SS durante una transmisión garantizada. Esto es, la SS ha hecho una solicitud previa en el periodo de contención y la BS le ha proporcionado una cantidad específica de minislots de transmisión. Cuando la SS genera tráfico de subida durante este periodo asignado, es posible que aún tenga paquetes por enviar que no habían sido considerados cuando se realizó la asignación. Para evitar hacer una solicitud por contención nuevamente, la SS incluye en los encabezados de los paquetes que se encuentra enviando una solicitud adicional. Esta nueva solicitud tiene carácter preferencial, ya que su recepción en la BS está garantizada, aunque es posible que no se realice la asignación en su totalidad.
- 2) Robo de Ancho de Banda (Bandwidth stealing). Es el empleo de una porción del ancho de banda asignado a una SS para solicitudes adicionales. Este proceso tiene lugar cuando una SS se encuentra operando bajo un esquema de Asignación Garantizada por SS, es decir, que cuenta con oportunidades garantizadas para la transmisión de paquetes. En este caso, es posible que parte de estas oportunidades, destinadas para el envío de datos, se use para realizar solicitudes adicionales de ancho de banda. El término stealing se refiere a que parte de los minislots destinados para enviar información de usuario se usa para hacer solicitudes de ancho de banda.
- 3) Consulta (Polling). Proceso mediante el cual la Estación Base destina a una SS o una conexión oportunidades específicas para el envío de solicitudes de ancho de banda. En este caso, la BS asigna regularmente algunos minislots que la SS puede usar para hacer solicitudes de ancho de banda. Estas oportunidades son independientes de aquellas que se asignan normalmente para las transmisiones de la SS. Adicionalmente, la SS puede indicar que requiere de este servicio.

Las funciones anteriores permiten la clasificación de los servicios de programación para las transmisiones ascendentes, como se describe en la tabla 3-8.

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

Tabla 3-8: Características de los servicios de programación en transmisión ascendente.

3.2.5.1. Servicio Garantizado sin Solicitud (UGS)

El servicio UGS (Unsolicited Grant Service) está definido para el transporte de paquetes de longitud constante bajo un esquema periódico, para la transmisión de voz sobre IP (VoIP), T1, E1, etc. La asignación de oportunidades de transmisión periódica y fija en tiempo real permite reducir tanto la latencia como el overhead, cumpliendo con las demandas de la comunicación en tiempo real. La Política de Solicitud y Transmisión impide a la SS utilizar las oportunidades de contención para la asignación de ancho de banda. Adicionalmente, la BS no podrá proporcionar a la conexión que usa este servicio la oportunidad unicast para realizar solicitudes. Por este motivo, la SS sólo podrá transmitir tráfico constante en oportunidades no solicitadas para esa conexión en particular.

3.2.5.2. Servicio de Propuesta en Tiempo Real (rtPS)

Este servicio está diseñado para la transmisión de paquetes de longitud variable bajo un esquema periódico, como la generación de tráfico de video MPEG. Mediante este servicio se ofrecen oportunidades periódicas unicast que permiten a la SS especificar la longitud deseada para cada una de las asignaciones. Aunque esta indicación puede incrementar el overhead, puede mejorarse la eficiencia en la utilización del canal inalámbrico. La periodicidad de las asignaciones de oportunidades de transmisión debe cubrir los requerimientos del tráfico generado por la SS. Adicionalmente, es posible que la SS emplee el Servicio Garantizado sin Solicitud, sin embargo, no está permitido que emplee la región de contención para el envío de solicitudes de asignación de ancho de banda para esa conexión en particular.

3.2.5.3. Servicio de Propuesta no en Tiempo Real (nrtPS)

El tráfico soportado por este servicio consiste en paquetes de longitud variable transmitidos periódicamente pero que no requieren minimización de la latencia, es decir, no corresponden a una comunicación en tiempo real. Un caso típico de este tipo de tráfico son las transferencias de archivos FTP con altos requerimientos de ancho de banda. La BS deberá proporcionar periódicamente, durante intervalos menores a un segundo, oportunidades de transmisión para la SS, aún en el caso de congestión en la red. De acuerdo con la Política de Solicitud/Transmisión, en este servicio la SS puede emplear los intervalos de contención para hacer solicitudes adicionales de ancho de banda, así como oportunidades unicast y del tipo UGS.

3.2.5.4. Servicio de Mejor Esfuerzo (BE)

Mediante este servicio se procura proporcionar, de la manera más eficiente posible, oportunidades de transmisión para el tráfico que no impone rangos máximos de latencia y overhead, característico del tráfico intermitente IP. En este caso, la SS puede emplear cualquier tipo de oportunidad para realizar solicitudes de asignación de ancho de banda, como son las regiones de contención, las oportunidades unicast y el servicio UGS.

3.2.6. Mecanismos de Solicitud y Asignación de Ancho de Banda

Con la finalidad de tener acceso al canal inalámbrico, cada una de las Estaciones Suscriptoras participa en un mecanismo de solicitud de ancho de banda a través del cual se indica a la Estación Base la necesidad de incrementar o disminuir los requerimientos de ancho de banda, de acuerdo con el tipo de tráfico generado. Lo anterior no aplica para el tipo de servicio UGS, ya que la transmisión periódica de paquetes de longitud constante, generalmente para el soporte de comunicaciones en tiempo real o de canales T1, implica que se garantice un acceso sin variaciones mientras dure la conexión respectiva.

Los mecanismos mediante los cuales las Estaciones Suscriptoras solicitan a la Estación Base la asignación de ancho de banda de acuerdo con los requerimientos específicos de cada conexión se conoce como Acceso Múltiple por Asignación de Demanda (DAMA, Demand Assigned Multiple Access). Cada una de las Estaciones Suscriptoras envía mensajes para solicitar la reservación de minislots en el canal ascendente. Las oportunidades de transmisión requeridas dependen del tipo de tráfico generado así como los parámetros de QoS especificados durante el establecimiento inicial de la conexión. Existen distintos métodos empleados por las Estaciones Suscriptoras para realizar sus peticiones: Solicitudes, Reservaciones por Conexión, Reservaciones por Estación Suscriptora y Consulta.

3.2.6.1. Solicitudes

Las solicitudes consisten en mensajes enviados por las Estaciones Suscriptoras hacia la Estación Base para solicitar la reservación de ancho de banda en el canal ascendente para la transmisión de datos. Debido a las características dinámicas del canal inalámbrico, las solicitudes se expresan en términos de bytes sin tomar en cuenta el overhead de la capa física. Pueden transmitirse durante el periodo de contención de Solicitud de Ancho de Banda, o bien aprovechando algún periodo asignado por la Estación Base para la conexión o estación en particular. Lo anterior se logra mediante el envío de mensajes generados únicamente para ese fin (Mensajes de Solicitud de Ancho de Banda, descritos en la sección Formatos de los Paquetes de Transmisión MAC). Las solicitudes realizadas durante una región reservada se realizan mediante los subencabezados de solicitudes Piggyback.

Las solicitudes Piggyback permiten optimizar el uso del canal inalámbrico, ya que reducen la posibilidad de ocurrencia de colisiones durante el envío múltiple de solicitudes de asignación de ancho de banda por varias Estaciones o Conexiones. De esta forma, en un mismo mensaje transmitido para el envío de información durante un periodo reservado, también puede incluirse una nueva petición de asignación para futuras transmisiones de acuerdo con los requerimientos particulares en la información generada.

Por otra parte, las Solicitudes pueden ser Incrementales o Totales, lo cual se indica en el campo Tipo del encabezado del Mensaje de Solicitud de Ancho de Banda. Puesto que los subencabezados para las peticiones Piggyback no cuentan con el campo Tipo, se ha definido que siempre serán del tipo Incrementales. La Estación Base cuenta con un registro de las peticiones realizadas por cada Estación Suscriptora o Conexión. En el caso de las Solicitudes Incrementales, este registro del ancho de banda solicitado sólo se modifica de acuerdo con los mensajes enviados, es decir, cada Estación Suscriptora o Conexión indica que a la cantidad de bytes requeridos anteriormente es necesario agregar otra cantidad como lo indique la Solicitud Incremental. En el caso de las Solicitudes Totales, la Estación Base renueva su registro del ancho de banda solicitado por la Estación Suscriptora o Conexión, de acuerdo con la última petición enviada, sin importar que del ancho de banda requerido anteriormente sólo se haya reservado una porción. Debido a las características dinámicas del canal, la Estación Base puede requerir que se generen Solicitudes Totales bajo un esquema periódico, lo cual dependerá de los parámetros de QoS para un servicio en particular, así como de las características del canal.

Cabe mencionar que las Solicitudes realizadas durante las regiones de Contención siempre deberán ser Totales.

3.2.6.2. Modo de Asignación por Conexión (GPC)

Las Asignaciones por Conexiones (Grant per Connection) se especifican para un CID en particular. Generalmente una Estación Suscriptora cuenta con diversas conexiones activas durante su operación, por lo que las GPCs pueden implicar que en algunos casos sea necesario reprogramar la transmisión del tráfico generado por alguna de sus conexiones o, inclusive, descartarla. Lo anterior se debe a que para una conexión específica es posible que no se garantice el que siempre cuente con reservaciones, o bien, que éstas no sean suficientes. La operación de las GPCs es el indicado en la figura 3-3.

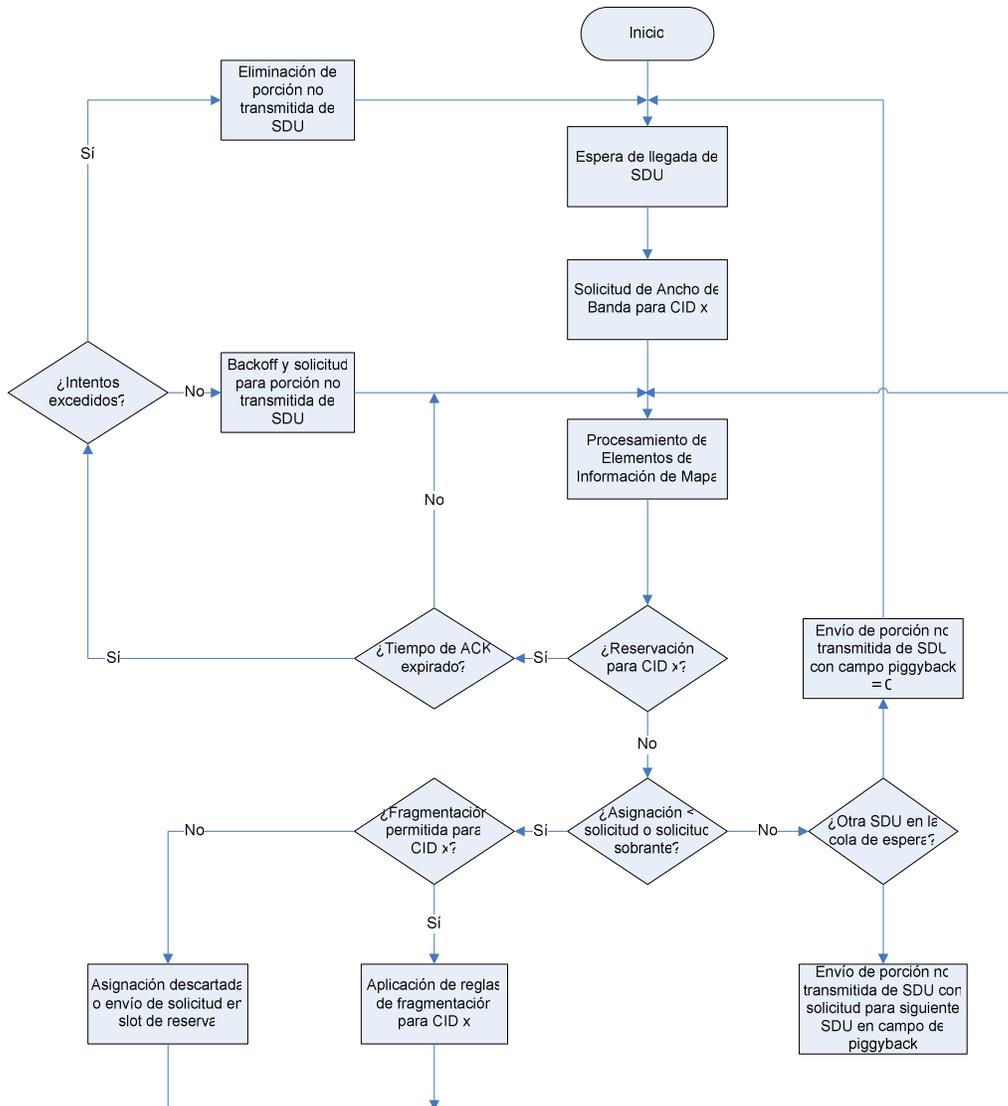


Figura 3-3: Flujo de SS en modo GPC.

3.2.6.3. Modo de Asignación por Estación Suscriptora (GPSS)

Cuando una Estación Suscriptora opera en el modo GPSS (Grant per Subscriber Station), las Asignaciones realizadas por la Estación Base se generan con base en el CID básico de la Estación Suscriptora. Esto permite que la SS pueda establecer cuál o cuáles de las conexiones a las que atiende podrán contar con la reservación o parte de ella, mejorando la eficiencia en la transmisión, ya que pueden realizarse decisiones inmediatas conforme varía la demanda del acceso al canal inalámbrico con cada una de las conexiones establecidas a través de la Estación Suscriptora.

Al igual que en el modo GPC, las asignaciones hechas para una SS están sujetas a no cumplir con los requerimientos del tráfico generado en ella, por lo que también pueden descartarse las reservaciones recibidas o, bien, reenviar una solicitud y considerar la anterior como ignorada. La operación del modo GPSS es el que se muestra en la figura 3-4.

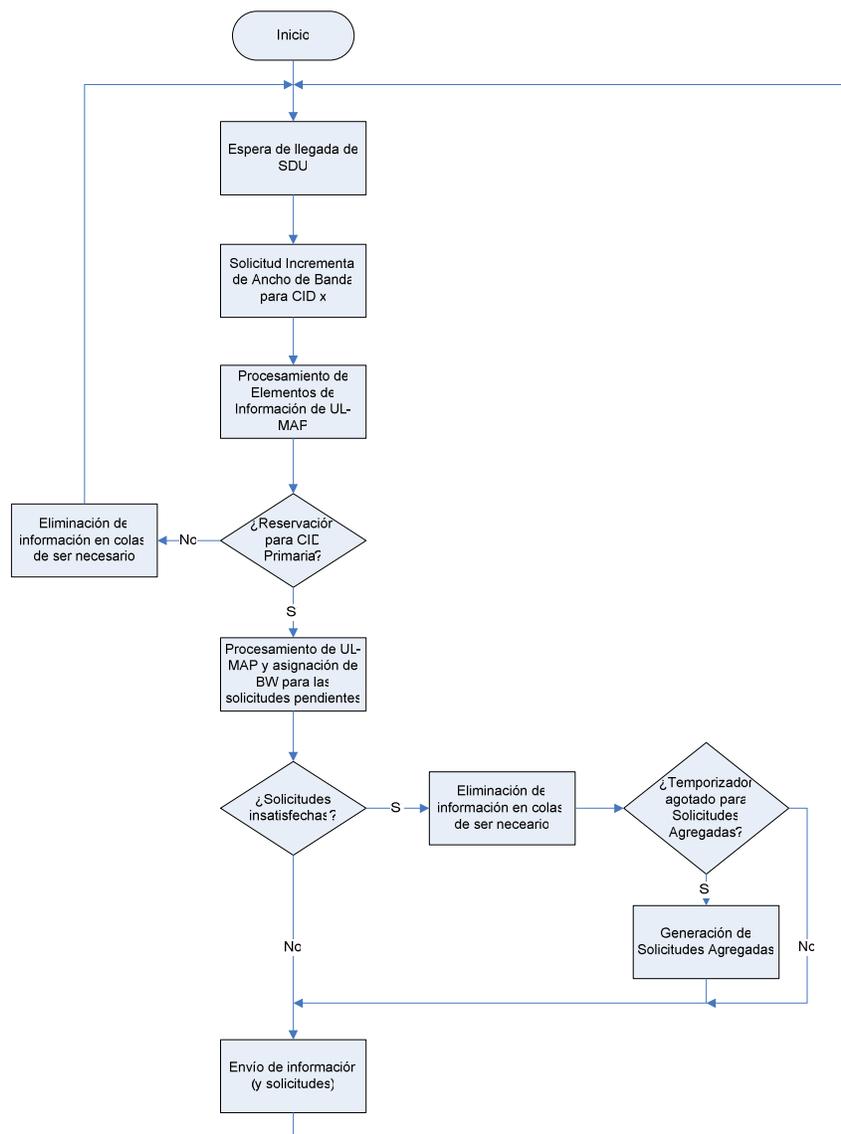


Figura 3-4: Flujo de SS en modo GPSS.

3.2.6.4. Consulta (Polling)

Mediante las Consultas, la Estación Base establece periodos para la transmisión en el canal ascendente destinados exclusivamente para que las Estaciones Suscriptoras envíen solicitudes de asignación de Ancho de Banda. Dichos periodos se definen mediante los correspondientes IE dentro de los Mapas para el canal de subida, es decir, la Estación Base no envía mensajes exclusivos para indicar la presencia de este tipo de oportunidades.

Las asignaciones de estas oportunidades pueden realizarse para una SS en particular (Unicast) o para un grupo de ellas o de conexiones (Multicast). En este último caso, las estaciones o conexiones involucradas participarán de hecho en contenciones para conseguir el envío de sus solicitudes. De acuerdo, entonces, con el tipo de Consulta, la asignación podrá ser del tipo GPC o bien GPSS.

A continuación se definirán las características particulares para las Consultas Unicast y Multicast.

3.2.6.4.1. Consulta Unicast

Cuando se establece una Consulta Unicast para una SS en particular, la Estación Base incluye en el Mapa descriptor del canal ascendente una oportunidad exclusiva para la SS que podrá ser empleada sólo para solicitar ancho de banda. No es necesario que la SS siempre utilice esta oportunidad. Por otra parte, es posible que la SS se encuentre operando bajo el esquema UGS, por lo que, de acuerdo con la definición de este tipo de servicio, no podrá ser Consultada para contar con oportunidades adicionales para solicitar ancho de banda a menos que lo indique mediante el bit Poll Me dentro del encabezado de alguno de los paquetes UGS que envíe. La operación de la Consulta Unicast se muestra en la figura 3-5.

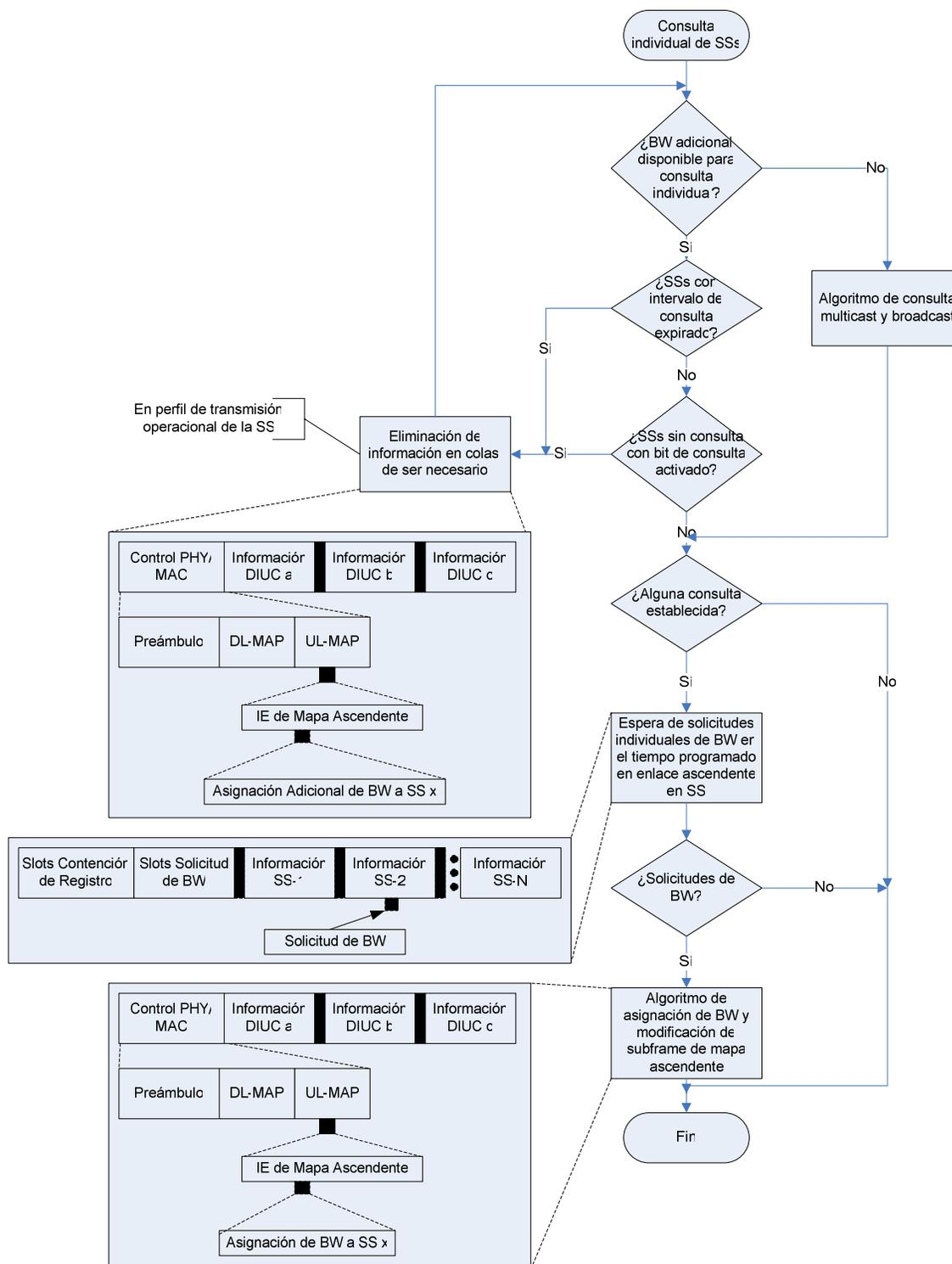


Figura 3-5: Consulta Unicast.

3.2.6.4.2.Consulta Multicast o Broadcast

Cuando la Estación Base no cuenta con ancho de banda suficiente para proporcionarlo a cada una de las Estaciones Suscriptoras a las que atiende, puede emplear Consultas realizadas a un grupo de SSs. Estos grupos se identifican mediante CIDs exclusivos y las oportunidades que reciben se especifican mediante el Mapa descriptor del canal ascendente. Las Estaciones Suscriptoras involucradas sólo envían solicitudes si lo necesitan, participando en contenciones con las otras SS de su grupo. Debido a que se encuentran sujetas a la ocurrencia de colisiones, emplean el algoritmo exponencial backoff tanto para determinar el minislot en el que enviarán su solicitud como para reprogramarla en el caso de haberse presentado una colisión. Las solicitudes se considerarán exitosas sólo si en algún futuro Mapa descriptor del canal ascendente se incluye una reservación para la CID en cuestión. El parámetro Random Access Timeout, incluido en el mensaje Descriptor del Canal Ascendente UCD, indica cuántos Mapas esperará la Estación Suscriptoras que ha hecho una solicitud en contención antes de considerarla fracasada. La operación de las Consultas Multicast o Broadcast se muestran en la figura 3-6.

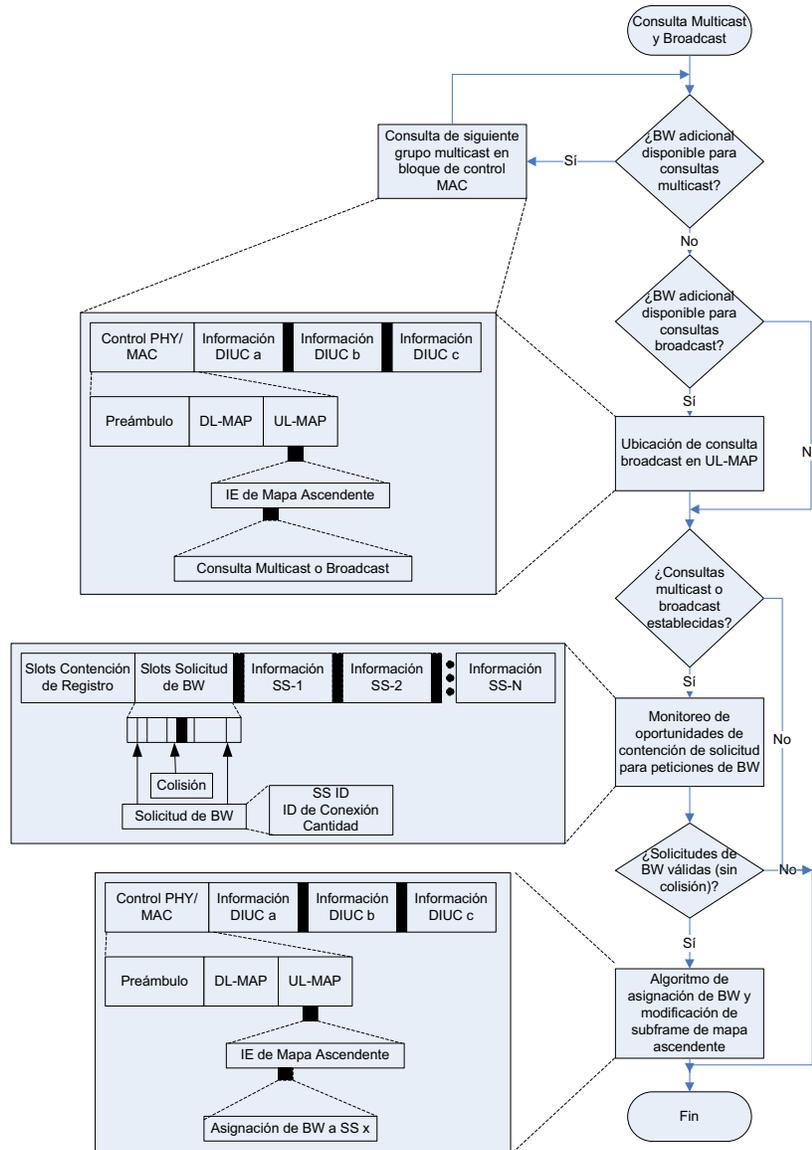


Figura 3-6: Consulta Multicast y Broadcast.

3.2.7. 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 un 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 Estación Base 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 indicado a continuación y se muestra mediante un ejemplo en la figura 3-7:

- 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 Estación Suscriptora esperará la cantidad de minislots indicados por el número generado anteriormente. Es posible que la Estación Suscriptora 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 Estación Suscriptora, se intentará hacer una nueva transmisión, también sujeta a la ocurrencia de Colisiones.
- 4) La Estación Suscriptora 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 Descriptor de Canal Ascendente.
 - Reciba el mensaje RNG-RSP que corresponde a la respuesta de la Estación Base cuando la SS ha enviado un mensaje RNG-REQ durante el periodo de Mantenimiento InicialSi se cumple cualquiera de las dos condiciones anteriores que aplique, la Estación Suscriptora 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 Estación Suscriptora 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 Estación Suscriptora 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 Estación Base, cuando ha ocurrido una Colisión, la Estación Suscriptora 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.

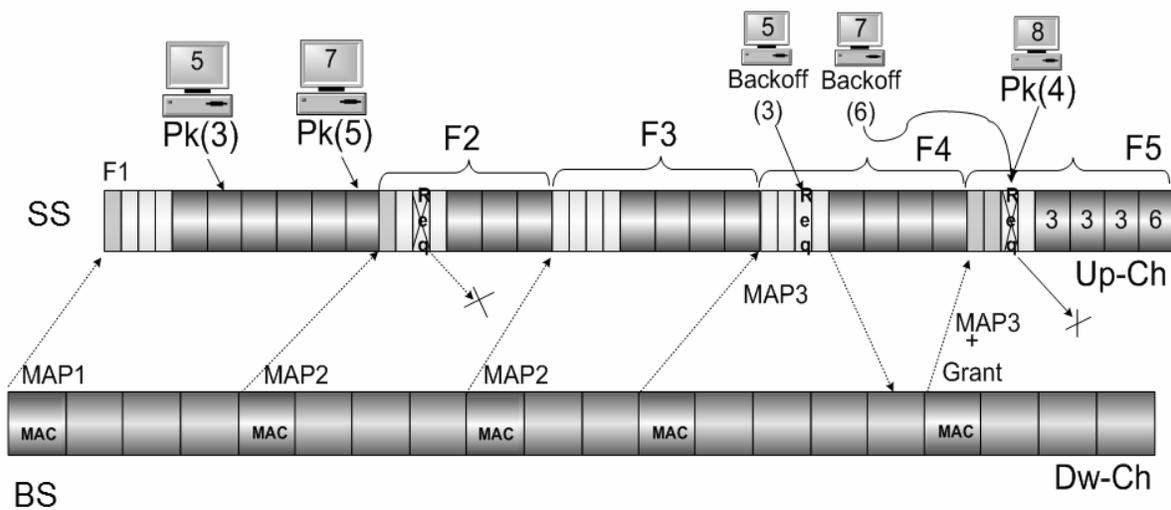


Figura 3-7. Algoritmo Exponencial Backoff.

3.2.8. Ingreso a la red e Inicialización

La secuencia de procesos realizados durante el ingreso de una Estación Suscriptor a la red BWA es la que se indica a continuación y se presenta en la figura 3-8:

- 1) Búsqueda del canal descendente y sincronización con la Estación Base.
- 2) Obtención de los parámetros de transmisión.
- 3) Ranging.
- 4) Negociación de capacidades básicas.
- 5) Autorización de la Estación Suscriptor e intercambio de llaves.
- 6) Registro.
- 7) Configuración de conectividad IP.
- 8) Configuración de hora.
- 9) Transferencia de parámetros operacionales.
- 10) Establecimiento de conexiones.

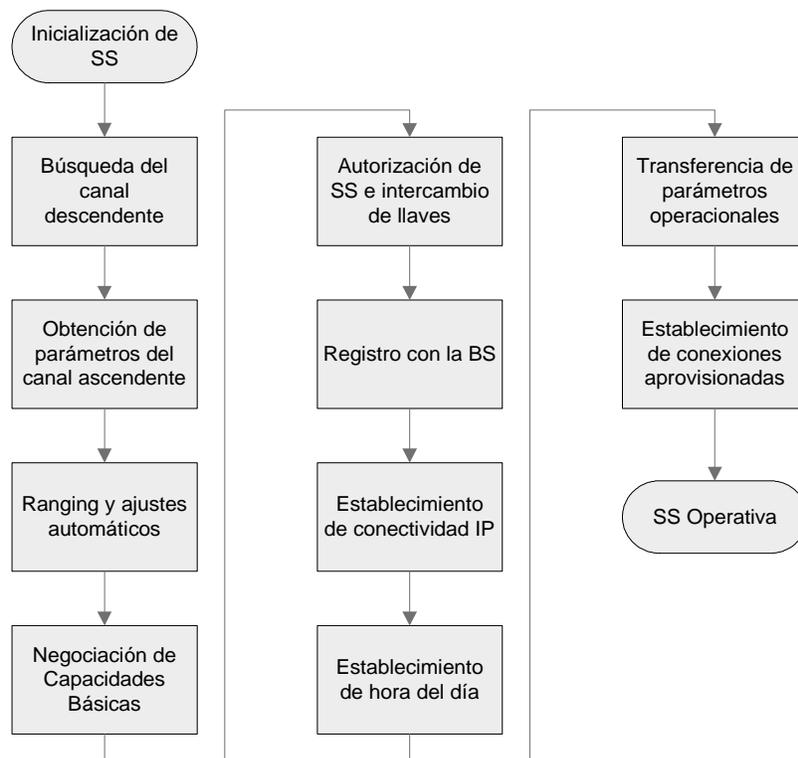


Figura 3-8: Proceso de inicialización de la SS.

Con la finalidad de que los procedimientos anteriores puedan realizarse exitosamente, es necesario contar previamente con la dirección MAC de 48 bits proporcionada por el fabricante y que identifica unívocamente la Estación Suscriptor, así como información de seguridad empleada durante la autenticación entre la SS y la Estación Base.

3.2.8.1. Búsqueda y sincronía del canal descendente

Se realiza durante la inicialización de la conexión o después de que se ha recuperado la conectividad luego de una pérdida en la señal de transmisión. La Estación Suscriptor deberá contar con alguna memoria que le permita almacenar información sobre el canal descendente empleado previamente, en caso de que ya haya contado con algún periodo de conexión. Deberá intentar usar este canal nuevamente de ser posible, de lo contrario, realizará una búsqueda de algún canal válido disponible.

La sincronización con el canal descendente se realizará mediante la capa PHY entre la Estación Base y la Estación Suscriptor.

3.2.8.2. Obtención de parámetros del canal descendente

Cuando la Estación Suscriptor reciba exitosamente el mensaje DL-MAP, considerará que ha completado exitosamente la sincronización con el canal descendente. A partir de entonces, revisará periódicamente la información proporcionada por mensajes DL-MAP y DCD posteriores. En caso de que transcurran los intervalos de espera máxima para la recepción de estos mensajes de control, la Estación Suscriptor considerará que ha perdido la sincronización y deberá reiniciarla. La información contenida en los mensajes DL-MAP y DCD se refiere a los parámetros de configuración del canal descendente.

3.2.8.3. Obtención de parámetros del canal ascendente

Una vez que la Estación Suscriptoras ha logrado sincronizarse con el canal descendente correctamente, comenzará a procesar la información proveniente de los mensajes UCD y UL-MAP. Cada UCD cuenta con un parámetro de Identificación (ID) que permite distinguir a los canales ascendentes entre sí. Al recibir el UCD, la Estación Suscriptoras almacenará la información correspondiente y verificará la disponibilidad del canal. En caso de no poder usarlo, la SS buscará otro canal de acuerdo con los UCD que reciba. Al agotar los canales ascendentes, se reiniciará el proceso de búsqueda de canal descendente. Una vez localizado algún canal válido, la SS esperará la recepción de un mensaje UL-MAP para encontrar las regiones disponibles para Ranging. La SS deberá ser capaz de recibir correctamente los mensajes UCD y UL-MAP periódicamente para que la conectividad a través del canal ascendente que esté usando se considere normal, de lo contrario, se eliminarán los parámetros correspondientes al canal y se reiniciará el proceso de obtención de parámetros.

3.2.8.4. Ranging inicial y ajustes automáticos

El proceso de Ranging consiste en sincronizar la Estación Suscriptoras con la Estación Base en el canal ascendente. Una vez que la SS se ha sincronizado con el canal descendente y cuenta con la información necesaria sobre la configuración de un canal ascendente válido (obtenida del UCD), deberá sincronizarse con la BS de manera que las transmisiones de la Estación Suscriptoras estén alineadas al inicio de un minislot. Durante un intervalo de Mantenimiento Inicial, la SS enviará un mensaje de RNG-REQ considerando los retrasos de la capa física. La potencia de este mensaje será mínima y se incrementará en mensajes sucesivos en caso de que no se obtenga respuesta de la Estación Base. Cuando la BS reciba el mensaje RNG-REQ exitosamente, contestará enviando la respuesta RNG-RSP, incluyendo los CID de las conexiones básica y primaria de la Estación Suscriptoras correspondiente, así como cualquier otra información para el ajuste de potencia y sincronización en la SS. A partir de entonces, los ajustes que tenga que realizar la SS se llevarán a cabo durante la región de Mantenimiento de Estación mediante mensajes RNG-REQ. El proceso se repite hasta que la Estación Base notifique que el Ranging se ha completado exitosamente.

3.2.8.5. Negociación de capacidades básicas

En esta etapa, la Estación Suscriptoras informará a la Estación Base sobre sus características particulares en la capa física mediante un mensaje SBC-REQ. Esta información contempla:

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

3.2.8.6. Autorización de SS e intercambio de llaves

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

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

Para llevar a cabo la Autenticación, la Estación Suscriptora envía un mensaje PKM-REQ en el que incluye información sobre algún certificado X.509 válido, los algoritmos criptográficos empleados así como las capacidades de cifrado, así como el CID básico de la SS. La respuesta de la BS incluye la AK cifrada con la llave pública de la SS, una secuencia numérica de 4 bits para identificar cada generación de AKs, la duración de la llave, las identidades (SAID, Identificador de Asociación de Seguridad) de las SA (Asociaciones de Seguridad) primarias o estáticas para las cuales la SS está autorizada para obtener información.

3.2.8.7. Registro

El objetivo de la etapa de Registro en la Estación Suscriptora es obtener el CID de Control Secundario, con lo que se indica que la estación está lista para ser administrada centralmente e iniciar el transporte de tráfico hacia la red. Para conseguirlo, la SS envía un mensaje REG-REQ y recibe un REG-RSP que incluye el CID de Control Secundario. Adicionalmente, y en caso de aplicarse, puede informarse la versión del protocolo IP empleado en caso de que lo haya solicitado la SS. La versión empleada por defecto es IPv4. La Estación Base espera un mensaje TFTP-CPLT (Configuración de Archivo TFTP Completada) para considerar finalizado el proceso de registro.

3.2.8.8. Establecimiento de la Conectividad IP

Mediante el Protocolo DHCP, la BS asigna una dirección IP a la Estación Suscriptora a través del canal de Control Secundario. Es posible que se haga referencia a algún archivo que incluya información adicional requerida para completar la conexión IP.

3.2.8.9. Establecimiento de la hora del día

La configuración de la fecha y la hora sólo son necesarias para el registro de eventos para fines operativos del sistema. No es necesario proteger el intercambio de esta información, y la resolución empleada es de un segundo. Se emplea la Conexión de Control Secundario y el protocolo UDP. Aunque no es necesario este proceso durante el registro de la Estación Base, se considera que ha fracasado cuando se han excedido tres intentos en un periodo de cinco minutos.

3.2.8.10. Transferencia de parámetros operacionales

Una vez que se ha completado exitosamente la asignación de dirección IP a través del protocolo DHCP, se iniciará la transferencia de un archivo con información de configuración hacia la Estación Suscriptora mediante el protocolo DFTP. Los datos incluidos en este archivo son:

- Parámetro de configuración SS MIC.
- Parámetro de configuración de Finalización.
- Archivo de Actualización de Software.
- Objeto SNMP MIB.
- Dirección IP del Servidor de Software.
- Parámetros de configuración específicos del fabricante.

3.2.8.11. Establecimiento de conexiones

Al completarse el intercambio de información de configuración, la Estación Suscriptora enviará un mensaje DSA-REQ hacia la Estación Base para establecer las conexiones correspondientes e iniciar la operación normal.

3.3. Conclusiones

A lo largo de este capítulo se ha presentado la forma básica de operación del protocolo de comunicaciones de acceso inalámbrico de banda ancha IEEE 802.16. Se han descrito los mensajes de administración más importantes empleados durante la inicialización del servicio y durante su operación normal. Adicionalmente, se presentaron tanto los cuatro mecanismos de solicitud de asignación de ancho de banda que varían de acuerdo con el tipo de tráfico generado por la SS, como los servicios de programación ascendente, funciones realizadas por la BS.

Asimismo, se ha descrito el algoritmo Exponencial Backoff, que permite resolver las colisiones ocurridas durante los periodos de contención, tanto para la transmisión de solicitudes de asignación de ancho de banda como la transmisión de datos de información. Finalmente, se presentó el proceso de ingreso a la red e inicialización de la SS que contempla, entre otros aspectos, la adquisición de los parámetros del canal de comunicación inalámbrico.

Capítulo 4

Diseño e implementación del modelo de simulación para el protocolo IEEE 802.16

4.1. Introducción

En el presente capítulo se muestra el diseño e implementación de un modelo de simulación que permite el análisis y evaluación de protocolo de acceso inalámbrico de banda ancha IEEE 802.16 mediante el software OPNET⁵. OPNET consiste en un sofisticado simulador que ofrece un ambiente de modelado y simulación de redes y sistemas distribuidos, con énfasis en las redes de comunicación y los sistemas de información, que permite analizar el comportamiento y desempeño de los sistemas estudiados mediante la realización de simulaciones de eventos discretos. Está compuesto por diversos editores que permiten configurar aspectos específicos e individuales de los modelos, ofreciendo distintos niveles de detalle en distintas jerarquías. El proceso de modelado y simulación se basa en un esquema de tres fases: Especificación, Simulación y Recolección de Información, y Análisis.

4.1.1. Especificación

La Especificación consiste en el desarrollo de una representación o modelo del sistema por estudiar. Esto es posible mediante el uso de Editores, que permiten distintos grados de granularidad de acuerdo con las necesidades en el detalle de los estudios realizados. Aún cuando cada Editor contempla distintos aspectos de un sistema, los modelos generados pueden reutilizarse e integrarse a otros sistemas, ofreciendo un alto nivel de flexibilidad.

⁵ Licencia obtenida gracias al proyecto PAPIIT IN110802.

- **Editor de Proyecto.** Permiten la construcción de los modelos de redes de alto nivel mediante la agregación de nodos, enlaces y subredes.
- **Editor de Nodo.** Los nodos son los objetos que componen a una red. En este editor se constituyen mediante la interconexión de módulos que desempeñan funciones específicas.
- **Editor de Proceso.** Definen el comportamiento de los módulos que componen a un nodo. Se basa en la estructura y funcionamiento de una máquina de estados. Las características y la interrelación entre estados se definen a partir de funciones especificadas mediante lenguaje Proto-C, incorporando numerosas funciones que emulan propiedades de sistemas reales.
- **Editor de Modelo de Enlace.** Permiten definir las características de los enlaces empleados en la definición de un modelo de red.
- **Editor de Formato de Paquete.** Genera el formato y las características de los paquetes de información que son transmitidos durante una simulación.
- **Editor ICI.** Se encarga de la creación y edición de los formatos de Información de Control de Interfaz (ICI, Interface Control Information) empleados entre Procesos.
- **Editor de Patrón de Antena.** Empleado para las simulaciones de sistemas que involucran transmisiones inalámbricas. Permite la generación de patrones de radiación para equipos receptores y transmisores.
- **Editor de Curva de Modulación.** Disponible en las simulaciones de sistemas inalámbricos, se encarga de la creación y edición de curvas de modulación para equipos transmisores.
- **Editor PDF.** Permite la definición de Funciones de Densidad de Probabilidad (PDF, Probability Density Function) que pueden emplearse para la simulación de diversos procesos.

Los Editores anteriores generan aspectos distintos de los modelos que se agrupan en Dominios de Modelado—Red, Nodo y Proceso—, que determinan los niveles jerárquicos que estructuran a los sistemas estudiados. La reutilización de los objetos generados en cada Editor simplifica la generación de modelos complejos en cada Dominio. La figura 4-1 muestra los niveles de diseño—Red, Nodo, Proceso y código Proto-C—empleados para la realización del presente estudio.

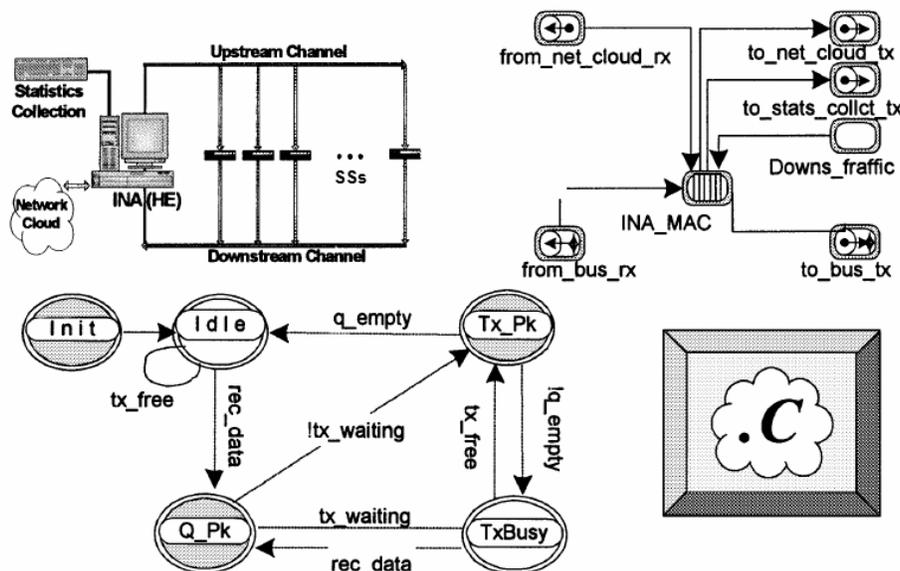


Figura 4-1. Modelo de simulación BWA.

En el Dominio de Red, se generan las topologías de las redes por analizar mediante el Editor de Proyecto al incorporar nodos, cada uno de ellos representando instancias de uno o varios tipos de nodos. Pueden

realizarse representaciones geográficas que incorporan las implicaciones de distancia cuando es requerido. Los nodos incorporados pueden ser fijos o móviles, estos últimos cuando se realiza el modelado de redes inalámbricas, siendo disponibles además los nodos satelitales.

El Dominio de Nodo permite caracterizar internamente los nodos en una red. Se basa en Módulos que realizan funciones específicas capaces de ser optimizadas o modificadas a distintos niveles. Algunos tipos de Módulos incluyen procesadores, generadores de paquetes, colas, transmisores, entre otros. Se interconectan entre sí mediante flujos de datos o bien a través de enlaces que transmiten información de control y de recolección de estadísticas. El comportamiento particular de cada uno de los Módulos se define mediante el Editor de Proceso. Finalmente, el Dominio de Nodo permite recrear sistemas que basan su funcionamiento en capas, como aquellos que se basan en el modelo de referencia de Interconexión de Sistemas Abiertos, por ejemplo.

Los Módulos programables como las colas o los procesadores definen su comportamiento mediante el Dominio de Proceso. Los Procesos son las tareas que realizan los módulos y pueden generar a su vez Procesos nuevos dinámicamente de acuerdo con la ejecución de las simulaciones y con la presencia de interrupciones, eventos que aparecen como respuesta a condiciones particulares. El conformado de un Proceso se realiza mediante un lenguaje Proto-C que combina las características y funcionalidad de los lenguajes C o C++ con máquinas de estado finito y funciones de alto nivel llamadas Procesos Kernel que reproducen el comportamiento característico de dispositivos de comunicación y de sistemas de información. El lenguaje Proto-C también incorpora extensiones que optimizan el modelado de Procesos, entre ellas las Variables de Estado que almacenan información empleada en estadísticas, contadores y otros; las Ejecutivas de Estado que detallan las acciones realizadas por un Proceso cuando entra a o sale de un Estado; las Condiciones de Transición que determinan cuándo deberá dejarse un Estado para entrar en otro de acuerdo con las Variables de Estado o con interrupciones; y Ejecutivas de Transición, que definen acciones cuando se lleva a cabo una transición.

4.1.2. Simulación y Recolección de Información

El propósito de la definición de modelos consiste en emplearlos durante una simulación dinámica con la finalidad de estudiar el comportamiento y desempeño de sistemas. Las simulaciones implican tres procesos:

- **Especificación de la Recolección de Información.** Presenta los diversos tipos de información soportada que puede generarse durante una simulación y los mecanismos que permiten esta recolección.
- **Construcción de la Simulación.** Abarca los componentes de un programa de simulación y los métodos a través del cual la especificación de un modelo se emplea para generar una simulación ejecutable.
- **Ejecución de la Simulación.** Constituye las características de OPNET que permite la ejecución de las simulaciones y la interacción con ellas.

Cuando se ha completado la definición de un modelo, es posible comenzar la ejecución de las simulaciones que permitirán el estudio del comportamiento y desempeño de un sistema. Sin embargo, antes de iniciar estas simulaciones, es necesario determinar qué información se desea obtener. Durante las primeras etapas de desarrollo de modelos, puede ser necesario ejecutar simulaciones con la finalidad de verificar las especificaciones recientemente completadas. Estos verificadores son progreso, flujo de datos, estadísticas básicas y eventos clave. El progreso de la simulación es el criterio más básico y el que se examina en primer lugar. Debe seguirse el curso de la simulación para verificar que sea ensamblada y ejecutada, que sea capaz de procesar eventos y alcanzar su término sin la ocurrencia de errores serios. El flujo básico de paquetes en el modelo del sistema se analiza para asegurar que la generación de paquetes, las conexiones y los enlaces se encuentran correctamente configurados y que no existen fugas o puntos críticos en el sistema. Las estadísticas básicas consisten en métricas del sistema cuyos rangos de valores pueden ser consideradas para determinar que el modelo presenta un comportamiento generalmente válido. Los eventos claves permiten detectar que eventos particulares esperados ocurren en instantes conocidos, o bien, si algún procesamiento particular esperado ocurre durante algún evento determinado.

Las simulaciones pueden generar diversos tipos de salidas aplicables en situaciones diferentes. Dado que las simulaciones pueden contener código definido por el usuario, también es posible definir y calcular nuevos tipos de salida que pueden ser reportados durante o después de la simulación. La información generada puede consistir en vectores de salida, escalares de salida, animaciones, reportes y archivos propietarios. Los vectores

de salida consisten en la historia de una variable del sistema capturada de acuerdo con su variación temporal. Proporcionan un mecanismo para determinar la manera en que se comporta un sistema así como su respuesta a incidentes particulares durante una simulación. Los escalares de salida son métricas de interés que no varían con el tiempo. En lugar de ello, representan un solo valor representativo del desempeño del sistema durante el curso de la simulación. Típicamente, cada una de estas estadísticas se almacena una vez por simulación, de manera que los escalares de salida de simulaciones múltiples pueden combinarse para analizar su dependencia en las entradas de la simulación, igualmente almacenadas como escalares. Las animaciones son una visualización de la actividad del sistema que permiten observar el comportamiento y las interacciones entre componentes. Debido a que es posible incluir procesos y modelos de enlaces definidos por el usuario, pueden generarse reportes personalizados o archivos de salida durante la ejecución o al término de una simulación.

Las simulaciones se obtienen al ejecutar un programa de simulación, que es un programa compilado que adquiere la forma de "objeto compilado". Cada simulación está conformada por múltiples piezas separadas de código de objeto que son empacadas y relacionadas entre sí para obtener un programa completo. Las piezas de código de objeto juegan roles diferentes en la simulación que pueden corresponder a Kernel de simulación, modelos de procesos, etapas de pipeline, archivos de objetos externos y archivos externos. El Kernel de simulación proporciona el marco de trabajo para todas las simulaciones, incluyendo los servicios básicos como la carga del modelo, la programación y activación de eventos, la recolección de estadísticas, la asignación en memoria, etc. Contiene además todos los Procedimientos de Kernel invocados por los modelos desarrollados por el usuario. Los modelos de procesos se compilan en un archivo de lenguaje C con el sufijo ".pr.c" que se compila a su vez en el compilador C de la computadora huésped para generar un archivo de objeto con el sufijo ".pr.o". Las etapas de pipeline se basan en modelos de enlace que implementan cálculos modulares y otros relacionados con la toma de decisiones relacionadas con la transferencia de paquetes entre transmisores y receptores. Los archivos de objetos externos contienen funciones de soporte para los modelos de procesos y las etapas de pipeline en una simulación. Este software puede estar desarrollado en C o en otros lenguajes capaces de ser invocados desde C. Pueden hacerse disponibles mediante la dependencia de un modelo de proceso a través de la declaración del archivo externo en la especificación del modelo, o bien, un modelo de red puede expresar la dependencia de cualquiera de sus modelos incluidos en un archivo externo mediante una declaración similar. Los archivos externos son similares a los archivos de objetos externos, pero se empacan como archivos que contienen múltiples archivos de objetos.

Una vez que se ha construido el modelo de simulación, típicamente se ejecuta bajo un número de condiciones diferentes con la finalidad de caracterizar al sistema que representa. Mientras que el modelo es el mismo, los aspectos de su ambiente o los parámetros que ofrece se varían para establecer patrones de comportamiento o relaciones entre ciertas entradas del sistema y salidas seleccionadas. Muchas simulaciones se basan en el modelado estocástico de ciertos elementos para representar un comportamiento que no se conoce de antemano pero que puede ser caracterizado al asociar probabilidades con un conjunto de salidas. Los elementos modelados estocásticamente dependen en una fuente de números aleatorios en la que basen su comportamiento. El mecanismo utilizado para seleccionar una nueva secuencia de números aleatorios se basa en iniciar un generador de números aleatorios en estados distintos. Debido a que determina la salida futura en su totalidad, el estado inicial se conoce como la semilla de números aleatorios.

Además de la variación de las semillas de números aleatorios para obtener un rango de comportamientos estocásticos, muchas simulaciones pueden variar ciertas propiedades o condiciones de operación del modelo. De esta manera, el sistema del modelo puede ser caracterizado para un rango de configuraciones posibles para el soporte de ciertos tipos de análisis en los que se desea determinar las limitaciones del sistema y sus condiciones de desempeño pico. El mecanismo primario para variar la configuración del modelo se basa en el empleo de la promoción de atributos de objetos. Los valores de este tipo de atributos pueden ser alterados en cada simulación, sin necesidad de modificar los modelos o el programa de simulación. En los atributos promovidos, sus valores se han dejado sin asignación, precisamente para que dichas asignaciones se realicen en el momento de la ejecución de la simulación. Un segundo mecanismo que soporta la variación de la configuración del modelo se basa en el empleo de variables que no están asociadas con ningún objeto en particular. Estas variables se denominan atributos de simulación. Debido a que no cuentan con una asociación con objetos, permiten la definición de parámetros globales. La interpretación y aplicación de los atributos de simulación y sus valores se destinan al código definido por el usuario.

El uso principal de los mecanismos de atributos promovidos y de simulación es la conducción de estudios en los que diversos atributos se modifican de acuerdo con un rango de valores. Para cada nueva configuración de

atributos, se ejecuta una nueva simulación, y si se encuentra involucrado un comportamiento estocástico en el modelo, pueden ejecutarse simulaciones múltiples con distintas semillas de números aleatorios. De esta manera, el estudio completo se basa en una secuencia de simulaciones. Cada simulación en la secuencia almacena la salida en forma de vector, escalar o animación para su análisis posterior. Estas secuencias pueden realizarse mediante la ejecución manual de cada una o bien, mediante cierto nivel de automatización. Existen dos aproximaciones para la ejecución automatizada de las secuencias de simulación. La primera se encuentra soportada por la Herramienta de Simulación de OPNET, que proporciona una interfaz gráfica de usuario para la configuración y ejecución de la simulación. La segunda se basa en el hecho de que las simulaciones son programas ordinarios que pueden ser ejecutados bajo el control de otros programas o scripts.

4.1.3. Análisis

Con base en la información generada por la salida de una simulación, la Herramienta de Análisis puede emplearse para observar y manipular la información estadística. El servicio proporcionado por esta herramienta consiste en el despliegue de información en forma de gráficas. Las gráficas se presentan dentro de áreas rectangulares denominadas paneles de análisis. Cada panel de análisis puede contener una o más gráficas. Una gráfica es la porción del panel de análisis que contiene estadísticas. Para la creación de gráficas y paneles de análisis se dispone de diversas operaciones, todas ellas tienen el propósito básico el desplegar un nuevo conjunto de datos o transformar uno existente. Un panel de análisis consiste en un área de trazado, con dos ejes numerados generalmente referidos como los ejes horizontal (abscisa) y vertical (ordenada). El área de trazado puede contener una o más gráficas que describen relaciones entre variables asignadas a los dos ejes. El origen de la información presentada por los paneles de análisis puede consistir en un archivo de vector de salida, de escalar de salida, de representaciones ASCII de información estadística, así como a partir de funciones específicas de generación de datos estadísticos y de información estadística general.

Los modelos de sistema que incluyen un comportamiento estocástico presentan resultados dependientes de la semilla inicial del generador de números aleatorios. Puesto que la selección de una semilla particular puede generar un comportamiento anómalo o no representativo, es importante que cada configuración de modelo se simule con distintas semillas para poder determinar el comportamiento estándar o típico. OPNET incorpora funciones estadísticas que permiten la definición de rangos de confianza para la determinación de los valores óptimos de las semillas iniciales.

Además de presentar información estadística, la Herramienta de Análisis proporciona diversas operaciones que pueden utilizarse para transformar esta información y generar nuevas estadísticas. Puesto que los vectores almacenados en archivos de salida vectorial contienen la misma información que las estadísticas, estas operaciones pueden aplicarse directamente a los vectores. Las operaciones proporcionadas para el establecimiento de una distribución de un conjunto de muestras de valores recolectados son la densidad de probabilidad (PDF), distribución acumulada (CDF), masa de probabilidad (PMF), histograma de distribución de muestras, histograma de distribución temporal y trazador de dispersión. Cada operación en unaria y produce un nuevo panel de estadísticas para mostrar sus resultados cuando se ha completado. Además de las anteriores, la Herramienta de Análisis proporciona la habilidad para transformar y cambiar información estadística con una variedad de operaciones matemáticas que incluyen funciones aritméticas, estadísticas y de cálculo. Las estadísticas y los vectores pueden alimentarse mediante diagramas de bloques de cómputo denominados filtros para la generación y despliegue de nuevas estadísticas.

4.2. Diseño de la Unidad Estación Base

La Estación Base (BS, Base Station) es el equipo transceptor central que enlaza a todas las SS con la red de datos. Realiza funciones de recepción, procesamiento y generación de mensajes de control para la inicialización y mantenimiento de las SS, otorgamiento de reservaciones de ancho de banda, generación de tráfico y colección de estadísticas. Cuenta con módulos de enlace desde y hacia la red de datos externa, de conexión hacia el nodo colector de estadísticas, una cola de procesamiento para el cumplimiento de las funciones MAC, los módulos para la transmisión y recepción de paquetes a través de los canales inalámbricos requeridos y un módulo de detección de identificación de la BS y la red BWA.

La figura 4-1 muestra los módulos que componen al nodo BS.

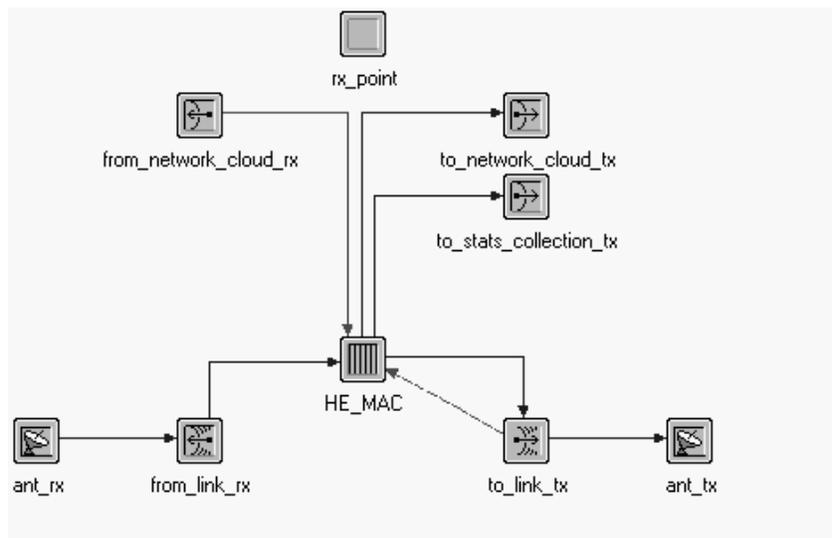


Figura 4-1: Nodo de la Estación Base.

La BS está integrada por los siguientes módulos:

- 1) Procesamiento de paquetes por enviar y recibidos, y realización de las funciones MAC. Consiste en una cola de recepción de paquetes que cuenta con un proceso administrativo y uno hijo para cumplir con las funciones vertebrales de la BS en la capa MAC de acuerdo con el protocolo IEEE 802.16.
 - HE_MAC.
- 2) Transmisión y recepción punto a punto. Proporcionan conectividad de la BS hacia la nube de datos que representa a la red externa, así como hacia el nodo colector de estadísticas.
 - From_network_cloud_rx.
 - To_network_cloud_tx.
 - To_stats_collection_tx.
- 3) Transmisión y recepción inalámbricas. Compuestas por receptores y transmisores capaces de identificar señales con características específicas, así como de antenas transmisoras y receptoras que brindan conectividad hacia las SS de la red BWA.
 - Ant_rx, Ant_tx.
 - From_link_rx, To_link_tx.
- 4) Funciones adicionales. Se incluye un módulo para la identificación del nodo BS y la red BWA.
 - Rx_point.

4.2.1. Realización de las funciones MAC

4.2.1.1. HE_MAC

El módulo HE_MAC está constituido por una cola que procesa los paquetes recibidos desde la red externa y las SSs de la red BWA. También se encarga de regular el tráfico en la red mediante la generación y transmisión de mensajes de control periódicos entre los que se incluyen los de Mantenimiento, Descriptores de Canal, Mapas y Sincronía. Contiene información acerca de todas las prioridades de servicio para cada una de las SS, de manera que puede realizar las asignaciones de ancho de banda tomando en cuenta diversos

parámetros de nivel de servicio. Sus funciones se llevan a cabo con el proceso administrativo Bwa_be_mgr que emplea al proceso hijo Bwa_be_txctl. El módulo HE_MAC se muestra en la figura 4-2.

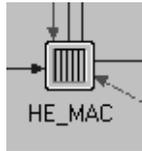


Figura 4-2: Módulo HE_MAC.

Los enlaces desde y hacia otros módulos son los indicados a continuación:

- Flujo de paquetes desde el módulo receptor para el tráfico proveniente de la red externa, From_network_cloud_rx.
- Flujo de paquetes hacia el módulo transmisor para el tráfico dirigido hacia la red externa, To_network_cloud_tx.
- Flujo de paquetes hacia el módulo colector de estadísticas, To_stats_collection_tx.
- Flujo de paquetes desde el módulo receptor de radio, From_link_rx.
- Flujo de paquetes hacia el módulo transmisor de radio, To_link_tx.
- Cable estadístico proveniente del módulo transmisor de radio, To_link_tx.

El proceso administrativo Bwa_be_mgr se encarga de las funciones de la subcapa de Control de Acceso Medio del protocolo IEEE 802.16 para la BS. La implementación en el modelo OPNET® contempla las funciones de Ranging, recepción y procesamiento de tráfico de aplicación desde la red externa y las SSs, y la generación y transmisión de los paquetes de sincronización, UCD, MAP y de tráfico en el canal descendente, dirigidos hacia las SSs de la red BWA. La máquina de estados del proceso Bwa_be_mgr es la que se muestra en la figura 4-3:

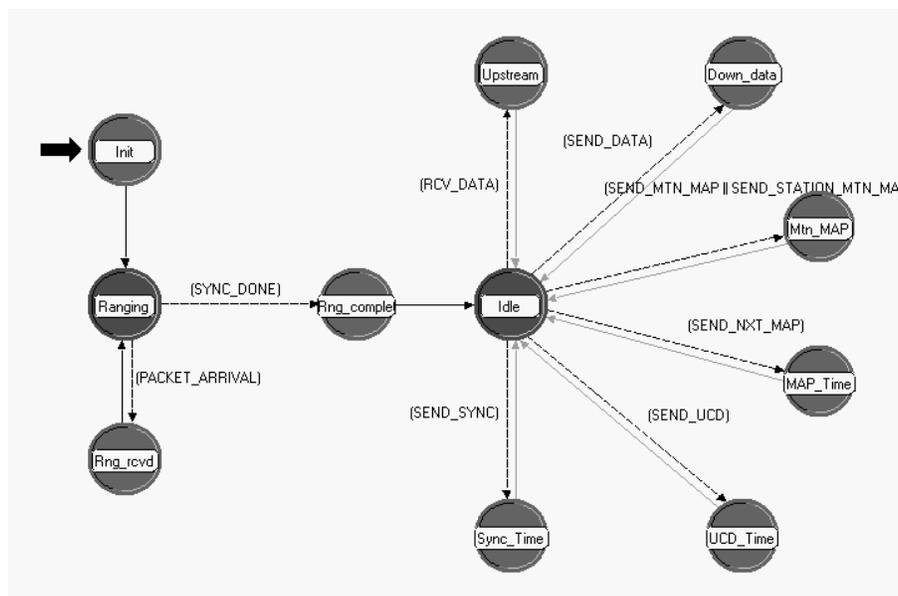


Figura 4-3: Proceso administrativo Bwa_be_mgr.

4.2.1.1.1.Init

Ejecutivas de Entrada

- 1) Determina la ubicación física de la BS, definida por las coordenadas x e y.
- 2) Verifica que la interrupción inicial corresponda al comienzo de la simulación comprobando que se trate de OPC_INTRPT_BEGSIM.
- 3) Genera las listas de IE, que corresponden a las regiones de Contención para envío de solicitudes de asignación de ancho de banda y de datos, de Mantenimiento, de Asignaciones largas, de Asignaciones cortas, de Confirmaciones de recepción de información, y de Asignaciones pendientes.
- 4) Cuando las SSs se agrupan en distintas prioridades, se obtiene la cantidad máxima de estaciones por prioridad con base en la variable Priority_Spacing así como el valor inicial de los identificadores las SSs, SID_START. Ambos parámetros se obtienen desde el archivo de variables de ambiente bwa_mac_default_streams.ef. Se genera una lista para cada una de las prioridades.
- 5) Se generan listas para la clasificación de las SSs de acuerdo con el tipo de servicio que recibirán: Best Effort, nRTP, RTP o UGS.
- 6) Obtención de los parámetros de simulación que incluyen:
 - a) Tiempo de procesamiento de la BS.
 - b) Instante de término del proceso Ranging.
 - c) Periodo de transmisión de mensajes UCD.
 - d) Periodo de transmisión de mensajes de Sincronía.
 - e) Retraso entre transmisiones descendentes.
 - f) Tasa de transmisión en el canal descendente.
 - g) Longitud máxima de tramas.
 - h) Ventana de inicio del algoritmo exponencial Backoff.
 - i) Ventana de término del algoritmo exponencial Backoff.
 - j) Tamaño del minislots.
 - k) Tasa de transmisión en el canal ascendente.
 - l) Preámbulo, paridad FEC, código de palabra FEC y acortamiento de la última palabra de código para las regiones de Contención para envío de solicitudes de asignación de ancho de banda, de Contención para envío de solicitudes y paquetes de información, de Mantenimiento inicial, de Mantenimiento de estación, de Reservaciones cortas, y de Reservaciones largas.
 - m) Longitud del encabezado básico MAC.
 - n) Longitud del encabezado extendido para mensajes de confirmación.
 - o) Longitud del encabezado extendido para mensajes de solicitud de asignación de ancho de banda.
 - p) Disponibilidad de la concatenación de paquetes.
 - q) Longitud máxima de un paquete para ser considerado Corto.
 - r) Longitud máxima de las solicitudes de asignación de ancho de banda.
 - s) Número de minislots de la región de contención.
 - t) Cantidad máxima de IEs por mapa.
 - u) Cantidad máxima de minislots por mapa.
 - v) Duración máxima del periodo de Reservación por mapa.
 - w) Periodo de transmisión de mensajes de Mantenimiento.
 - x) Longitud de la región de Mantenimiento en minislots.
 - y) SID empleado para la región de Contención para el envío de solicitudes de asignación de ancho de banda y de paquetes de información.
 - z) Indicación de empleo de tramas de longitud fija.
 - aa) Duración de las tramas de duración fija.
 - bb) Longitud mínima de los paquetes en una fragmentación.
 - cc) Indicación de uso de UGS para la transmisión de tráfico VoIP.
 - dd) Indicación de empleo de Round Robin para el servicio UGS.
 - ee) Empleo de programación EDF (Earliest Deadline First).
- 7) Cálculo de la duración de un solo minislots con base en la longitud del mismo en bytes y la tasa de transmisión ascendente.
- 8) Cálculo de la longitud máxima de los mensajes Mapa y el retraso de transmisión asociado.

- 9) Cálculo de la longitud en bytes del encabezado MAC en la transmisión descendente.
- 10) Programación para la generación automática de la interrupción que determina el fin del periodo de Ranging.
- 11) Inicialización del retraso máximo de propagación y del arreglo para la generación de los mensajes UCD.
- 12) Registro de los siguientes parámetros estadísticos:
 - a) Tiempo en segundos descrito por los mensajes Mapa.
 - b) Tiempo en segundos entre mensajes Mapas.
 - c) Número de IEs en el Mapa.
 - d) Duración en segundos de los slots de Reservación y contención en el Mapa.
 - e) Número de IEs correspondientes a las regiones de Solicitud, de Solicitudes pendientes de ser resueltas, de Reservaciones.
 - f) Longitud de la cola para la recepción de solicitudes de asignación de ancho de banda.
 - g) Longitud de las subcolas para la recepción de solicitudes de asignación de ancho de banda para cada prioridad definida.
 - h) Número de IEs de Confirmación de recepción de información en el Mapa.
 - i) Jitter de CIR para cada una de las prioridades.
- 13) Inicialización del temporizador para el registro de envío de mensajes Mapa.
- 14) Inicialización de búfer circular.
- 15) Determinación del overhead de las regiones de Mantenimiento de Estaciones, que incluye código de palabra FEC, paridad FEC, preámbulo, banda de guarda y acortamiento de la última palabra de código.
- 16) Inicialización de las variables correspondientes al instante de la última confirmación de recepción de información, de corrupción de la lista maestra de las SSs, de solicitudes y paquetes recibidos, slots de contención y reservados totales, slots totales en general, contador de Mapa, validación de reservaciones, índice de servicio UGS, reservaciones pendientes, último usuario que recibió una asignación, número máximo de prioridades UGS.

4.2.1.1.2.Ranging

Ejecutivas de Salida

- 1) Verificación de la ocurrencia de las interrupciones SYNC_DONE y PACKET_ARRIVAL, correspondientes a la finalización del proceso de sincronía y de recepción de un paquete de información.

4.2.1.1.3.Rng_Rcvd

Ejecutivas de Entrada

- 1) Se obtiene la trama recibida del canal inalámbrico.
- 2) Se comprueba que la trama recibida tenga un formato válido de acuerdo con la capa MAC.
- 3) Se obtiene la carga útil de la trama y se obtiene su formato, que deberá ser del tipo de paquetes de mensajes de control. También se obtienen la potencia efectiva y la relación SNR del paquete, así como las distancias inicial y final entre el transmisor y el receptor.
- 4) El paquete se desencapsula y se verifica su formato, que deberá corresponder al de solicitud de ranging. Para cada uno de estos mensajes que hayan sido recibidos exitosamente se incrementa un contador para determinar el número de SSs.
- 5) Con base en el instante de creación del paquete, contenido en el mismo, se determina el tiempo de propagación y se incrementa el tiempo máximo de propagación en caso de ser necesario.

- 6) Se responde al paquete enviando a la SS un paquete que incluye el SID asignado así como cualquier ajuste de tiempo que sea necesario. Esta información se encapsula preparando los encabezados de control necesarios.
- 7) Se destruye el mensaje recibido de la SS.

4.2.1.1.4.Rng_complete

Ejecutivas de Salida

- 1) Se prepara el primer mensaje de control UCD para ser enviado a todas las SSs. La información contenida incluye la tasa de transmisión en el canal ascendente, el tamaño del minislot, así como el preámbulo, la paridad FEC, la palabra de código FEC, la banda de guarda y el acortamiento de la última palabra de código para las regiones de Contención de solicitud, de Contención de solicitud y envío de información, de Mantenimiento inicial, de Mantenimiento de Estación, de Reservaciones cortas, de Reservaciones largas, así como el valor de contador de cambios de las características del canal ascendente.
- 2) Se genera el primer mensaje de Sincronía con la longitud establecida y encapsulándolo mediante el encabezado MAC correspondiente. Este mensaje se transmite hacia todas las SSs.
- 3) Cálculo del retraso para los mensajes Mapa. Este tiempo se determina de manera que el periodo descrito por él inicie después de que la estación más lejana lo haya recibido correctamente. El cálculo considera el tiempo máximo requerido para la transmisión de un mensaje Mapa, el retraso interleave, el tiempo efectivo requerido para la transmisión del Mapa actual, el tiempo de procesamiento del Mapa en la BS, y el tiempo de propagación hasta la SS más lejana.
- 4) Preparación del Mapa mediante la generación del encabezado MAC de control correspondiente. El paquete sólo incluye un IE de contención, destinado a que todas las SSs envíen solicitudes de asignación de ancho de banda o paquetes de información.
- 5) Una vez encapsulado el paquete, se programa el envío del siguiente Mapa considerando el tiempo suficiente para que la SS más lejana logre recibirlo correctamente, lo procese y sea capaz de transmitir en el primer slot del Mapa, en caso de requerirlo.
- 6) Se calcula el número de IEs de Mantenimiento de estación que se incluirá en cada Mapa de mantenimiento con base en el número de estaciones y el tamaño del búfer circular.

4.2.1.1.5.Idle

Ejecutivas de Salida

- 1) Verifica que se haya activado una interrupción correspondiente a una interrupción propia, OPC_INTRPT_SELF, o del tipo de recepción de trama, OPC_INTRPT_STRM.

4.2.1.1.6.Upstream

Ejecutivas de Entrada

- 1) Al recibir un paquete desde una SS, se obtiene el encabezado MAC y su formato. A continuación se determina el nivel de potencia y la relación SNR así como la distancia entre el transmisor y el receptor. Se incrementa en uno el contador de paquetes recibidos.
- 2) Se determina si el paquete contiene una solicitud de asignación de ancho de banda, es decir, si corresponde al formato BWA_REQ_MAC_HD_FMT. De ser así, se obtiene la el SID, la cantidad de minislots requeridos y la cantidad de solicitudes realizadas previamente por la SS.
- 3) La solicitud se almacena en una cola de espera que considera el nivel de servicio asignado a la SS..

- 4) Si la cantidad de minislots requeridos es nulo, entonces se trata de una solicitud para la activación del servicio UGS. Al activarse, se determinan el tiempo entre recepción de paquetes y el tamaño de las reservaciones.
- 5) En caso de que el paquete recibido tenga el formato de paquete de información se determina si también incluye una solicitud piggyback mediante el análisis del encabezado y del subencabezado, en caso de estar presente. El formato correspondiente es BWA_PDU_MAC_HD_FMT. Después de agregar la solicitud a la cola espera, se desencapsula el resto de la información contenida en el paquete.
- 6) El paquete puede estar fragmentado, lo cual se verifica si su formato corresponde a BWA_FRAG_MAC_HD_FMT. En tal caso se obtiene el SID y la carga útil del paquete, además de determinar el tamaño total de la información fragmentada. Las solicitudes realizadas de esta manera son del tipo piggyback. Se realiza el encolamiento de la solicitud de acuerdo con el nivel de servicio de la SS.
- 7) A continuación se envía una copia del paquete recibido al módulo colector de estadísticas. Los paquetes concatenados, BWA_CONC_MAC_HD_FMT, se ignoran.
- 8) Si el paquete fue únicamente una solicitud de asignación de ancho de banda, BWA_REQ_MAC_HD_FMT, y se incluyó un encabezado extendido en el que se solicita el envío de confirmación, se agrega la solicitud a la cola de espera según el nivel de servicio definido para la SS..
- 9) Finalmente, se destruye el paquete recibido.

4.2.1.1.7.Downstream.

Ejecutivas de Entrada

- 1) Se verifica si el paquete recibido incluye una dirección de destino. De no ser así, se genera una aleatoriamente con base en el número de SSs en la red.
- 2) Se asigna un apuntador para el paquete que posteriormente se encapsulará a una trama. A esta trama se asignará un apuntador.
- 3) Se prepara el encabezado MAC, se encapsula el paquete y se establece el tamaño total de la trama.

4.2.1.1.8.Mtn_MAP

Ejecutivas de Entrada

- 1) La transmisión de los IEs de Mantenimiento se realiza mediante Mapas exclusivos para esta función. Se determina el número de IEs que se incluirán en el mensaje con base en la cantidad de SSs.
- 2) Establecimiento del instante de inicio para la región que describirá el nuevo Mapa. Coincide con el tiempo de finalización del Mapa anterior.
- 3) El Mapa nuevo sólo incluirá la región de Mantenimiento Inicial cuya longitud se define mediante el archivo bwa_mac_default.ef.
- 4) Se asigna un IE de Mantenimiento por cada SS y al final de la serie de IEs se agrega uno nulo.
- 5) Se prepara el encabezado MAC correspondiente y se programa el envío del Mapa.

4.2.1.1.9.MAP_Time.

Ejecutivas de Entrada

- 1) Para la generación de los IEs se emplea una lista que se vacía cada vez que tiene que prepararse un nuevo mensaje Mapa.
- 2) Inicialización del programador Limited Event, encargado de realizar las tareas de procesamiento de solicitudes y asignaciones de ancho de banda para la conformación de los IE. Los principales parámetros involucrados son:

- a) Instantes de las regiones de reservación y contención en el Mapa.
 - b) Tamaño e índice de la lista de IEs.
 - c) Cantidad global de IEs.
 - d) Número de solicitudes de asignación de ancho de banda.
 - e) IEs para la región de Contención para el envío de solicitudes.
 - f) IEs pendientes.
 - g) IEs de regiones de reservación.
 - h) IEs de confirmación de recepción.
 - i) Número de slots involucrados en el Mapa.
 - j) Instante de inicio del periodo descrito por el Mapa.
 - k) Instante de envío del Mapa.
 - l) Instante de envío de la última confirmación de recepción de solicitudes o de paquetes de información.
 - m) Número máximo de IEs.
 - n) Número máximo de minislots.
 - o) Tiempo máximo descrito por el Mapa.
 - p) Tiempo total máximo en el Mapa.
- 3)** Con base en la duración fija de la trama, se determina la cantidad de slots que se incluirán en el Mapa.
 - 4)** Generación de un IE para la región de Contención dirigido al SID Broadcast.
 - 5)** Preparación de los IEs para las SS que emplean el servicio UGS, incluyendo el soporte de EDF.
 - 6)** Se agregan los IEs para las SS que operan bajo el esquema del servicio Best Effort.
 - 7)** Debido a que las tramas son de longitud constante, los slots requeridos para completar la trama se utilizan para incrementar la región de contención.
 - 8)** Se genera la información requerida para la obtención de datos estadísticos. Se incluye instante de inicio de la región descrita por el Mapa, instante de la región de Confirmación, IEs involucrados en el Mapa, contador UCD, ventana de inicio y término del algoritmo exponencial Backoff, y cantidad total de slots de contención.
 - 9)** Establecimiento del tamaño total del mensaje Mapa, creación del encabezado de control correspondiente y programación del envío del paquete.

4.2.1.1.10.UCD_Time.

Ejecutivas de Entrada

- 1)** Se prepara el formato del nuevo mensaje, BWA_UCD_PK_FMT.
- 2)** Se establecen los parámetros:
 - a) Tasa de transmisión del canal ascendente.
 - b) Tamaño del minislot.
 - c) Preámbulo, paridad FEC, código de palabra FEC, banda de guarda y acortamiento de la última palabra de código para las regiones de Contención para solicitud de asignación de ancho de banda, de Contención para el envío de solicitudes y de información, de Mantenimiento inicial, de Mantenimiento de Estación, de Reservaciones cortas y de Reservaciones largas.
 - d) Contador de cambios del canal ascendente.
- 3)** Asignación de la longitud del paquete y creación de su encabezado de control.
- 4)** Encapsulamiento y programación del envío del mensaje a todas las estaciones de la red BWA.

4.2.1.1.11.Syn_Time.

Ejecutivas de Entrada

- 1)** Se prepara el formato del nuevo mensaje, BWA_SYNC_PK_FMT, así como su encabezado.

- 2) Asignación del tamaño del paquete, encapsulamiento y programación del envío del paquete. Se dirige hacia todas las SS de la red BWA.

El proceso hijo Bwa_be_txctl se encarga del empaquetamiento de los mensajes de control de la BS destinados a los nodos de la red BWA. El proceso contempla una cola FIFO (*First In, First Out*) mediante la cual se atienden los paquetes conforme se reciben. La figura 4-4 muestra la máquina de estados del proceso Bwa_be_txctl.

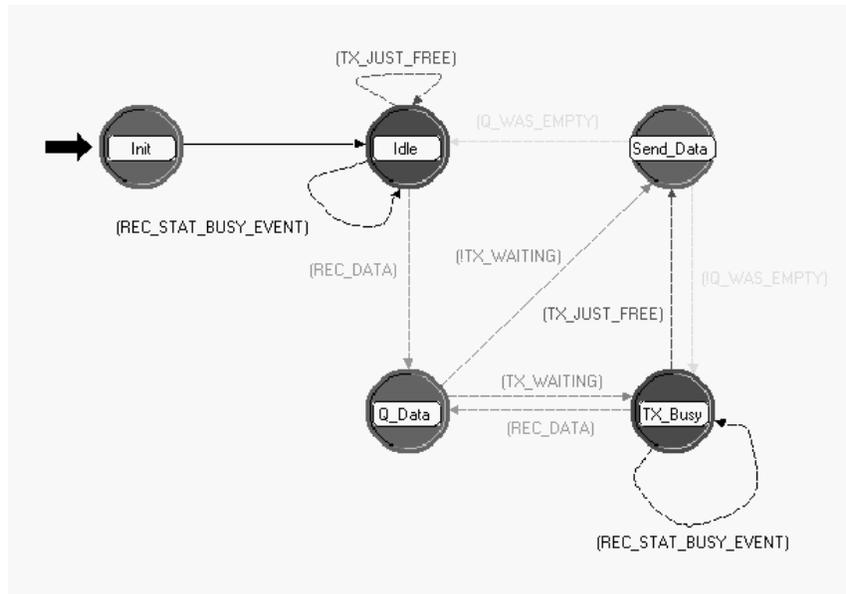


Figura 4-4: Proceso hijo Bwa_be_txctl.

A continuación se describen las funciones de cada uno de los estados que conforman al proceso Bwa_be_txctl.

4.2.1.1.12.Init

Ejecutivas de Entrada

- 1) Generación de la interrupción para el envío de información estadística de manera que sea enviada directamente al proceso hijo sin pasar por el proceso Bw_be_mgr

4.2.1.1.13.Idle

Ejecutivas de Salida

- 1) No existen paquetes en la cola de espera pendientes de ser transmitidos. En cuanto se recibe una interrupción, se determina su naturaleza, que puede corresponder a los eventos de ...

4.2.1.1.14.Q_Data

Ejecutivas de Entrada

- 1) En cuanto se recibe un paquete, se obtiene su formato que debe corresponder al de BWA_MAC_FRAME_FMT. De no ser así, se destruye.
- 2) Se obtiene la carga útil de la trama y se analiza el formato del paquete. En caso de que corresponda a un mensaje de control, BWA_MNG_PKT_FMT, con un encabezado administrativo, BWA_MNG_MAC_HD_FMT, se inserta en la cola de control.

3) Si no se cumplen las condiciones anteriores, el paquete se agrega a la cola de datos.

4.2.1.1.15.Send_Data

Ejecutivas de Entrada

- 1) Se verifica la existencia de paquetes en la cola de control. En caso de existir información, se programa la transmisión correspondiente.
- 2) En caso de que la cola de control esté vacía, se verifica la cola de datos para la cual se realiza la programación de una transmisión futura.

4.2.1.1.16.TX_Busy

Ejecutivas de Entrada

- 1) Durante la permanencia en este estado existen paquetes en alguna o en ambas colas y se está realizando la transmisión de un paquete. Se espera la ocurrencia de la interrupción TX_JUST_FREE que indica que ha terminado la transmisión.

4.2.2. Transmisión y recepción punto a punto

4.2.2.1. From_network_cloud_rx

Constituye el punto de entrada de un nodo para los paquetes recibidos en los enlaces punto a punto. Puede contener varios objetos de canal, cada uno capaz de recibir información proveniente de un nodo remoto. Varios atributos que caracterizan la transmisión de un paquete a través de estos enlaces están determinados por el enlace mismo y no son visibles en las características del módulo. La figura 4-5 muestra el módulo From_network_cloud_rx.

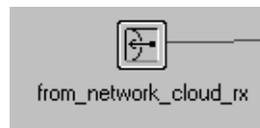


Figura 4-5: Módulo From_network_cloud_rx.

El único enlace de este módulo consiste en un cable estadístico hacia el módulo HE_MAC. Sus atributos son los siguientes:

- Name. Nombre del módulo para fines de identificación en el nodo.
- Channel. Incluye los canales de entrada soportados por el receptor. Consiste en cualquier número de objetos de canal punto a punto. Las características que definen al canal son:
 - Data rate. Tasa de transmisión a la que se aceptan los paquetes a través del canal. Con la finalidad de que el enlace opere, el valor de este parámetro debe coincidir con la tasa de transmisión del canal transmisor en el otro extremo del enlace. El valor empleado en la simulación es de 1024 bps.
 - Packet formats. Tipo de paquetes que pueden ser recibidos y reenviados a otros módulos. Los paquetes que no correspondan con estas características son desechados una vez que han sido recibidos completamente mediante el mecanismo link consistency. Permite prevenir la recepción de paquetes que no pueden ser procesados correctamente. La simulación define a este valor como todos los paquetes con y sin formato.
- Ecc threshold. Indica la proporción máxima de bits en error permitidos en un paquete para que pueda ser aceptado por el receptor y reenviado hacia el flujo de salida. Su valor puede emplearse en el proceso ecc model que se encarga de la detección y corrección de errores. La simulación emplea el valor 0.0.

- Icon name. Especifica el nombre del icono usado para representar el módulo receptor punto a punto en los diagramas del nodo. No tiene impacto práctico en la ejecución de las simulaciones.

4.2.2.2. To_network_cloud_tx

Conforma la salida del nodo para los paquetes que se transmiten a través de enlaces punto a punto. Puede contener diversos objetos de canal, capaces de realizar la transmisión a nodos remotos. Al igual que el módulo From_network_clud_rx, la mayor parte de los atributos del enlace están definidos por el canal. La figura 4-6 muestra el módulo To_network_cloud_tx.



Figura 4-6: Módulo To_network_cloud_tx.

El único enlace de este módulo consiste en un flujo de datos proveniente del módulo HE_MAC. Sus atributos son los siguientes:

- Name. Nombre del módulo para fines de identificación en el nodo.
- Channel. Incluye los canales de entrada soportados por el receptor. Consiste en cualquier número de objetos de canal punto a punto. Las características que definen al canal son:
 - Data rate. Tasa de transmisión a la que se aceptan los paquetes a través del canal. Con la finalidad de que el enlace opere, el valor de este parámetro debe coincidir con la tasa de transmisión del canal transmisor en el otro extremo del enlace. El valor empleado en la simulación es de 10^8 bps.
 - Packet formats. Tipo de paquetes que pueden ser recibidos y reenviados a otros módulos. Los paquetes que no correspondan con estas características son desechados una vez que han sido recibidos completamente mediante el mecanismo link consistency. Permite prevenir la recepción de paquetes que no pueden ser procesados correctamente. La simulación define a este valor como todos los paquetes con y sin formato.
- Icon name. Especifica el nombre del icono usado para representar el módulo receptor punto a punto en los diagramas del nodo. No tiene impacto práctico en la ejecución de las simulaciones.

4.2.2.3. To_stats_collection_tx

Cuenta con las mismas características que el módulo To_network_cloud_tx. Está destinado para la conectividad hacia el nodo colector de estadísticas. La figura 4-7 muestra el módulo To_stats_collection_tx.



Figura 4-7: Módulo To_stats_collection_tx.

4.2.3. Transmisión y recepción inalámbricas

4.2.3.1. Ant_rx

Representa el dispositivo receptor empleado para capturar la señal electromagnética proveniente de las SS. El propósito fundamental de este módulo es el modelado de la ganancia direccional en el receptor de radio. Está conectado al módulo From_link_rx mediante un enlace de flujo de datos, originado en Ant_rx. La figura 4-8 muestra el módulo Ant_rx.



Figura 4-8: Módulo Ant_rx.

El módulo Ant_rx está definido por un conjunto de características físicas, descritas a continuación:

- Name. Especifica el nombre empleado para identificar el módulo, Ant_rx.
- Pattern. Patrón de radiación de la antena (mapeo de la ganancia de la antena con el espacio tridimensional) que puede ser definido por el usuario mediante la creación de un nuevo objeto Antenna Pattern. Se empleó el patrón Isotropic, es decir, ganancia uniforme en todas direcciones. La figura 4-9 muestra el patrón de radiación empleado.

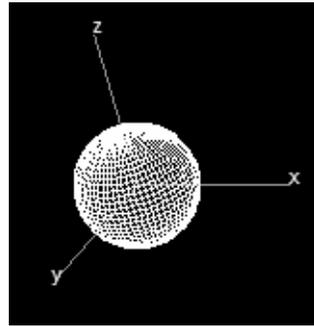


Figura 4-9: Patrón de radiación de la antena de la SS.

- Pointing ref. phi. Es la dirección en la componente phi (a partir del plano horizontal) de mayor ganancia de la antena. El modelo empleado especifica 0.0° .
- Pointing ref. theta. Dirección de la componente theta (sobre el plano horizontal) de mayor ganancia de la antena. El modelo empleado especifica 180° .
- Target latitude. Componente de latitud del objetivo hacia el cual el punto de referencia de la antena se dirige. El modelo empleado especifica 0° .
- Target longitude. Componente de longitud del objetivo hacia el cual el punto de referencia de la antena se dirige. El modelo empleado especifica 0° .
- Target altitude. Componente de altitud del objetivo hacia el cual el punto de referencia de la antena se dirige. Se mide desde la superficie terrestre. El modelo empleado especifica 0° .
- Icon name. especifica el nombre del icono usado para representar el módulo de antena en el Editor de Nodo. No tiene efectos sobre la simulación y se utilizó "Antenna".

4.2.3.2. Ant_tx

Representa el dispositivo transmisor empleado para transmitir la señal electromagnética hacia las SSs. Está conectado al módulo To_link_tx mediante un enlace de flujo de datos, originado en To_link_tx. La figura 4-10 muestra el módulo Ant_tx.



Figura 4-10: Módulo Ant_tx.

Los atributos que definen a este módulo, a excepción del nombre, son los mismos que el módulo Ant_rx, descrito anteriormente.

4.2.3.3. From_link_rx

Constituye el punto de acceso de los paquetes recibidos en el enlace de comunicación inalámbrica, conformado por la antena Ant_rx. Sus funciones principales son la detección, demodulación y corrección de errores en los paquetes recibidos. Se encuentra conectado con el módulo MAC mediante un flujo de datos originado en From_link_rx, y al módulo Ant_rx a través de un flujo de datos originado en Ant_rx. La figura 4-11 muestra el módulo From_link_rx.

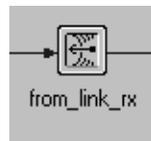


Figura 4-11: Módulo From_link_rx.

Se define mediante los siguientes atributos:

- **Name.** Nombre del módulo que permite identificarlo dentro del nodo SS. La simulación se refiere a él como From_link_rx.
- **Channel.** Especifica los canales entrantes soportados por el receptor. Consiste en un determinado número de objetos de canal de recepción de radio, uno por cada canal soportado por el receptor. En la simulación se emplearon los siguientes atributos del canal:
 - **Data rate (bps).** Tasa de transmisión en bits por segundo que soporta el canal receptor. Su valor se emplea en el proceso txdel model para el cálculo de latencia y por chanmatch model para determinar si los canales receptor y transmisor cuentan con características afines. Se encuentra configurado en 2,816,000 bps (2,750 kbps).
 - **Packet formats.** Indica el tipo de paquetes soportados por el canal. Aquellos paquetes que no pertenezcan a esta definición son desechados en un mecanismo denominado consistencia de enlace cuyo propósito es descartar los paquetes inapropiados o que no pueden ser procesados adecuadamente. La simulación soporta todos los paquetes con y sin formato.
 - **Bandwidth (kHz).** Ancho de banda del canal de transmisión. Permite determinar traslapes y coincidencias entre los canales del transmisor y del receptor para el cálculo de la ganancia de procesamiento. Junto con el atributo min frequency determina la frecuencia central de canal usado por el proceso power model. En la simulación se ha establecido en 1,760 kHz.
 - **Min frequency (MHz).** Frecuencia mínima soportada por el canal inalámbrico. Permite determinar si los afinidades y traslapes entre los canales receptor y transmisor. El valor empleado es 2,550 MHz.
 - **Spreading code.** Permite especificar un código para el canal definido por el usuario. Permite agrupar canales transmisores y receptores en clases de compatibilidad definidas por códigos comunes, creando subredes dentro de toda la red del modelo. Esta característica está deshabilitada en la simulación.
 - **Processing gain (dB).** Ganancia adquirida debido al procesamiento del canal. Se emplea para el cálculo de la relación SNR efectiva en el proceso ver model. Definido como la razón del Ancho de banda del canal a la Tasa de transmisión.

- **Modulation.** Especifica el nombre de la tabla de modulación empleada para localizar la tasa BER en función de la relación SNR efectiva. Esta tasa se usa en el proceso indicado por el parámetro `ber_model` cuyo resultado permite estimar el número de errores de bit en cada paquete. También se emplea en el proceso `chamatch_model` para determinar si un receptor y un transmisor son compatibles. La simulación emplea la modulación QPSK.
- **Noise figure.** Representa el efecto del ruido térmico en la transmisión. Es originado por la agitación térmica de los electrones en componentes resistivos y se calcula como uno de los componentes del ruido térmico en el proceso `bkgnoise_model`. El resultado de este proceso permite obtener posteriormente la relación SNR. Su valor se encuentra promovido y se especifica durante la ejecución de las simulaciones.
- **Ecc threshold.** Indica la proporción máxima tolerable de errores de un paquete para que puedan ser aceptados por el receptor y enviados hacia el flujo de salida del módulo. Este valor es empleado por el proceso especificado en el parámetro `Ecc_model`. La simulación emplea como umbral `Ecc threshold` el valor 10^{-6} .
- **Ragain model.** Especifica el proceso compilado empleado para el cálculo de la ganancia de la antena asociada a la transmisión entrante. El proceso simulado es `bwa_bs_ragain`.
- **Power model.** Proceso compilado empleado para determinar la potencia recibida de una transmisión entrante. La simulación emplea el proceso `bwa_bs_power`.
- **Bkgnoise model.** Especifica el nombre de un proceso compilado que calcula el ruido ambiental que afecta a la comunicación recibida. El modelo empleado es el predeterminado, `dra_bkgnoise`, y consiste en niveles constantes de ruido ambiental y ruido térmico en el receptor.
- **Inoise model.** Es el proceso compilado que calcula el ruido de interferencia que afecta a una transmisión entrante en particular. La simulación emplea el proceso por defecto, `dra_inoise`, que verifica si alguna colisión ha ocurrido. De ser así, incrementa un contador de colisiones definido para el paquete, determina si es interferencia o un paquete válido, y obtiene la potencia de los paquetes en colisión para determinar el efecto de ellos entre sí. El resultado de este proceso se transfiere al especificado en `snr_model` para determinar la relación SNR.
- **Snr model.** Proceso compilado usado para el cálculo de la relación SNR de una transmisión entrante en particular. La simulación emplea el proceso predeterminado, `dra_snr`, que calcula la relación de la potencia de la señal de la información a la potencia promedio acumulada de todas las fuentes acumuladas de ruido ambiental y de interferencia. El resultado de este proceso se usa en la etapa `ver_model` para el cálculo de la tasa BER esperada.
- **Ber model.** Indica el nombre de un proceso compilado capaz de calcular la Tasa de bit en error (BER, Bit Error Rate) esperada para una transmisión de radio recibida. En la simulación se emplea el modelo predeterminado, `dra_ber`, que calcula el BER con base en el promedio del cuadrado de la relación Señal a ruido y la función de modulación especificada por el atributo `Modulation`.
- **Error model.** Proceso compilado usado para determinar el número de errores de bit en un segmento de transmisión entrante. La simulación emplea el modelo `dra_error` que se basa en la tasa promedio de bit en error y la longitud del segmento. El valor obtenido se usa en el proceso `ecc_model` para decidir si el paquete se acepta o no.
- **Ecc model.** Corresponde a un proceso compilado que determina la aceptabilidad de una radiotransmisión entrante específica. El resultado de este proceso determina si el paquete se reenviará hacia los demás módulos o será desechado. Se emplea el proceso predeterminado, `dra_ecc`, que se basa en dos criterios. Los paquetes que no completaron su transmisión y aquellos que presentan una mayor proporción de errores que la indicada por el parámetro `ecc_threshold` son desechados.
- **Icon name.** Es el nombre del icono que representa al módulo. No tiene efectos en la simulación.

4.2.3.4. To_link_tx

El módulo To_link_tx conforma la salida de los paquetes transmitidos a través de enlaces de radio. Puede contener múltiples objetos de canal, en los que cada uno de ellos pueden realizarse intentos para el acceso a canales de recepción de radio en nodos remotos mediante un enlace inalámbrico. Realiza funciones de modulación y transmisión que afectan la recepción de la información. Al igual que el módulo From_link_rx, también es posible soportar diversos canales de comunicación. La figura 4-12 muestra el módulo To_link_tx.

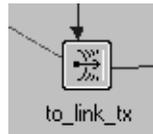


Figura 4-12: Módulo To_link_tx.

Cuenta con un flujo de datos provenientes del módulo HE_MAC y otro hacia Ant_tx, así como un cable estadístico dirigido hacia HE_MAC. Los atributos que caracterizan al módulo son:

- **Name.** Nombre del módulo que permite identificarlo dentro del nodo SS. La simulación se refiere a él como To_link_tx.
- **Channel.** Especifica las características de los canales soportados por el transmisor. Sus atributos son:
 - **Data rate (bps).** Tasa a la que la información puede transmitirse a través del canal. Se emplea en el proceso txdel model para determinar la latencia, y por chanmatch model para establecer la afinidad entre el receptor y el transmisor. La simulación emplea el valor de 22,400,000 bps (21,875 kbps).
 - **Packet formats.** Tipo de paquetes que acepta un canal de otros módulos del nodo que puede transmitir exitosamente. Aquellos paquetes que cubran con las características son desechados en el mecanismo denominado consistencia de canal. La simulación soporta todos los paquetes con y sin formato.
 - **Bandwidth (kHz).** Ancho de banda del canal cuyo valor se emplea para determinar afinidades y traslapes entre los canales receptor y transmisor. Su valor en la simulación es de 7,000 kHz..
 - **Min frequency (kHz).** Frecuencia base del canal que se usa para determinar la afinidad entre el transmisor y el receptor, además de la frecuencia central del canal, empleado en el proceso power model. La simulación emplea el valor de 2,500 MHz.
 - **Spreading code.** Código definido por el usuario para el canal. Permite definir clases de compatibilidad de código entre receptores y transmisores de una red para la creación de subredes. Está deshabilitado en la simulación.
 - **Power (W).** Potencia de transmisión para el envío de los paquetes a través del canal. Se emplea en el proceso power model. Su valor en la simulación es de 4.0 W.
- **Modulation.** Nombre de la tabla de modulación en la que se especifica la tasa BER en función de la relación SNR efectiva. El cálculo de la BER se lleva a cabo en el proceso ber model y permite determinar el número estimado de bits en error en cada segmento de paquete. También se usa en el proceso chanmatch model para determinar la compatibilidad entre el receptor y el transmisor. Se especifica en la simulación el valor QPSK.
- **Rxgroup model.** Proceso compilado que determina la posibilidad de interacción entre un receptor y un transmisor a través de un canal específico. El resultado se emplea para eliminar estadísticamente relaciones entre pares transreceptores sin interacción para minimizar el número de invocaciones al proceso durante la simulación. El modelo simulado emplea el proceso predeterminado, dra_rxgroup, que permite a todos los receptores de la red ser destinos potenciales.
- **Txdel model.** Indica el proceso compilado que calcula el tiempo de retraso asociado con la transmisión de un paquete. Este tiempo es el que separa el inicio de la transmisión del primer bit del paquete del final de la

transmisión del último bit. Se emplea el proceso predeterminado, `dra_txdel`, que calcula el retraso con base en la tasa de transmisión del canal y la longitud del paquete.

- **Closure model.** Proceso compilado que permite determinar la habilidad del canal transmisor para contactar a un canal receptor. La simulación emplea el proceso predeterminado, `dra_closure`, que determina si existe línea de vista (LOB, Line of sight) entre los nodos receptor y transmisor. Su resultado indica si deben seguirse ejecutando los procesos restantes.
- **Chanmatch model.** Corresponde a un proceso compilado que calcula dinámicamente uno de tres resultados que caracterizan el tipo de interacción que puede ocurrir entre un canal de transmisión y otro de recepción. La simulación emplea el proceso predeterminado, `dra_chanmatch`, que puede determinar que una transmisión contiene una señal válida que puede ser recibida, una fuente efectiva de interferencia o una señal irrelevante. En el último caso, no se realiza el procesamiento restante del módulo.
- **Tagain model.** Proceso compilado usado para obtener la ganancia de la antenna del transmisor para una señal de radio en dirección a un receptor en particular. Se emplea el proceso `Bwa_bs_tagain`.
- **Propdel model.** Nombre del proceso compilado que calcula el tiempo de propagación asociado con la transmisión de un paquete a través de un receptor específico. Se utiliza el proceso predeterminado, `dra_propdel`, que calcula dos tiempos de retraso. El primero es el tiempo transcurrido entre la transmisión del primer bit del paquete y su recepción en el receptor destino. El segundo es el tiempo de propagación entre la transmisión del último bit del paquete y su recepción en el destino.
- **Icon name.** Nombre del icono que representa al módulo transmisor en los diagramas del nodo. No tiene efectos prácticos en la simulación.

4.2.4. Funciones Adicionales

4.2.4.1. Rx_point

Se trata de un procesador sin conexiones a otros módulos en el nodo BS. La figura 4-13 muestra el módulo `Rx_point`.



Figura 4-13: Módulo `Rx_point`.

Este nodo está conformado por una máquina de estados, `Bwa_rx_point_ref`, cuya función principal, en sus Ejecutivas de Entrada, es la identificación del nodo y la red. También se encarga de la determinación de la ubicación espacial del nodo mediante las coordenadas x , y , z que determinan el sistema de referencia de la red BWA. La figura 4-14 muestra la máquina de estados del proceso `Bwa_rx_point_ref`.

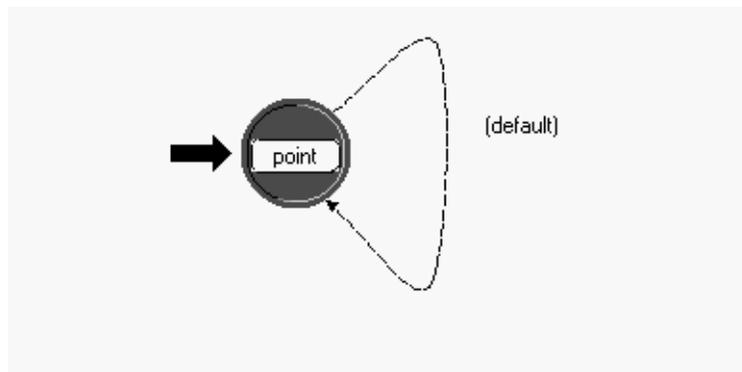


Figura 4-14: Proceso Bwa_rx_point_ref.

4.3. Diseño de la Unidad Estación Suscriptora

La Estación Suscriptora (SS, Subscriber Station) es el nodo que representa al equipo transceptor del suscriptor. Está conformado por módulos encargados de la generación y eliminación de paquetes de información, del envío y recepción al y desde el canal inalámbrico, del cumplimiento de las funciones propias de la subcapa MAC, así como de animaciones, característica disponible en la realización de simulaciones en OPNET®. La arquitectura del nodo BS se muestra en la figura 4-15:

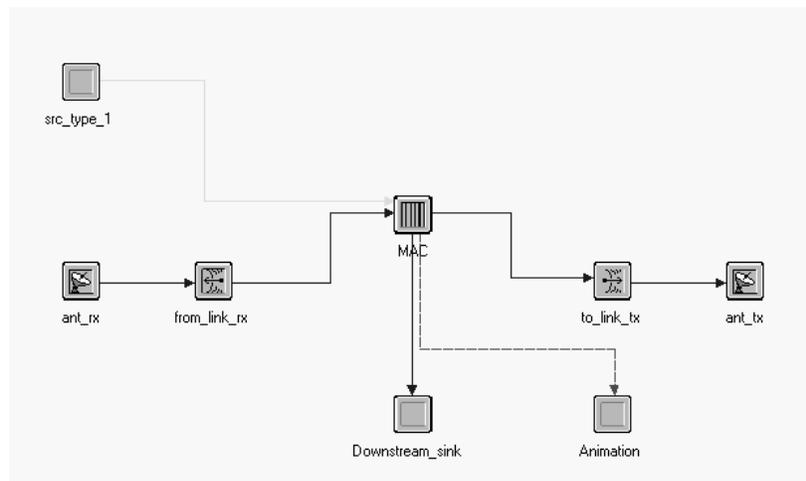


Figura 4-15: Nodo de la Estación Suscriptora.

Los enlaces que interconectan a los nodos pueden ser de los siguientes tipos:

- **Flujo de paquetes.** Transporta flujos de paquetes (colecciones de información de tamaño variable) desde la salida de un módulo generador de datos hasta la entrada de un módulo destino. Un flujo sólo puede conducir información en un solo sentido. Aunque la mayoría de los módulos pueden contar con varios flujos de paquetes, existen ciertas restricciones en las que un módulo generador sólo puede tener flujos en dirección a otros módulos y no desde otros.
- **Cable estadístico.** Envían información acerca del valor de algún parámetro desde algún nodo hacia otro. También pueden emplearse para informar sobre el estado de un módulo que los origina. Aunque estos datos pueden considerarse sólo para fines informativos en otros módulos, también son capaces de ser

usados, junto con algún valor umbral, para la activación de procesos o interrupciones específicos. Los módulos cola y procesador son los únicos que pueden recibir flujos desde este tipo de conexiones.

- **Asociación lógica de transmisión/recepción.** Establece relaciones entre módulos receptores y transmisores que pertenecen a un mismo enlace. Tiene por objeto el indicar que ambos módulos representan un mismo enlace y no sean separados por asignaciones automáticas que ocurren en el Editor de Proyectos al tratar de identificar los módulos transmisores y receptores.

Los módulos que intervienen en la SS son los que se indican a continuación:

- 1) Generación y eliminación de paquetes de información. Pueden incorporarse tantas fuentes de información como se desee, de acuerdo con el tipo de tráfico por transmitir (intermitente, constante, de paquetes de longitud variable, en tiempo real, etc.)
 - Src_type_1
 - Downstream_sink
- 2) Procesamiento de paquetes por enviar y recibidos, y realización de las funciones MAC. Consiste en una cola de recepción de paquetes que cuenta con un proceso administrativo y uno hijo para cumplir con las funciones vertebrales de la capa MAC de acuerdo con el protocolo IEEE 802.16.
 - MAC
- 3) Transmisión y recepción inalámbrica. Se encargan de las funciones de la capa física del modelo OSI y están compuestas por receptores y transmisores capaces de identificar señales con características específicas, así como de antenas transmisoras y receptoras.
 - Ant_rx, Ant_tx
 - From_link_rx, To_link_tx
- 4) Funciones adicionales. Es el módulo correspondiente a la generación de animaciones durante una simulación en OPNET®.
 - Animation

4.3.1. Generación y eliminación de paquetes de información

4.3.1.1. Src_type_1

Su función es la generación de paquetes de información cuyo formato, longitud y tasa de transmisión son definidas mediante variables promovidas y especificadas por el usuario, o bien establecidas internamente. Está conectado al módulo MAC mediante una asociación lógica de transmisión/recepción cuyo flujo se origina en Src_type_1. La figura 4-16 muestra el módulo Src_Type_1.



Figura 4-16: Módulo Src_Type_1.

El módulo generador de paquetes es un módulo de tipo procesador que cuenta con un proceso interno consistente en el proceso administrativo mostrado cuya máquina de estados se muestra a continuación y que se auxilia de un proceso hijo, descrito más adelante. La figura 4-17 muestra la máquina de estados del proceso Bwa_gen_root.

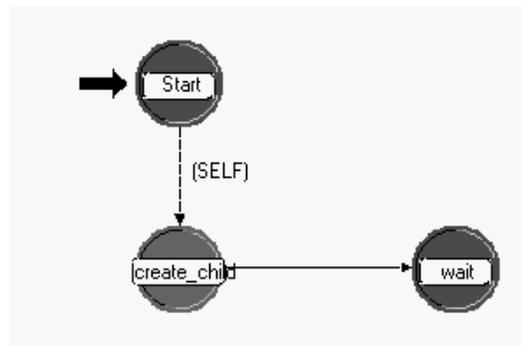


Figura 4-17: Proceso administrativo Bwa_gen_root.

Las funciones específicas de cada estado en el proceso administrativo (Bwa_gen_root) son las indicadas a continuación:

4.3.1.1.1.Start

Ejecutivas de Entrada

- 1) Obtiene el instante en el que se produce la generación de paquetes actual, que puede emplearse en una autointerrupción (SELF) cuyo inicio es igual al obtenido previamente.
- 2) En caso de que el número de nodos activos en la red (variable sim_active_nodes) siendo simulada sea mayor a 1, se activa la generación de tráfico IP intermitente mediante la programación de la interrupción SELF. También es necesario que se especifique que la generación de paquetes esté activa (variable de estado promovida traffic_generator_active) mediante el valor 1.

4.3.1.1.2.Create_child

Ejecutivas de Entrada

- 1) En caso de que esté activa la generación de paquetes (traffic_generator_active), se invoca el proceso hijo (bwa_gen_src) por cada una de las instancias generadoras de tráfico del tipo representado por este módulo con que cuente el nodo BS.

4.3.1.1.3.Wait

Es un estado en al que procede automáticamente el módulo una vez que ha completado la invocación de los procesos hijos correspondientes.

El proceso hijo Bwa_gen_src se encarga de las funciones del tráfico intermitente mediante un estado activo y otro activo de transmisión de paquetes. Se basa en la máquina de estados mostrada en la figura 4-18:

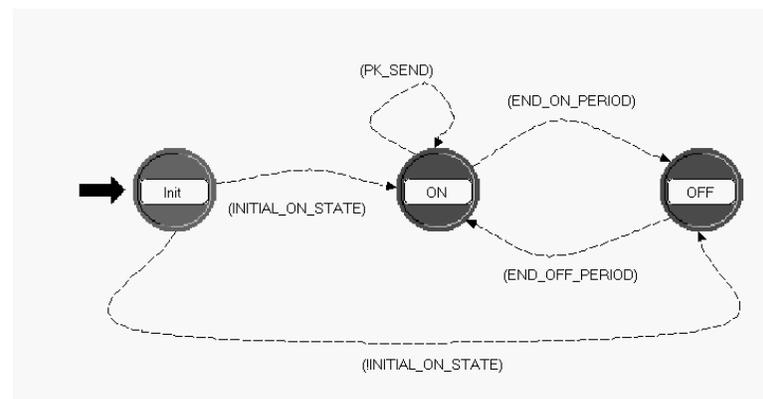


Figura 4-18: Proceso hijo Bwa_gen_src.

4.3.1.1.4. Init

Ejecutivas de Entrada

- 1) Identificación del módulo que invocó al proceso hijo así como el nombre del nodo al que pertenece
- 2) Se realiza la inicialización de variables que describen el comportamiento de la generación de paquetes. Éstas son variables promovidas, esto es, definidas en los parámetros de simulación:
 - a) Distribución de la duración del periodo activo de transmisión (`on_period_dist`). Función de densidad de probabilidad empleada para determinar la duración del periodo en el que el módulo transmite información.
 - b) Distribución del periodo de recepción de información (`on_period_arrival_dist`). Función de densidad de probabilidad empleada para determinar el tiempo que transcurre durante la generación de información por transmitir.
 - c) Distribución de la duración del periodo inactivo de transmisión (`off_period_dist`). Función de densidad de probabilidad empleada para determinar la duración del periodo en el que el módulo se encuentra inactivo, es decir, no transmite información.
 - d) Distribución de la longitud de los paquetes (`pksize_dist`). Función de distribución de probabilidad empleada para determinar la longitud de los paquetes por transmitir.
 - e) Prioridad de los mensajes (`msg_priority`). Parámetro empleado para establecer preferencias cuando el nodo incluye varios módulos generadores de tráfico con distintas prioridades.
 - f) Duración promedio del periodo entre la recepción de un mensaje y el siguiente (`mean_interarrival_time`).
 - g) Duración promedio del periodo activo de transmisión (`mean_on_time`).
 - h) Duración promedio del periodo inactivo de transmisión (`mean_off_time`).
 - i) Longitud promedio de los paquetes (`mean_pksize`).
 - j) Indicador de uso de distribución de paquetes (`SS_use_packet_distribution`). Especifica si se usa alguna de las distribuciones de probabilidad predefinidas para paquetes de 64, 128, 256, 512, 1024 y 1518 bytes.
- 3) Cálculo de parámetros iniciales como el Factor de Carga (Burstiness Factor) y de la Carga Media (Mean Load) en Mbps con base en los valores de las duraciones promedio de los periodos activo e inactivo de transmisión así como del tiempo entre la llegada de paquetes sucesivos.
- 4) Generación de apuntadores de variables de estado para las distribuciones de los promedios de duración de los estados activo e inactivo, del tiempo entre llegadas de paquetes sucesivos, y de la longitud de los paquetes generados.
- 5) Generación del instante de programación para la creación del paquete. Por defecto, el estado inicial del módulo es inactivo. Se genera la duración del estado de inactividad con base en la distribución especificada por `off_period_dist` y la media `mean_off_time`. Al valor obtenido se asocia la transición

INITIAL_ON_STATE, que permite el paso hacia el estado ON u OFF. Aún cuando esta interrupción puede conducir tanto a ON como a OFF, se ha modificado la ejecutiva de manera que el estado siguiente siempre sea OFF, o bien, que la interrupción INITIAL_ON_STATE tenga el valor de False.

4.3.1.1.5.ON

Ejecutivas de Entrada

- 1) En caso de que se haya activado la interrupción END_OFF_PERIOD desde el estado OFF, se calcula inicialmente el instante en el que finalizará la permanencia en el estado ON, con base en la distribución y la de la duración del periodo activo.
- 2) También se calcula el tiempo requerido para enviar un paquete con base en la distribución del periodo de recepción de información. En caso de que el instante calculado ocurra después de que haya finalizado el periodo activo, no se producirá la programación del envío. El instante de envío se asigna a la interrupción PK_SEND_CODE.

Ejecutivas de Salida

- 1) Estas ejecutivas se activan cuando ocurre la interrupción PK_SEND_CODE, es decir, cuando ha llegado el momento de generar un paquete. Se crea un paquete, sus campos y longitud respectivos y se envía.
- 2) En caso de que se haya especificado alguna distribución de paquetes mediante la variable SS_use_pk_dist, se obtiene la longitud correspondiente en bits, de lo contrario, se genera la longitud en bits de acuerdo con la distribución de longitud de paquete, pksize_dist.
- 3) El paquete se crea con base en el formato de CATV, según se especifica en la variable CATV_MSG_PK_FORMAT y se asigna la longitud calculada previamente.
- 4) Se obtienen y actualizan las estadísticas que pueden usarse en análisis posteriores, bits enviados, paquetes enviados, bits globales enviados y paquetes globales enviados.
- 5) Se envía el paquete hacia el flujo de salida del módulo generador.

4.3.1.1.6.OFF

Ejecutivas de Entrada

- 1) Cálculo del instante de finalización de permanencia en el estado OFF con base en la distribución del periodo inactivo, definido de acuerdo con off_period_dist. Este valor se relaciona con la interrupción OFF_PERIOD_CODE.

4.3.1.2. Downstream_sink

Es un módulo procesador encargado de recibir los paquetes provenientes del módulo MAC a través de un flujo de paquetes. Los paquetes recibidos son procesados para obtener información relativa al tipo de información que contienen, y otros parámetros que permiten la obtención de estadísticas. La figura 4-19 muestra el módulo Downstream_sink.

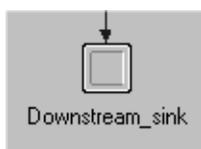


Figura 4-19: Módulo Downstream_sink.

Basa su funcionamiento en una sola máquina de estados, Bwa_down_sink, descrita a continuación y mostrada en la figura 4-20.

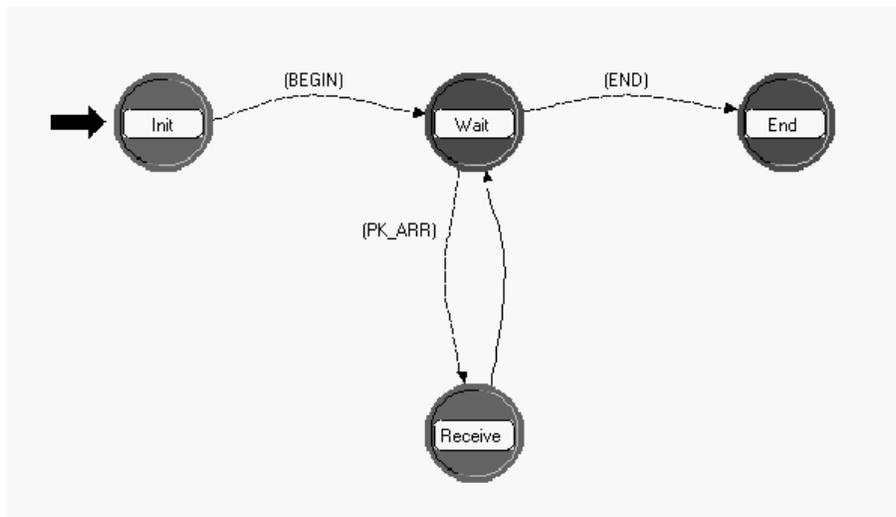


Figura 4-20: Proceso Bwa_down_sink.

4.3.1.2.1. Init

Ejecutivas de Entrada

- 1) Inicializa las variables de estado `dall_ete_gshandle` y `dall_thru_gshandle` para el manejo de las estadísticas de Retraso Ethernet y Throughput, respectivamente.
- 2) Obtiene el instante para el inicio de captura de estadísticas con base en la variable `stats_start_time`.

4.3.1.2.2. Wait

Es un estado en el que permanece el módulo hasta que se produzca cualquiera de las interrupciones `PK_ARR` o `END`.

4.3.1.2.3. Receive

Ejecutivas de Entrada

- 1) Al recibir un paquete, se obtienen los siguientes parámetros:
 - a) Identificador de aplicación (`app_id`).
 - b) Tipo de fuente generadora (`source_type`).
 - c) Instante de generación (`creation_time`).
 - d) Estadísticas recolectadas (`collect_stats`).
 - e) Longitud (`pksize`).
- 2) Se calculan el Retraso de la transmisión como una diferencia entre el instante actual y el de la creación del paquete.
- 3) Se destruye el paquete y se calcula el tiempo efectivo de obtención de estadísticas como una diferencia entre el instante actual y el de inicio de captura de estadísticas.
- 4) Se actualizan las estadísticas de Retraso Ethernet, Retraso Ethernet al cuadrado, paquetes recibidos y bits recibidos.
- 5) Se calculan y almacenan los valores del Retraso Ethernet y de Rendimiento (Throughput).
- 6) Aunque no se emplean, también se definen el cálculo de retrasos y de paquetes y bits recibidos distinguiendo hasta 6 tipos de tráfico, además del correspondiente a voz.

4.3.1.2.4.End

Ejecutivas de Entrada

- 1) Se exportan los siguientes valores en forma de estadísticas escalares:
 - a) Carga global ofrecida en el canal descendente [kbps] y [paquetes/seg].
 - b) Latencia promedio de acceso para todas las fuentes en el canal descendente [mseg].
 - c) Desempeño (Throughput) para todas las fuentes en el canal descendente [kbps].
 - d) Desviación estándar de la latencia en todas las fuentes en el canal descendente [mseg].
 - e) Coeficiente de variación de la latencia en todas las fuentes en el canal descendente.

4.3.2. Realización de las funciones MAC

4.3.2.1. MAC

El módulo MAC es una cola que lleva a cabo el procesamiento de los paquetes de información recibidos desde capas superiores en el nodo SS, así como de aquellos provenientes del canal de transmisión inalámbrico descendente. Este procesamiento incluye, principalmente, la agregación de información adicional (encabezados) a los paquetes, programación de oportunidades para el acceso al canal inalámbrico, envío de información durante oportunidades garantizadas por la BS, así como la resolución de colisiones durante periodos de contención. Está conformado por un proceso administrativo, *Bwa_wm_mgr*, que hace referencia a un proceso hijo, *Bwa_wm_child*. La figura 4-21 muestra el módulo MAC.

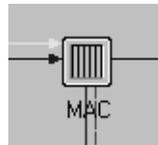


Figura 4-21: Módulo MAC.

Los enlaces desde y hacia otros módulos son los indicados a continuación:

- Flujo de asociación lógica de transmisión/recepción desde el módulo generador de paquetes *Src_type_1*.
- Flujo de paquetes hacia el módulo procesador de estadísticas de paquetes recibidos desde el canal inalámbrico descendente y eliminador de dichos paquetes, *Downstream_sink*.
- Flujo de paquetes desde el módulo receptor de radio, *From_link_rx*.
- Flujo de paquetes hacia el módulo transmisor de radio, *To_link_tx*.
- Flujo a través de un cable estadístico hacia el módulo para la generación de animaciones durante la ejecución de simulaciones, *Animation*.

El proceso administrativo *Bwa_wm_mgr* es central en la simulación de las funciones de la subcapa de Control de Acceso Medio del protocolo IEEE 802.16. La implementación en el modelo OPNET® contempla las funciones de Ranging, recepción y procesamiento de tráfico de aplicación desde capas superiores, y recepción y procesamiento de los paquetes de sincronización, UCD, MAP y de tráfico en el canal descendente, provenientes de la BS. La máquina de estados del proceso *Bwa_wm_mgr* es el que se muestra en la figura 4-22:

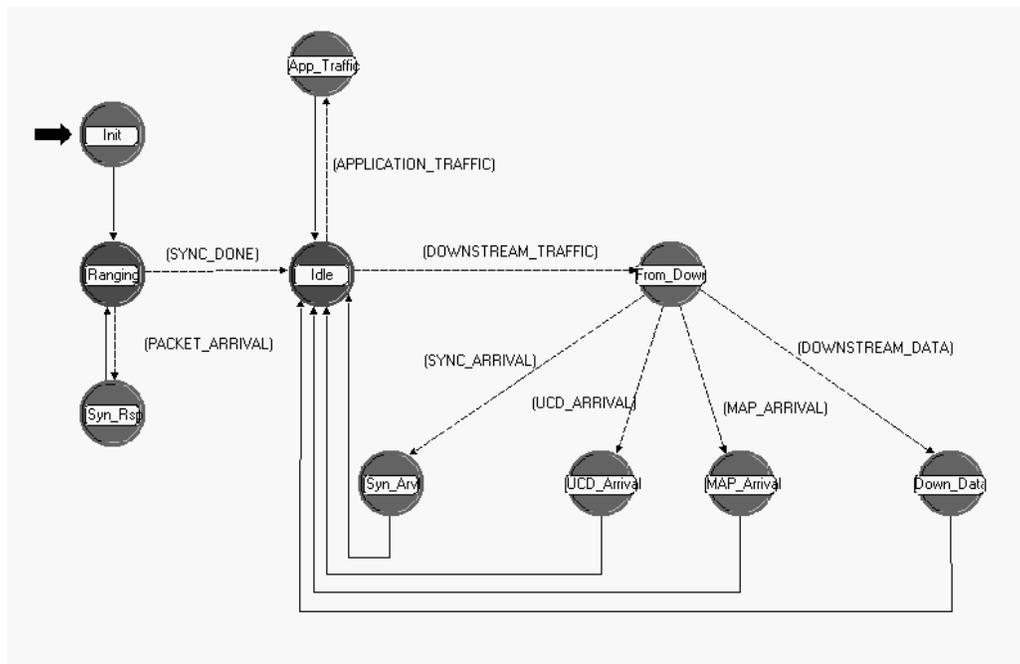


Figura 4-22: Proceso administrativo Bwa_wm_mgr.

4.3.2.1.1. Init

Ejecutivas de Entrada

- 1) Obtiene los atributos de simulación iniciales como el instante de Ranging, el tamaño de los paquetes de solicitud de Ranging y el tamaño de los paquetes de control MAC.
- 2) Genera la dirección e identificador del nodo. Ambos valores son enteros, únicos y consecutivos para cada Estación Suscriptora.
- 3) Cuando las SS se agrupan en distintas prioridades, se sigue el siguiente procedimiento:
 - a) La primera SS en cada una de las prioridades obtiene la cantidad de Estaciones que pertenecen a su prioridad. Se determina la cantidad máxima de estaciones por prioridad, Priority_Spacing, así como el valor inicial de los identificadores de SS, SID_start, ambos parámetros se obtienen desde el archivo de variables de ambiente bwa_mac_default_streams.ef. Se verifica que la topología actual cumpla con dichas especificaciones.
 - b) Se asigna una identificación a cada estación de acuerdo con la prioridad a la que pertenece. Consiste en un número consecutivo que inicia en 0. Cada una de las prioridades se identifica con el parámetro PRI (Priority Identifier).
- 4) En caso de que no se definan prioridades entre las SS, sólo se asigna la identificación a cada nodo.
- 5) Obtención de los parámetros de la Estación Suscriptora que incluyen:
 - a) Prioridad.
 - b) Tipo de Servicio.
 - c) Máscara de Política de Solicitud.
 - d) Modo de Fragmentación.
 - e) Máxima Tasa de Transmisión.
 - f) Tasa de Transmisión Ascendente.
 - g) Tasa de Transmisión Descendente.
 - h) Longitud Máxima de Paquetes.
 - i) Longitud Máxima de Flujo de Información (Burst).

- j) Intervalo de Solicitud Unicast.
 - k) Intervalo Máximo de Asignación no Solicitada (UGS).
 - l) Intervalo Mínimo de Asignación no Solicitada (UGS).
- 6)** Se establece la potencia inicial de transmisión de la SS mediante el siguiente procedimiento:
- a) Cálculo de la distancia entre la SS y la BS.
 - b) Obtención de la frecuencia inferior, del ancho de banda, del nivel de ruido (noise figure) y la potencia del canal de transmisión ascendente, así como de las ganancias de las antenas de la SS y la BS, con base en los parámetros de simulación.
 - c) Cálculo de la ganancia en la recepción de la Estación Suscriptora, el ruido ambiental, el ruido térmico, la relación señal a ruido (SNR) de la BS y la SNR efectiva en la SS.
 - d) Cálculo de las pérdidas de trayectoria considerando un terreno sinuoso con poca vegetación o un terreno plano con alta densidad de árboles, las compensaciones de la frecuencia y las alturas de las antenas de transmisión y recepción así como la atenuación (shadow fading).
 - e) Cálculo de la potencia mínima de transmisión en la SS con base en la recomendación de SNS mínima establecida en el protocolo IEEE 802.16, el ruido térmico, las ganancias de las antenas en la SS y la BS, así como las pérdidas por trayectoria.
 - f) Asignación del valor de la potencia mínima de transmisión al nodo SS correspondiente y al canal de transmisión.
- 7)** Envío de una solicitud de Ranging hacia la BS mediante el siguiente procedimiento:
- a) Generación del paquete de Ranging mediante el formato CATV_RNG_REQ_PK_FMT que incluye el SID (identificador de Estación Suscriptora).
 - b) Agregación al paquete de Ranging de la información relativa a QoS, que consiste en:
 - a. Prioridad.
 - b. Tipo de Servicio.
 - c. Máscara de Política de Solicitud.
 - d. Modo de Fragmentación.
 - e. Máxima Tasa de Transmisión.
 - f. Tasa de Transmisión Ascendente (Committed Bit Rate Up).
 - g. Tasa de Transmisión Descendente (Committed Bit Rate Down).
 - h. Longitud Máxima de Paquetes.
 - i. Longitud Máxima de un Flujo de Información (Burst).
 - j. Intervalo de Solicitud Unicast.
 - k. Intervalo Máximo de Asignación no Solicitada (UGS).
 - l. Intervalo Mínimo de Asignación no Solicitada (UGS).
 - c) Encapsulamiento del mensaje de control Ranging mediante la agregación de información sobre el Tipo de paquete (BWA_MSG_TYPE_RNG_REQ).
 - d) Agregación del encabezado MAC (BWA_SYNC_MAC_HD_FMT).
 - e) Envío directo de la trama hacia la BS.
- 8)** Ejecución de la interrupción SYNC_DONE para indicar la finalización del proceso de Ranging.

4.3.2.1.2.Ranging

Ejecutivas de Salida

- 1)** Verificación de la ocurrencia de las interrupciones SYNC_DONE y PACKET_ARRIVAL, correspondientes a la finalización del proceso de Sincronización y de recepción del paquete de respuesta desde la BS, respectivamente.

4.3.2.1.3.Syn_Rsp

Ejecutivas de Entrada

- 1)** Obtiene el paquete proveniente de la BS y verifica que corresponda con el formato BWA_MAC_FRAME_FMT.

- 2) Desencapsula el mensaje de control y verifica que tenga el formato BWA_MNG_PKT_FMT; de no ser así, lo destruye.
- 3) Comprueba que el destinatario del mensaje sea la BS, o bien, que sea un mensaje Broadcast. De ser así, verifica que tenga sea del tipo CATV_RNG_RSP_PK_FMT.
- 4) Comprueba que el SID del mensaje corresponda con el del nodo. Si es así, obtiene del mensaje el valor del Ajuste de Tiempo.
- 5) Se invoca el proceso hijo, Bwa_wm_child, para registrar el valor del retraso hacia la BS.
- 6) Destrucción del mensaje y del paquete recibido.

4.3.2.1.4.Idle

Ejecutivas de Salida

- 1) Verifica que se haya activado una interrupción correspondiente a la recepción de un paquete, PACKET_ARRIVAL, e identifica su procedencia, APPLICATION_TRAFFIC o DOWNSTREAM_TRAFFIC.

4.3.2.1.5.App_Traffic.

Ejecutivas de Entrada

- 1) Al entrar a este estado, el módulo invoca el proceso hijo, Bwa_wm_child, para el procesamiento del tráfico de aplicación por enviar hacia la BS.

4.3.2.1.6.From_Downstream.

Ejecutivas de Entrada

- 1) Verifica que el paquete recibido tenga el formato BWA_MAC_FRAME_FMT, de no ser así, lo desecha.
- 2) Identifica el tipo de mensaje incluido en el paquete realizando la comparación de su formato con el preestablecido para cada tipo, según se indica a continuación:
 - a) Paquete de información de aplicación proveniente de la BS, BWA_MNG_PKT_FMT.
 - b) Paquete de control, BWA_MNG_PKT_FMT, que puede pertenecer a alguno de los siguientes:
 - a. Mapa descriptor del canal ascendente, BWA_MAP_PK_FMT.
 - b. Paquete de sincronización, BWA_SYNC_PK_FMT.
 - c. Paquete descriptor del canal ascendente, BWA_UCD_PK_FMT.
- 3) En cualquiera de los cuatro casos anteriores, recepción de paquete de datos, mapa, de sincronización, o UCD, se activa la interrupción DOWNSTREAM_DATA, MAP_ARRIVAL, SYNC_ARRIVAL o UCD_ARRIVAL, respectivamente.

4.3.2.1.7.Down_Data.

Ejecutivas de Entrada

- 1) Comprueba que el destino del mensaje sea igual que la dirección de la estación actual.
- 2) En caso de que el destinatario sea la SS actual, envía el paquete hacia el módulo Downstream_sink para la recolección de estadísticas.

4.3.2.1.8.MAP_Arrival.

Ejecutivas de Entrada

- 1) Procesa el paquete mapa mediante la invocación del proceso hijo Bwa_wm_child.

4.3.2.1.9.Syn_Arvl y UCD_Arrival.

Ejecutivas de Entrada

- 1) No se encuentra implementado ningún proceso en ninguno de estos estados, salvo la destrucción del paquete.

El proceso hijo Bwa_wm_child se encarga de procesar y redirigir los paquetes provenientes de la BS de tipo MAP así como los paquetes generados por las fuentes de información de aplicación. Cada vez que el módulo MAC de una SS recibe alguno de estos paquetes, invoca este proceso desde los estados App_Traffic o MAP_Arrival. El proceso contempla una cola FIFO (*First In, First Out*) mediante la cual se atienden los paquetes conforme se reciben. Pueden incorporarse funciones que permitan configurar distintos niveles de prioridad para cumplir con los requerimientos de QoS necesarios para el funcionamiento de aplicaciones en tiempo real como voz o videoconferencia, por ejemplo. También se incluyen funciones específicas para la resolución de colisiones, en específico, el algoritmo exponencial vuelta atrás o Exponential Back-up. La figura 4-23 muestra la máquina de estados del proceso Bwa_wm_child.

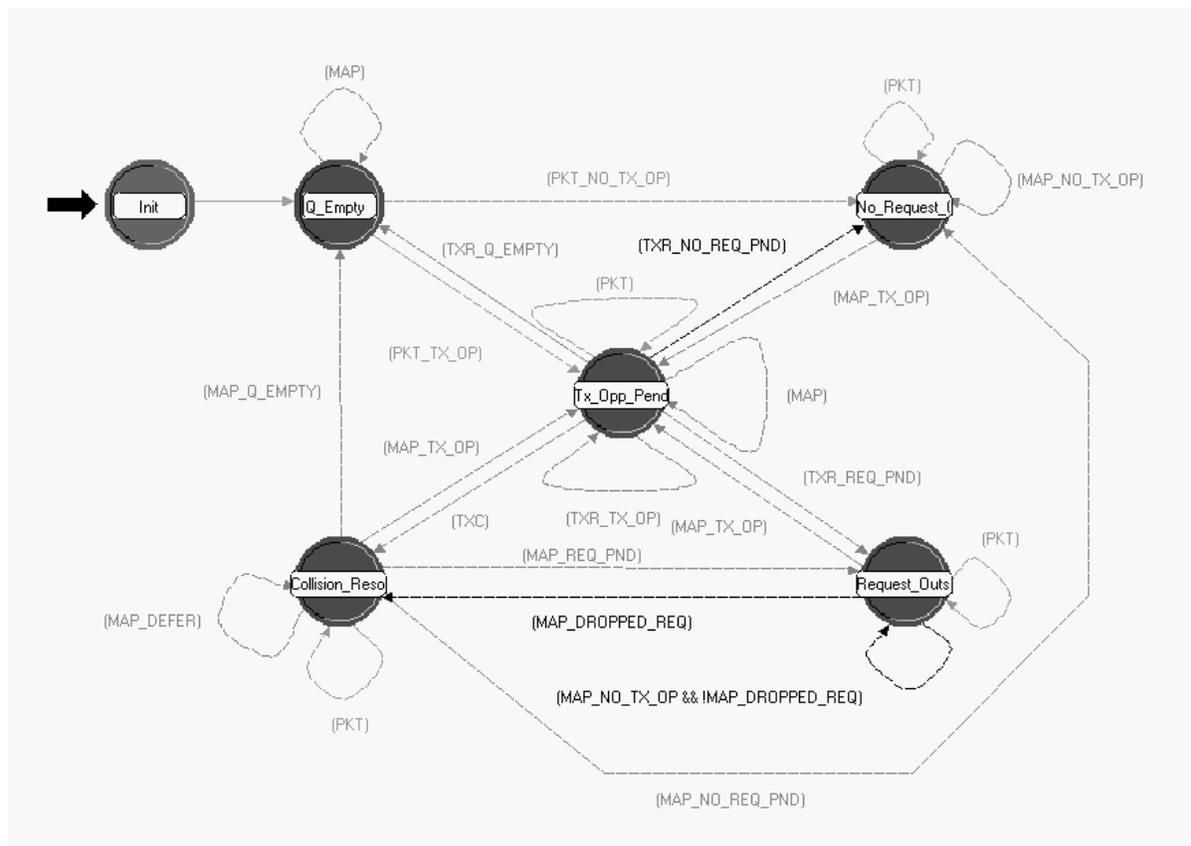


Figura 4-23: Proceso hijo Bwa_wm_child.

Cada uno de los estados en el proceso hijo corresponde a situaciones específicas de la cola de procesamiento, de la existencia de transmisiones pendientes y de solicitudes sin resolver y de la ocurrencia previa 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: Descripción de los Estados del proceso Bwa_wm_child.

A continuación se describen las funciones de cada uno de los estados anteriores:

4.3.2.1.10.Init

Ejecutivas de Entrada

1) Inicialización de las variables de estado enlistadas a continuación:

- a) Transmisión programada, tx_scheduled.
- b) Cola no vacía, queue_occupied.
- c) Solicitud sin respuesta, req_pending.
- d) Tiempo de espera de respuesta, ack_wait_time.
- e) Número de intentos de transmisión, attempts.
- f) En deferencia tras colisión, defer.
- g) Ventana actual del algoritmo backoff, backoff.
- h) En espera de confirmación después de una transmisión de información, data_ack_pending.
- i) Inicio de la ventana del algoritmo backoff, data_backoff_start.
- j) Fin de la ventana del algoritmo backoff, data_backoff_end.
- k) Longitud en bytes del paquete encriptado, encryption_sz.
- l) Paquetes en contención, contention_hold.
- m) Paquetes enviados, pk_snt.
- n) Slots de contención transcurridos, cs_passed.
- o) Slots de contención pendientes, cs_remaining.
- p) Longitud del encabezado de la carga útil, payload_header_size.
- q) Longitud del encabezado de la carga útil con solicitud, payload_header_size_with_req.
- r) Longitud del encabezado de la carga útil con solicitud de confirmación, payload_header_size_with_ack_reqed.
- s) Longitud del encabezado de paquetes concatenados, concat_header_size.
- t) Longitud del encabezado de paquetes concatenados con solicitud de confirmación, concat_header_size_with_ack_reqed.
- u) Longitud del paquete de solicitud de asignación de ancho de banda, request_packet_size.
- v) Longitud de la información de solicitud de asignación de ancho de banda, request_data_length.

2) Obtención de los parámetros SID, dirección de la SS, tiempo de retraso por propagación, y, en caso de aplicar, de QoS, fragmentación, piggyback y UGS.

4.3.2.1.11.Q_Empty

En este estado no existe información por transmitir en la cola de espera, solicitudes pendientes ni transmisiones previamente programadas. Sólo son válidos los eventos de recepción de Mapas, MAP_EVENT, o de paquetes, PKT_EVENT.

Ejecutivas de Salida

1) Durante la permanencia en el presente estado se identifica el tipo de evento de acuerdo con la interrupción generada. Los eventos válidos son PKT_EVENT o MAP_EVENT.

- 2) En caso de que haya ocurrido un PKT_EVENT, se verifica que esté habilitado y activo el servicio UGS. De ser así, se busca un minislot disponible para iniciar la transmisión, produciéndose la interrupción PKT_TX_OP que conduce al estado Tx_Opp_Pending. De lo contrario, iniciará un periodo de deferencia hasta encontrar alguna oportunidad válida. Lo anterior se realiza mediante el algoritmo exponencial Backoff. La interrupción generada es PKT_NO_TX_OP hacia el estado No_Request_Outstanding.
- 3) Si ocurre un MAP_EVENT, al producirse la interrupción MAP, se almacenará la información contenida en el paquete y, posteriormente, se desechará. El proceso permanecerá en el estado Q_Empty.

4.3.2.1.12.No_Request_Outstanding

Aunque en este estado existen paquetes en la cola de espera, no existen solicitudes de asignación de ancho de banda pendientes de ser resueltas ni se han realizado transmisiones previamente. Tampoco se ha activado la deferencia (producida por la ejecución del algoritmo Backoff al ocurrir una colisión). Los eventos válidos son la recepción de un paquete de aplicación, PKT_EVENT, que, además de agregarlo a la cola de espera, no genera ninguna acción adicional, y la de un paquete Mapa, MAP_EVENT, en el que se busca alguna oportunidad válida para la transmisión de los paquetes acumulados en la cola.

Ejecutivas de Salida

- 1) Al recibir un paquete Mapa, se determina si se está empleando el servicio UGS y que esté activo. De ser así, se busca en el Mapa alguna oportunidad de transmisión reservada para la estación actual. La información obtenida del paquete Mapa es la siguiente (Read_MAP):
 - a) Instante de inicio del periodo descrito por el Mapa (Map_start_time).
 - b) Instante de finalización del periodo descrito por el Mapa (Map_end_time).
 - c) Instante de inicio para la región de confirmación (Map_ack_time).
 - d) Valor mínimo de la ventana para el algoritmo exponencial Backoff (Data_backoff_start).
 - e) Valor máximo de la ventana para el algoritmo exponencial Backoff (Data_backoff_stop).
 - f) Número total de slots de contención (Total_cs_in_current_map).
 - g) Las regiones incluidas, mismas que pueden corresponder a las de contención para la transmisión de información o de solicitudes (ie_lst_req_data), de respuesta a solicitudes sin otorgamiento de reservaciones (ie_lst_pending), de mantenimiento (ie_lst_maint), reservaciones cortas (ie_lst_short), reservaciones largas (ie_lst_long), o de confirmaciones (ie_lst_data_ack).

Con la finalidad de determinar si existe una oportunidad de transmisión, se realizan las siguientes funciones (find_reserved_slot):

 - a) Lectura del Mapa para encontrar un IE válido cuyo SID coincida con el de la Estación Suscriptora actual (Parse_reserved_ie_list). La validez del IE consiste en que esté contenido en el mapa actual, es decir, que si instante de inicio del IE se ubique entre los límites temporales del Mapa, y que, considerando, el retraso, no haya transcurrido previamente.
 - b) Con base en la información obtenida del Mapa, primero se determina si se cuenta con alguna oportunidad de transmisión corta (ie_lst_short), de lo contrario, se busca una oportunidad larga (ie_lst_req_data).
 - c) Se determina la cantidad de los paquetes por transmitir tomando en cuenta la cantidad de información de aplicación por enviar en paquetes y bytes, la existencia de solicitudes por enviar, la palabra de código y la paridad FEC, el preámbulo y la banda de guarda, así como la existencia de acortamientos en la última palabra de código.
 - d) Considerando la latencia de propagación se realiza una programación para la transmisión de los paquetes de información.
 - e) A continuación, se determina si existe alguna oportunidad unicast para la transmisión de solicitudes de asignación de ancho de banda, es decir, un IE exclusivo para la SS actual en el que puede enviar una solicitud (ie_lst_req_data). En este caso, sólo se determina la longitud de la información por enviarse para incluirla en la solicitud.
- 2) En caso de no estar habilitado o no estar activo el servicio UGS, se buscará alguna región en el mapa en la que se incluya alguna oportunidad de transmisión (Find_tx_op) como se describe a continuación:
 - a) En caso de encontrar algún slot reservado para la SS actual (find_reserved_slot), finaliza la búsqueda.

- b) Cuando no existen reservaciones, primero se determina la longitud de la información por enviar. También se inicializa el contador de slots de deferencia, que corresponde al número de slots transcurridos antes de llevar a cabo la transmisión.
- c) Se determina la cantidad de slots disponibles en la región de contención de acuerdo con la información proporcionada por el mensaje Mapa.
- d) Disminuye en uno el contador de slots por esperar, determinado por la ejecución del algoritmo exponencial backoff.
- e) En caso de que existan paquetes de información o solicitudes de asignación de ancho de banda en espera de ser enviados y exista en el Mapa un IE correspondiente a una oportunidad de transmisión para un grupo Multicast, se realiza una programación. De no existir paquetes de información en espera, sólo se programa la transmisión futura de una solicitud. Si se trata de una región dirigida a todas las estaciones, Broadcast, sólo se programa una solicitud futura para la asignación de ancho de banda.

4.3.2.1.13. Request_Outstanding

En el estado Request_Outstanding se ha realizado previamente una solicitud de asignación de ancho de banda que no se ha resuelto. Existen paquetes de información en la cola de espera que serán transmitidos una vez recibida la confirmación desde la BS mediante un mensaje Mapa. En caso de que se reciba un paquete de información, PKT_EVENT, sólo se agrega a la cola, mientras que a la llegada de un Mapa se analizará su información para buscar alguna reservación en respuesta a la solicitud previa, MAP_EVENT. Son inválidos los eventos TXC_EVENT y TXR_EVENT, que corresponden a la ocurrencia de una oportunidad programada para la transmisión de datos.

Ejecutivas de Salida

- 1) Se verifica el tipo de eventos que ocurren durante este estado. Como se mencionó anteriormente, sólo son válidos MAP_EVENT y PKT_EVENT.
- 2) En caso de haberse recibido un mensaje Mapa, MAP_EVENT, se realiza el siguiente proceso:
 - a) Se ejecuta una búsqueda en los IE del Mapa para hallar alguno que corresponda con el SID de la SS.
 - b) En caso de haber encontrado el SID en el Mapa, se determina el número de paquetes por transmitir considerando la cantidad de información almacenada en la cola, así como parámetros como el código de palabra y la paridad FEC, el preámbulo, la banda de guarda y el acortamiento de la última palabra de código.
 - c) Tomando en cuenta el tiempo de propagación entre la BS y la SS, se programa el instante para la transmisión.

Lo anterior se lleva a cabo primero para los IE en el Mapa que correspondan a Asignaciones Cortas. Posteriormente se repite para el caso de las Asignaciones Largas y las Asignaciones Unicast. Éstas últimas son reservaciones que la BS hace para proporcionar la oportunidad a la SS de hacer solicitudes de asignación de ancho de banda, es decir, corresponden al Servicio de Consulta (Polling Service).
- 3) Si no se encontró alguna reservación válida en el Mapa y si el tiempo transcurrido desde el último envío de solicitudes de asignación de ancho de banda es mayor que el tiempo máximo para la recepción de confirmaciones, se asume que ha ocurrido una colisión y la SS entra en deferencia, es decir, mediante el algoritmo Exponencial Backoff se determina el número de minislots de espera antes de reenviar la solicitud, la ventana de deferencia. A continuación se busca una nueva oportunidad para transmitir esta nueva solicitud.

4.3.2.1.14. Tx_Opp_Pending

Este es el estado en el que se espera la ocurrencia para realizar la transmisión efectiva de la información de la SS. Existen paquetes de información en la cola de espera, se cuenta con una oportunidad válida para la transmisión y se ha determinado el instante para ello. Lo anterior es aplicable tanto para los periodos de contención como para los de reservación. Es posible recibir más paquetes de datos provenientes de la SS, mismos que sólo se almacenan en la cola de espera y para los cuales tendrá que realizarse una nueva solicitud de asignación de ancho de banda. También puede recibirse un Mapa desde la BS, pero no se realiza

alguna acción específica. Los eventos que producen alguna acción específica en este estado son TXC_EVENT y TXR_EVENT, la ocurrencia del instante determinado para hacer la transmisión en colisión o en reservación, respectivamente.

Ejecutivas de Salida

- 1) Al recibirse un nuevo paquete proveniente del generador de datos en la SS, se almacena en la cola y se determina que es necesario realizar una nueva solicitud de asignación de ancho de banda. Tanto el paquete como la solicitud por hacer se consideran independientes de aquellos por los cuales se espera la ocurrencia del instante de transmisión.
- 2) Si ocurre alguno de los eventos TXC_EVENT o TXR_EVENT, correspondientes a los instantes determinados para hacer la transmisión en contención o mediante una reservación, se obtienen los parámetros incluidos en el último mensaje UCD enviado por la BS, enlistados a continuación:
 - a) Longitud del minislots.
 - b) Límite de las asignaciones cortas.
 - c) Tasa de transmisión en el canal ascendente.
 - d) Para las secciones de Contención para solicitudes, Contención para solicitudes y transmisión de información, de Mantenimiento inicial, de Mantenimiento de estación, de Reservaciones cortas, y de Reservaciones largas:
 - a. Preámbulo.
 - b. Paridad FEC.
 - c. Código de palabra FEC.
 - d. Banda de guarda.
 - e. Acortamiento de la última palabra de código.
- 3) Se ejecuta la transmisión de acuerdo con el IE del Mapa que se esté utilizando:
 - a) Contención para solicitudes.
 - a. Se determina el ancho de banda requerido en minislots para la transmisión de los paquetes en la cola.
 - b. En caso de que esté habilitado el servicio UGS para el soporte de tráfico VoIP, se envía prepara una solicitud en la que el número de minislots requeridos es igual a cero. Con ello se activa el servicio y se realiza una sincronización con la BS.
 - c. Se incluye en el encabezado del paquete el resultado del cálculo de minislots requeridos. En el caso de solicitudes de este tipo, la banda de guarda es cero.
 - d. Se efectúa la transmisión de la solicitud. En caso de que se realice durante un periodo dirigido a un SID Broadcast o Multicast, inicia un conteo del número de intentos de la transmisión. Se determinará que ocurrió una colisión sólo si se ha agotado el tiempo máximo de espera de recepción de confirmaciones.
 - b) Contención para solicitudes y transmisión de información.
 - a. Inicialmente se verifica que efectivamente existan paquetes o solicitudes pendientes. De no ser así, finaliza la permanencia en el estado.
 - b. Si se transmitirá una solicitud, se determina la cantidad requerida de ancho de banda en minislots de acuerdo con la información almacenada en la cola de espera. En este caso no se incluye la Banda de Guarda. Si el SID correspondiente al IE pertenece a un grupo Multicast, inicia o continúa el conteo de intentos. Sólo se considerará que ocurrió una colisión al vencerse el tiempo máximo de espera de recepción de confirmaciones.
 - c. De existir más de un paquete por enviarse y si está habilitada la concatenación, se prepara el encabezado respectivo y se envía cada uno de los paquetes.
 - d. Si sólo se envía un paquete o bien si se envían varios paquetes, en el caso del último, y de existir alguna solicitud pendiente de ser enviada y estar habilitado el soporte para solicitudes Piggyback, se calcula el número de minislots requeridos, se prepara el subencabezado correspondiente y se agrega a la transmisión del último paquete. Se ignora la Banda de Guarda.
 - c) Reservaciones cortas y Reservaciones largas.

- a. En caso de estar habilitado el servicio UGS, se determina que no hay solicitudes pendientes por ser enviadas, ya que son incompatibles con este tipo de servicio. También se comprueba que existan paquetes o solicitudes por transmitir.
 - b. Si sólo se enviará una solicitud, se prepara el encabezado que incluye el cálculo de los minislots requeridos. Al enviar el paquete, no se considera la Banda de Guarda.
 - c. Al existir más de un paquete por enviar y estar habilitada la concatenación, se prepara el encabezado correspondiente. El overhead de la capa física se agrega en la última trama. Se inicia la transmisión de cada uno de los paquetes a excepción del último, agregando el subencabezado de concatenación.
 - d. En caso de transmitir un solo paquete, de no estar habilitada la concatenación, o si lo está y se transmitirá el último paquete, se verifica si existen solicitudes pendientes. De ser así y de estar habilitadas las solicitudes Piggyback, se calcula el número de minislots requeridos y se prepara el subencabezado correspondiente. Se agrega el encabezado al paquete y se realiza la transmisión. Se determina cuál es el instante que corresponde al tiempo máximo de espera de confirmación para la detección futura de colisiones.
- d) Confirmación de información, Mantenimiento inicial, Mantenimiento de estación, Región reservada, Región de expansión.
- a. No están disponibles las implementaciones de estas secciones en el modelo actual.

4.3.2.1.15.Collision_Resolution

Las SSs mantienen control de sus transmisiones y solicitudes mediante la lectura de los mensajes Mapa enviados por la BS. La ocurrencia de colisiones se detecta mediante el monitoreo de las asignaciones realizadas por la BS que deben ocurrir durante un periodo específico. Cuando este lapso se vence, la SS determina que su transmisión previa incurrió en una colisión y debe reenviarla. El algoritmo exponencial Backoff se emplea para determinar el número de minislots de espera antes de la retransmisión. Durante el estado Collision_Resolution los únicos eventos válidos son PKT_EVENT y MAP_EVENT, siendo este último el único que genera acciones específicas en el estado.

Ejecutivas de Salida

- 1) Al recibir un mensaje Mapa proveniente de la BS y al estar pendiente la recepción de la confirmación de envío de información, se verifica que esté contenida en el Mapa. De ser así, se eliminan todos los paquetes de la cola que hayan estado involucrados en la colisión ya que se considera exitosa su transmisión hacia la BS.
- 2) Si la colisión ocurrió debido al envío de una solicitud de asignación de ancho de banda, al recibir el Mapa se busca alguna reservación hecha al SID de la SS. De encontrarse, se busca el minislot que se empleará para la transmisión. En caso contrario, se busca alguna confirmación de recepción, lo cual indica que la BS ha recibido exitosamente la solicitud pero aún no ha hecho reservaciones para la transmisión efectiva de los paquetes de la SS.
- 3) En caso de que no se hayan recibido confirmaciones de recepción de información o de solicitudes, y ha transcurrido el tiempo máximo de espera para los mensajes de confirmación, se considera que ha ocurrido una colisión. A continuación se establece la deferencia de acuerdo con el algoritmo exponencial back-off.
- 4) Si no se recibió una reservación, todavía existen paquetes en la cola de espera y no hay solicitudes pendientes de ser resueltas, se busca una oportunidad válida para enviar la información por contención.
- 5) Finalmente, si se recibió un Mapa pero no ha transcurrido suficiente tiempo para poder recibir un mensaje de confirmación, se permanece en el estado Collision_Resolution.

4.3.3. Transmisión y recepción inalámbricas

4.3.3.1. Ant_rx

Representa el dispositivo receptor empleado para capturar la señal electromagnética proveniente de la BS. El propósito fundamental de este módulo es el modelado de la ganancia direccional en el receptor de radio. Está

conectado al módulo From_link_rx mediante un enlace de flujo de datos, originado en Ant_rx. La figura 4-24 muestra el módulo Ant_rx.



Figura 4-24: Módulo Ant_rx.

El módulo Ant_rx está definido por un conjunto de características físicas, descritas a continuación:

- Name. Especifica el nombre empleado para identificar el módulo, Ant_rx.
- Pattern. Patrón de radiación de la antena (mapeo de la ganancia de la antena con el espacio tridimensional) que puede ser definido por el usuario mediante la creación de un nuevo objeto Antenna Pattern. Se empleó el patrón Isotropic, es decir, ganancia uniforme en todas direcciones. La figura 4-25 muestra el patrón de radiación indicado.

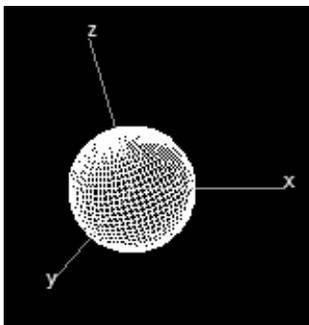


Figura 4-25: Patrón de radiación de la antena de la SS.

- Pointing ref. phi. Es la dirección en la componente phi (a partir del plano horizontal) de mayor ganancia de la antena. El modelo empleado especifica 0.0° .
- Pointing ref. theta. Dirección de la componente theta (sobre el plano horizontal) de mayor ganancia de la antena. El modelo empleado especifica 180° .
- Target latitude. Componente de latitud del objetivo hacia el cual el punto de referencia de la antena se dirige. El modelo empleado especifica 0° .
- Target longitude. Componente de longitud del objetivo hacia el cual el punto de referencia de la antena se dirige. El modelo empleado especifica 0° .
- Target altitude. Componente de altitud del objetivo hacia el cual el punto de referencia de la antena se dirige. Se mide desde la superficie terrestre. El modelo empleado especifica 0° .
- Icon name. especifica el nombre del icono usado para representar el módulo de antena en el Editor de Nodo. No tiene efectos sobre la simulación y se utilizó "Antenna".

4.3.3.2. Ant_tx

Representa el dispositivo transmisor empleado para transmitir la señal electromagnética hacia la BS. Está conectado al módulo To_link_tx mediante un enlace de flujo de datos, originado en To_link_tx. La figura 4-26 muestra el módulo Ant_tx.



Figura 4-26: Módulo Ant_tx.

Los atributos que definen a este módulo, a excepción del nombre, son los mismos que el módulo Ant_rx, descrito anteriormente.

4.3.3.3. From_link_rx

Constituye el punto de acceso de los paquetes recibidos en el enlace de comunicación inalámbrica, conformado por la antena Ant_rx. Sus funciones principales son la detección, demodulación y corrección de errores en los paquetes recibidos. Se encuentra conectado con el módulo MAC mediante un flujo de datos originado en From_link_rx, y al módulo Ant_rx a través de un flujo de datos originado en Ant_rx. La figura 4-27 muestra el módulo From_link_rx.

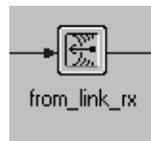


Figura 4-27: Módulo From_link_rx.

Se define mediante los siguientes atributos:

- **Name.** Nombre del módulo que permite identificarlo dentro del nodo SS. La simulación se refiere a él como From_link_rx.
- **Channel.** Especifica los canales entrantes soportados por el receptor. Consiste en un determinado número de objetos de canal de recepción de radio, uno por cada canal soportado por el receptor. En la simulación se emplearon los siguientes atributos del canal:
 - **Data rate (bps).** Tasa de transmisión en bits por segundo que soporta el canal receptor. Su valor se emplea en el proceso txdel model para el cálculo de latencia y por chanmatch model para determinar si los canales receptor y transmisor cuentan con características afines. Se encuentra configurado en 22,400,000 bps (21,875 kbps).
 - **Packet formats.** Indica el tipo de paquetes soportados por el canal. Aquellos paquetes que no pertenezcan a esta definición son desechados en un mecanismo denominado consistencia de enlace cuyo propósito es descartar los paquetes inapropiados o que no pueden ser procesados adecuadamente. La simulación soporta todos los paquetes con y sin formato.
 - **Bandwidth (kHz).** Ancho de banda del canal de transmisión. Permite determinar traslapes y coincidencias entre los canales del transmisor y del receptor para el cálculo de la ganancia de procesamiento. Junto con el atributo min frequency determina la frecuencia central de canal usado por el proceso power model. En la simulación se ha establecido en 7,000 kHz.
 - **Min frequency (MHz).** Frecuencia mínima soportada por el canal inalámbrico. Permite determinar si los afinidades y traslapes entre los canales receptor y transmisor. El valor empleado es 2,500 MHz.
 - **Spreading code.** Permite especificar un código para el canal definido por el usuario. Permite agrupar canales transmisores y receptores en clases de compatibilidad definidas por códigos comunes, creando subredes dentro de toda la red del modelo. Esta característica está deshabilitada en la simulación.
 - **Processing gain (dB).** Ganancia adquirida debido al procesamiento del canal. Se emplea para el cálculo de la relación SNR efectiva en el proceso ver model. Definido como la razón del Ancho de banda del canal a la Tasa de transmisión.

- Modulation. Especifica el nombre de la tabla de modulación empleada para localizar la tasa BER en función de la relación SNR efectiva. Esta tasa se usa en el proceso indicado por el parámetro `ber_model` cuyo resultado permite estimar el número de errores de bit en cada paquete. También se emplea en el proceso `chamatch_model` para determinar si un receptor y un transmisor son compatibles. La simulación emplea la modulación QPSK.
- Noise figure. Representa el efecto del ruido térmico en la transmisión. Es originado por la agitación térmica de los electrones en componentes resistivos y se calcula como uno de los componentes del ruido térmico en el proceso `bkgnoise_model`. El resultado de este proceso permite obtener posteriormente la relación SNR. Su valor se encuentra promovido y se especifica durante la ejecución de las simulaciones.
- Ecc threshold. Indica la proporción máxima tolerable de errores de un paquete para que puedan ser aceptados por el receptor y enviados hacia el flujo de salida del módulo. Este valor es empleado por el proceso especificado en el parámetro `Ecc_model`. La simulación emplea como umbral Ecc threshold el valor 10^{-6} .
- Ragain model. Especifica el proceso compilado empleado para el cálculo de la ganancia de la antena asociada a la transmisión entrante. El proceso simulado es `bwa_ss_ragain`.
- Power model. Proceso compilado empleado para determinar la potencia recibida de una transmisión entrante. La simulación emplea el proceso `bwa_ss_power`.
- Bkgnoise model. Especifica el nombre de un proceso compilado que calcula el ruido ambiental que afecta a la comunicación recibida. El modelo empleado es el predeterminado, `dra_bkgnoise`, y consiste en niveles constantes de ruido ambiental y ruido térmico en el receptor.
- Inoise model. Es el proceso compilado que calcula el ruido de interferencia que afecta a una transmisión entrante en particular. La simulación emplea el proceso por defecto, `dra_inoise`, que verifica si alguna colisión ha ocurrido. De ser así, incrementa un contador de colisiones definido para el paquete, determina si es interferencia o un paquete válido, y obtiene la potencia de los paquetes en colisión para determinar el efecto de ellos entre sí. El resultado de este proceso se transfiere al especificado en `snr_model` para determinar la relación SNR.
- Snr model. Proceso compilado usado para el cálculo de la relación SNR de una transmisión entrante en particular. La simulación emplea el proceso predeterminado, `dra_snr`, que calcula la relación de la potencia de la señal de la información a la potencia promedio acumulada de todas las fuentes acumuladas de ruido ambiental y de interferencia. El resultado de este proceso se usa en la etapa `ver_model` para el cálculo de la tasa BER esperada.
- Ber model. Indica el nombre de un proceso compilado capaz de calcular la Tasa de bit en error (BER, Bit Error Rate) esperada para una transmisión de radio recibida. En la simulación se emplea el modelo predeterminado, `dra_ber`, que calcula el BER con base en el promedio del cuadrado de la relación Señal a ruido y la función de modulación especificada por el atributo Modulation.
- Error model. Proceso compilado usado para determinar el número de errores de bit en un segmento de transmisión entrante. La simulación emplea el modelo `dra_error` que se basa en la tasa promedio de bit en error y la longitud del segmento. El valor obtenido se usa en el proceso `ecc_model` para decidir si el paquete se acepta o no.
- Ecc model. Corresponde a un proceso compilado que determina la aceptabilidad de una radiotransmisión entrante específica. El resultado de este proceso determina si el paquete se reenviará hacia los demás módulos o será desechado. Se emplea el proceso predeterminado, `dra_ecc`, que se basa en dos criterios. Los paquetes que no completaron su transmisión y aquellos que presentan una mayor proporción de errores que la indicada por el parámetro `ecc_threshold` son desechados.
- Icon name. Es el nombre del icono que representa al módulo. No tiene efectos en la simulación.

4.3.3.4. To_link_tx

El módulo To_link_tx conforma la salida de los paquetes transmitidos a través de enlaces de radio. Puede contener múltiples objetos de canal, en los que cada uno de ellos pueden realizarse intentos para el acceso a canales de recepción de radio en nodos remotos mediante un enlace inalámbrico. Realiza funciones de modulación y transmisión que afectan la recepción de la información. Al igual que el módulo From_link_rx, también es posible soportar diversos canales de comunicación. La figura 4-28 muestra el módulo To_link_tx.

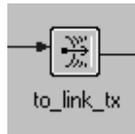


Figura 4-28: Módulo To_link_tx.

Los atributos que caracterizan al módulo son:

- **Name.** Nombre del módulo que permite identificarlo dentro del nodo SS. La simulación se refiere a él como To_link_tx.
- **Channel.** Especifica las características de los canales soportados por el transmisor. Sus atributos son:
 - **Data rate (bps).** Tasa a la que la información puede transmitirse a través del canal. Se emplea en el proceso txdel model para determinar la latencia, y por chanmatch model para establecer la afinidad entre el receptor y el transmisor. su valor está promovido y se define durante la simulación.
 - **Packet formats.** Tipo de paquetes que acepta un canal de otros módulos del nodo que puede transmitir exitosamente. Aquellos paquetes que cubran con las características son desechados en el mecanismo denominado consistencia de canal. La simulación soporta todos los paquetes con y sin formato.
 - **Bandwidth (kHz).** Ancho de banda del canal cuyo valor se emplea para determinar afinidades y traslapes entre los canales receptor y transmisor. Su valor está promovido para ser definido al momento de la simulación.
 - **Min frequency (kHz).** Frecuencia base del canal que se usa para determinar la afinidad entre el transmisor y el receptor, además de la frecuencia central del canal, empleado en el proceso power model. Su valor está promovido y se especifica en el momento de la simulación.
 - **Spreading code.** Código definido por el usuario para el canal. Permite definir clases de compatibilidad de código entre receptores y transmisores de una red para la creación de subredes. Está deshabilitado en la simulación.
 - **Power (W).** Potencia de transmisión para el envío de los paquetes a través del canal. Se emplea en el proceso power model. Su valor se halla promovido en la simulación.
- **Modulation.** Nombre de la tabla de modulación en la que se especifica la tasa BER en función de la relación SNR efectiva. El cálculo de la BER se lleva a cabo en el proceso ber model y permite determinar el número estimado de bits en error en cada segmento de paquete. También se usa en el proceso chanmatch model para determinar la compatibilidad entre el receptor y el transmisor. Se especifica en la simulación el valor QPSK.
- **Rxgroup model.** Proceso compilado que determina la posibilidad de interacción entre un receptor y un transmisor a través de un canal específico. El resultado se emplea para eliminar estadísticamente relaciones entre pares transreceptores sin interacción para minimizar el número de invocaciones al proceso durante la simulación. El modelo simulado emplea el proceso predeterminado, dra_rxgroup, que permite a todos los receptores de la red ser destinos potenciales.
- **Txdel model.** Indica el proceso compilado que calcula el tiempo de retraso asociado con la transmisión de un paquete. Este tiempo es el que separa el inicio de la transmisión del primer bit del paquete del final de la

transmisión del último bit. Se emplea el proceso predeterminado, `dra_txdel`, que calcula el retraso con base en la tasa de transmisión del canal y la longitud del paquete.

- **Closure model.** Proceso compilado que permite determinar la habilidad del canal transmisor para contactar a un canal receptor. La simulación emplea el proceso predeterminado, `dra_closure`, que determina si existe línea de vista (LOB, Line of sight) entre los nodos receptor y transmisor. Su resultado indica si deben seguirse ejecutando los procesos restantes.
- **Chanmatch model.** Corresponde a un proceso compilado que calcula dinámicamente uno de tres resultados que caracterizan el tipo de interacción que puede ocurrir entre un canal de transmisión y otro de recepción. La simulación emplea el proceso predeterminado, `dra_chanmatch`, que puede determinar que una transmisión contiene una señal válida que puede ser recibida, una fuente efectiva de interferencia o una señal irrelevante. En el último caso, no se realiza el procesamiento restante del módulo.
- **Tagain model.** Proceso compilado usado para obtener la ganancia de la antenna del transmisor para una señal de radio en dirección a un receptor en particular. Se emplea el proceso `Bwa_ss_tagain`.
- **Propdel model.** Nombre del proceso compilado que calcula el tiempo de propagación asociado con la transmisión de un paquete a través de un receptor específico. Se utiliza el proceso predeterminado, `dra_propdel`, que calcula dos tiempos de retraso. El primero es el tiempo transcurrido entre la transmisión del primer bit del paquete y su recepción en el receptor destino. El segundo es el tiempo de propagación entre la transmisión del último bit del paquete y su recepción en el destino.
- **Icon name.** Nombre del icono que representa al módulo transmisor en los diagramas del nodo. No tiene efectos prácticos en la simulación.

4.4. Conclusiones

Este capítulo presentó los modelos de OPNET empleados para realizar los estudios del comportamiento dinámico del protocolo IEEE 802.16. Las capacidades de OPNET incluyen herramientas para generar modelos de diversos componentes de una red de comunicaciones, tanto de equipos comerciales como sistemas creados por el usuario. Los diversos editores que conforman a la interfaz gráfica permiten especificar cada uno de los nodos, módulos, procesos y estados involucrados en un estudio en particular con el detalle específico. Por otra parte, la flexibilidad para indicar un variado número de parámetros estadísticos tanto preconstruidos como personalizados por el usuario así como las herramientas de análisis y presentación de resultados permiten cubrir con los objetivos de análisis de estudios complejos.

La especificación de las Estaciones Base y Suscriptora de la Red de Acceso Inalámbrico de Banda Ancha IEEE 802.16 es jerárquica e incluye la descripción de los nodos, módulos, procesos, distribuciones, estados, transiciones, enlaces y características físicas cuyos atributos se determinan con base en la asignación de valores a diversas variables. Algunas de estas variables se especifican como promovidas, es decir, son especificadas durante la ejecución de las simulaciones y permiten definir distintos escenarios en la secuencia que conforma un estudio en particular.

La reutilización de cada uno de los componentes y subcomponentes involucrados en un diseño simplifica la incorporación, modificación o eliminación de características y objetos nuevos en el estudio, lo cual reduce el tiempo de desarrollo de modelos de simulación. Por otra parte, el nivel de detalle y personalización ofrecido por los editores de OPNET permite realizar estudios en los que es necesario reproducir condiciones reales propios de los sistemas de redes de comunicación.

Capítulo 5

Análisis y optimización del comportamiento dinámico del protocolo IEEE 802.16.

5.1. Introducción

El diseño y la implementación de protocolos de comunicación requieren un conocimiento del funcionamiento de características fundamentales. Características como la capacidad del canal, el Throughput (carga útil en la capa MAC), la utilización, el número máximo de nodos (o streams) soportados, el retardo, etc. Todas estas características estudiadas bajo diferentes configuraciones de red y tráfico para obtener resultados más confiables. El conocimiento de todas estas características permitirá planear correctamente a los operadores de red, los servicios adecuados que pueden ofrecer a sus clientes, así como realizar una adecuada tarifa e implementar sus redes con la topología correcta.

El objetivo de este capítulo es presentar un estudio completo del funcionamiento de las características de una BWA, realizando estudios sobre el cambio en el tamaño de paquetes, variando el número de Slots de Contención, uso de algoritmos de QoS y diferentes escenarios de tráfico como IP y VoIP. El detalle de estos estudios se muestra en las siguientes secciones.

5.2. Definición de los análisis a realizar.

Teniendo el modelo de simulación en OPNET, el cual fue estudiado en el capítulo cuatro, ahora en este capítulo observaremos los diferentes estudios que realizamos, los cuales nos ayudaron a encontrar ciertas mejoras al modelo de simulación. Los análisis realizados se muestran a continuación:

- 1) Efectos de la variación del Packet Size en tráfico isócrono. Se refiere a cómo trabaja el protocolo cuando se cambia el tamaño de los paquetes.
- 2) Efectos de los slots de contención para transmisiones de datos. Se refiere a qué ocurre con el retardo y throughput cuando se varía el número de slots de contención.
- 3) Estudios con el EBA (Exponential Back-Off Algorithm), variando los valores máximo y mínimo de la ventana.
- 4) Estudio de QoS sobre tráfico de VoIP.

Estas configuraciones fueron usadas por que son muy claras para explicar e identificar las características claves del funcionamiento óptimo de una red con un gran rango de aplicaciones. Resultados como la máxima capacidad de la red, pueden ser usados para identificar los límites de los diferentes tipos de servicio que se pueden proporcionar a los clientes.

Para todas las configuraciones usadas en este estudio fue necesario encontrar el punto de saturación y las razones de posible ineficiencia en algunos casos, así como el uso de algunos algoritmos de resolución de colisiones para resolver ciertos problemas en algunos escenarios de simulación.

5.3. Caracterización de Tráfico y Parámetros de Configuración del Protocolo de Acceso Inalámbrico de Banda Ancha IEEE 802.16.

Como hemos mencionado al inicio de este capítulo, en nuestro estudio usamos dos tipos diferentes de tráfico, tráfico de Internet y tráfico de voz sobre IP (VoIP), los cuales son generados para cada estación y dependiendo del estudio usado se activa el respectivo generador de tráfico.

En este capítulo basamos nuestro análisis en estos dos tráficos fuentes para estudiar el impacto en el funcionamiento del protocolo con tres diferentes tipos de tráfico: Tráfico de Internet, Voz sobre IP e Isocronos stream, los cuales son descritos debajo con más detalle.

5.3.1. Tráfico de Internet

Este tipo de tráfico simula el tráfico de Internet. Se sabe que la distribución de los paquetes de Internet se comporta como lo indica la figura 5-1 y la tabla 5-1. Ahí se muestra el número de celdas ATM requeridas por paquete y el tamaño total del paquete que será transmitido. La mayoría de paquetes generados serán de 64 bytes y hasta 1518 bytes que es el máximo tamaño de paquetes Ethernet (principalmente son usados para aplicaciones como FTP).

Los paquetes son generados mediante una distribución exponencial, con un valor medio para producir el tráfico de datos definido. La figura 5-1 muestra una distribución de probabilidad del tamaño de los paquetes. El cálculo de cada tiempo de llegada de paquetes se tuvo que obtener para cada diferente tráfico de datos 32Kbps, 64Kbps, 128Kbps, 256Kbps. El promedio del tamaño del paquete (Pk_bytes) para este tipo de tráfico es de 368 bytes. La tabla 5-1 muestra la distribución del tamaño de los paquetes empleada en el presente estudio.

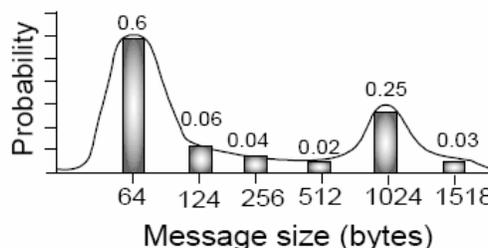


Figura 5-1: Distribución de probabilidad del tamaño de paquetes.

Packet Size (bytes)	Probabilidad de ocurrencias	Número de minislots requeridos	Tamaño de paquetes transmitidos con overhead
64	0.6	7	98
128	0.06	11	174
256	0.04	19	292
512	0.02	35	552
1024	0.25	69	1090
1518	0.03	101	1604

Tabla 5-1: Distribución del tamaño de paquetes para tráfico IP.

Cuando se genera un mensaje, por ejemplo de 1518, éste se codifica utilizando palabras de código largas, y por cada fragmento de 245 bytes del *BWA MAC frame*, se agregan 10 bytes de FEC-RS, y al inicio de la transmisión se le agrega un preámbulo y al final un tiempo de guardia como se muestra en la figura 5-2. Entonces para transmitir un Mensaje Ethernet MAC de 1518 bytes, se requiere un Grant de 101 slots.

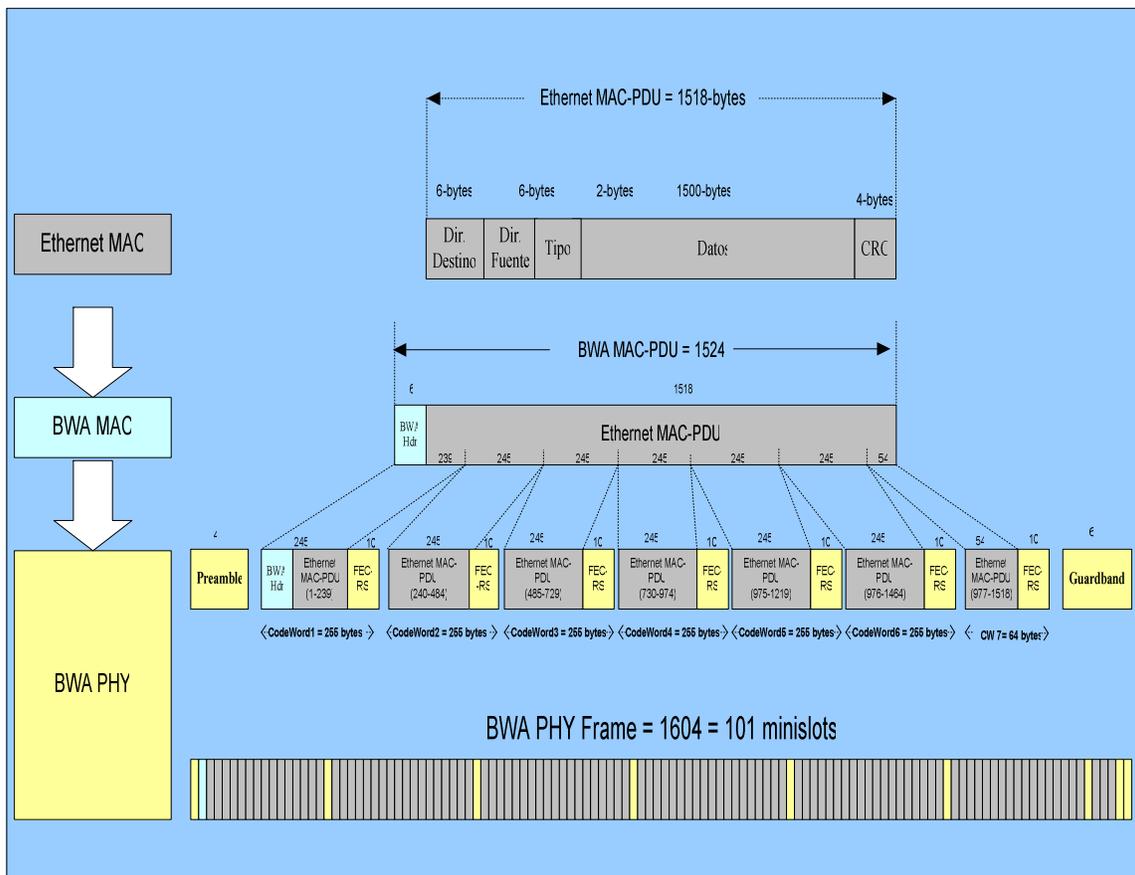


Figura 5-2: Cálculo del número de slots a solicitar (Grant Size) cuando se utilizan palabras de código largas, en la transmisión de un Ethernet MAC frame de 1518 bytes.

5.3.2. Voz sobre IP (VoIP)

En la actualidad la voz puede ser transmitida analógicamente como digital en redes circuito-conmutadas (PSTN, ISDN y GSM). Entre dos usuarios finales existe un canal virtual de reserva. Se usa un constante ancho de banda sobre tráfico de datos para transmitir la voz (por ejemplo 64Kbps en el estándar europeo ISDN, 56Kbps en el estándar americano ISDN) con una carga de servicio. En el futuro las llamadas telefónicas serán transmitidas mediante redes de Internet con los mismos o incluso mejores niveles de calidad.

La mayor ventaja del servicio Voz sobre IP es que evita o disminuye en gran medida las cuotas que tiene el servicio ordinario de telefonía.

Hemos seleccionado analizar este tipo de tráfico, VoIP, ya que sabemos que es crucial para los años venideros en materia de las telecomunicaciones. En general al hablar de telefonía IP nos estamos refiriendo a diferentes servicios de comunicación como (VoIP, fax y aplicaciones de mensajes de voz), estos servicios son transmitidos vía Internet en forma digital paquetes discretos en vez del el tradicional conmutador de circuitos usado en las PSTN (Public Switched Telephone Network).

Para nuestro estudio hemos simulado el tráfico de voz sobre IP con dos codificadores diferentes el G.723.1 y el G.711. El códec G.723.1 genera tráfico de datos de 5.3Kbps ó 6.3Kbps dependiendo del modo de uso, en nuestro caso usamos 5.3Kbps. Este códec genera y codifica frames de 20 bytes cada 30 ms, se espera que pronto tome cuatro frames por cada 120 ms.

En general describe una técnica de compresión que se puede utilizar para comprimir voz u otros componentes de señales de audio de servicios multimedia a una baja velocidad de bit, como parte de la familia de estándares H.324. La velocidad de bit más alta se basa en la tecnología MP-MLQ y proporciona una mayor calidad. La velocidad de bit más baja se basa en CELP y proporciona buena calidad, y permite que los diseñadores del sistema tengan flexibilidad adicional.

Cada paquete de audio esta formado por varias cabeceras como son: la cabecera de Real Time Protocol (RTP) de 12 bytes de longitud, los bits de información más importantes que contiene el RTP son los que contienen la información sobre la secuencia para determinar si los datos están llegando en orden y la marca de temporización para determinar el tiempo de llegada entre paquetes (fluctuación de fase).

La cabecera del Protocolo de Datagrama de Usuario (UDP) con una longitud de 8 bytes que generalmente es usado cuando no se requiere una conexión fiable. Adicionalmente la cabecera de IP con longitud de 20 bytes necesaria para transmitir información de enrutamiento. Después 3 bytes del LLC (Logical Link Control) y 5 bytes de SNAP (SubNetwork Attachment Point).

Finalmente 18 bytes del encabezado del Control de Acceso al Medio (MAC). A continuación se muestra en la tabla 5-2 los valores del encabezado MAC para los Códecos G.711 y G.723:

	G.711 – 64 kbps	G.723 – 5.3 kbps
Tamaño de Frame [ms]	10	30
Frame de Voz [bytes]	80	20
RTP [bytes]	12	12
UDP [bytes]	8	8
IP [bytes]	20	20
LLC [bytes]	3	3
SNAP [bytes]	5	5
Ethernet MAC [bytes]	18	18
IEEE 802.16 MAC	6	6
PHY: (Prea+GB+FEC)	10+FEC	10+FEC
Tamaño total del paquete	202 bytes o G=13 slots	86 bytes o G=9 slots
Velocidad de transferencia neta MAC/PHY	116.8/166.4	22.9/38.4
Prea=Preamble, GB=GuarBand, FEC= 6*No_CodeWords		

Tabla 5-2: Códecos de VoIP (G.711 y G.723).

En la tabla 5-2 también se muestran los valores para el códec G.711, el cual también fue usado para realizar las pruebas de VoIP. Este tipo de códec describe una técnica de codificación de voz PCM de 64Kbps; la voz codificada con G.711 está en un formato correcto para la entrega de voz digital en la red telefónica pública o a través de intercambio privado de ramas (PBX). Este códec además crea y encapsula tramas de VoIP de 80 bytes cada 10 ms.

5.3.3. Tráfico Isócrono

Este tipo de tráfico es dependiente del tiempo y son usados en procesos donde los datos deben ser entregados en cierto momento. Por ejemplo, la mayoría de las aplicaciones multimedia requieren de este tipo de mecanismo de transporte para asegurar que la información es entregada rápida y desplegada en sincronía tanto el audio como el video. En nuestro caso simulamos este tipo de tráfico con diferentes velocidades de transmisión, 32 Kbps, 64 Kbps, 128 Kbps y 256 Kbps. Así mismo se consideraron diferentes tamaños de paquete (64, 128, 256, 512, 1024 y 1518 bytes). La tabla 5-3 muestra el ancho de banda efectivo para distintos tamaños de los paquetes y tasas de transmisión.

Isochronous Streams (kbps)		Packet size (bytes)					
		64	128	256	512	1024	1518
12	TCP/IP	3.94	7.97	9.98	10.99	11.50	11.66
	UDP/IP	6.19	9.09	10.55	11.27	11.64	11.75
	PPP	9.38	10.69	11.34	11.67	11.84	11.89
	TCP/MAC Eth	0.56	6.28	9.14	10.57	11.29	11.29
	UDP/MAC Eth	2.81	7.41	9.70	10.85	11.43	11.61
32	TCP/IP	10.50	21.25	26.63	29.31	30.66	31.09
	UDP/IP	16.50	24.25	28.13	30.06	31.03	31.35
	PPP	25.00	28.50	30.25	31.13	31.56	31.70
	TCP/MAC Eth	1.50	16.75	24.38	28.19	30.09	30.71
	UDP/MAC Eth	7.50	19.75	25.88	28.94	30.47	7.50
64	TCP/IP	21.00	42.50	53.25	58.63	61.31	62.19
	UDP/IP	33.00	48.50	56.25	60.13	62.06	62.69
	PPP	50.00	57.00	60.50	62.25	63.13	63.41
	TCP/MAC Eth	3.00	33.50	48.75	56.38	60.19	61.43
	UDP/MAC Eth	15.00	39.50	51.75	57.88	60.94	15.00
128	TCP/IP	42.00	85.00	106.50	117.25	122.63	124.37
	UDP/IP	66.00	97.00	112.50	120.25	124.13	125.39
	PPP	100.00	114.00	121.00	124.50	126.25	126.82
	TCP/MAC Eth	6.00	67.00	97.50	112.75	120.38	122.86
	UDP/MAC Eth	30.00	79.00	103.50	115.75	121.88	30.00

Tabla 5-3: Ancho de Banda Efectivo en streams isócronos (kbps).

5.4. Parámetros de Simulación

En las simulaciones usamos un canal de subida con una capacidad de 9.6Mbps y un canal de bajada de 22.4Mbps. Otro aspecto importante a considerar es el tamaño de la red; es decir el número de usuarios activos por canal de subida. En nuestras simulaciones este número es variable, de acuerdo al escenario de red usado.

En general podemos resumir los valores usados de nuestras simulaciones en la siguiente tabla, alguno de los parámetros cambian en cada escenario; es decir que no permanecen constantes, y son aquellos que están marcados dentro de la tabla 5-4.

Parámetro	Valor
Uplink data rate (6 MHz Ch.)	9.6 Mbps
Downlink rate (16-QAM, 6 MHz Ch.)	22.4 Mbps
Min. y Max. Backoff Values	3 y 10
Mínimo slots de contención por frame (MAC)	7 slots
Tiempo de llegada entre paquetes	2 ms
Tiempo de simulación para cada corrida	60 s
Distancia mínima y máxima de SS al Headend	0.1 - 5 Km
Máximo número de usuarios en la red	200
Tipo de Tráfico analizado	VoIP, Internet, Isocronos Streams

Tabla 5-4: Parámetros de Simulación.

5.5. Resultados del Comportamiento

5.5.1. Efectos de la variación del Packet Size en tráfico Isócrono.

En esta sección analizaremos el comportamiento de la red bajo en incremento de número de nodos activos en la red. Se presenta el desempeño del protocolo IEEE 802.16 para distintos escenarios de transmisión de tráfico IP constante para una capacidad de canal de 9.6 Mbps en situaciones variables de número de estaciones y de longitud de paquetes transmitidos en el canal de subida.

Para cada escenario, se determinó el número óptimo de estaciones para las cuales el comportamiento del sistema es aceptable, es decir, cuando el retraso en la transmisión de datos no supera 20 ms. A partir de este punto, la inestabilidad del sistema es notable e imposibilitaría el soporte adecuado de ciertos servicios.

Los valores que fueron usados en las simulaciones de acuerdo al cambio de los streams y tamaño de los paquetes se muestran en la tabla 5-5.

Packet Size(bytes)	Streams(Kbps)							
	32	PHY (bps)	64	PHY (bps)	128	PHY (bps)	256	PHY (bps)
64	0.016	56000	0.008	112000	0.004	224000	0.002	448000
128	0.032	44000	0.016	88000	0.008	176000	0.004	352000
256	0.064	38000	0.032	76000	0.016	152000	0.008	304000
512	0.128	35000	0.064	70000	0.032	140000	0.016	280000
1024	0.256	34500	0.128	69000	0.064	138000	0.032	276000

Tabla 5-5: Valores de Mean Interarrival Time de acuerdo con Packet Size y Stream.

Los valores que están dentro de cada casilla corresponden al mean_interarrival_time y están en segundos. Así por ejemplo si se tiene un stream de 64Kbps y un Packet Size de 128 bytes el mean interarrival time sería:

$$\text{mean_interarrival_time} = (128 * 8) / 64000$$

$$\text{mean interarrival time} = 0.016 \text{ seg}$$

Para obtener el número máximo de estaciones suscriptoras que puede soportar un canal ascendente de 6MHz sólo se tiene que evaluar la siguiente expresión:

$$N \leq \text{Utilización Total} / \text{Stream}$$

Donde la Utilización Total es de 9,152 kbps, obtenida de dividir el tamaño del frame sin slots contención, sobre el tamaño total del frame multiplicado por la tasa de trasmisión.

Por ejemplo para un stream de 34.5 kbps $N \leq 9,152 / 34.5$; es decir $N \leq 265$ usuarios en la red.

La tabla 5-6 muestra la relación entre los Streams y el número máximo de usuarios soportados por la red.

Stream (kbps)	Número Máximo de Usuarios	Stream (kbps)	Número Máximo de Usuarios
34.5	265	138	66
35	261	140	65
38	240	152	60
44	205	176	52
56	163	224	40
69	132	276	33
70	130	280	32
76	120	304	30
88	104	352	26
112	81	448	20

Tabla 5-6: Relación entre Steams y número máximo de usuarios.

Las gráficas 5-3 y 5-4 muestran los resultados obtenidos para el retardo y throughput del sistema variando el número de nodos activos y el tamaño de los paquetes, con Isócronos Streams.

El valor óptimo se calculó de manera teórica, donde se utilizó el tamaño más grande del paquete, para nuestro caso 1024 bytes, el cual requiere 69 slots, con este valor y con el número máximo de usuarios soportados por la red, se obtuvo que el valor del Throughput óptimo es de 8,448 kbps, y a partir de este valor se obtienen los diferentes porcentajes de pérdidas con los valores simulados, que en la práctica serían los reales.

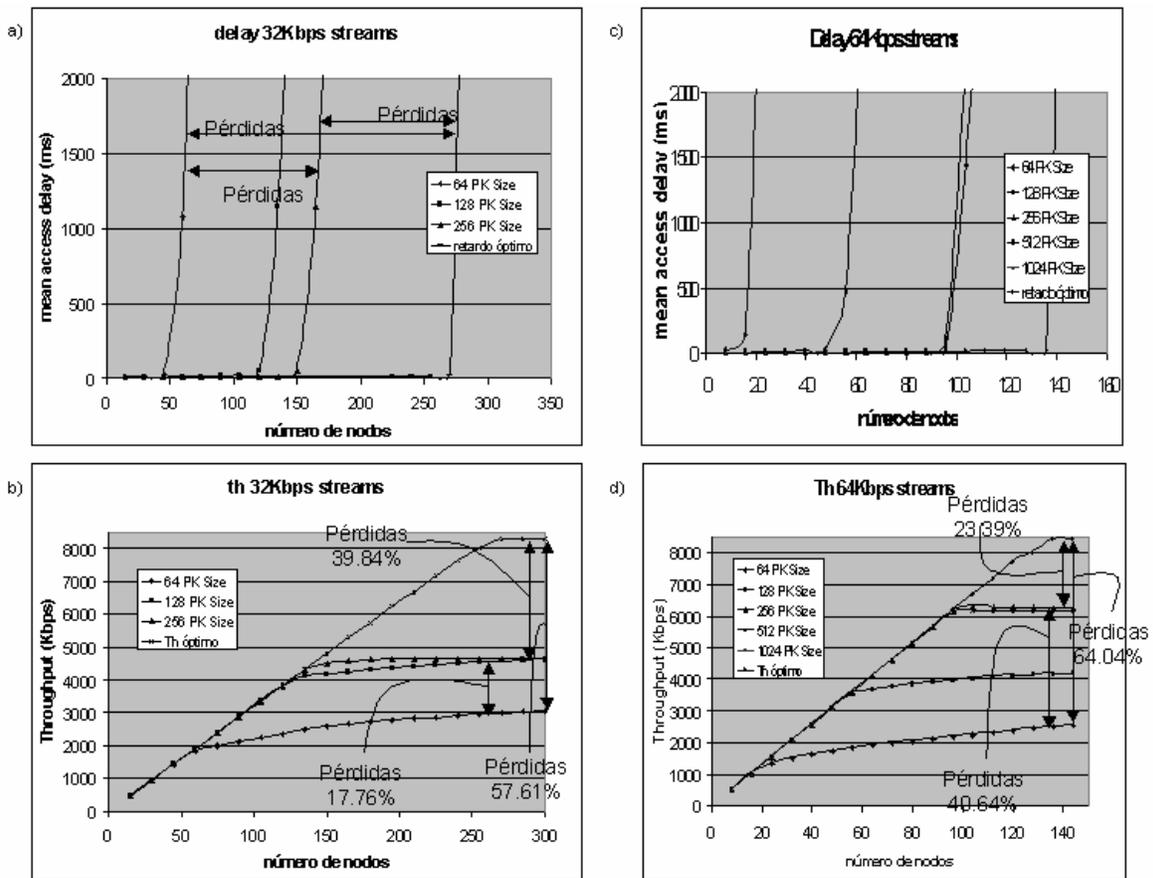


Figura 5-3. a) Retardo para streams de 32 kbps. b) Throughput performance para streams de 32 kbps. c) Retardo para streams de 64 kbps. d) Throughput performance para streams de 64 kbps.

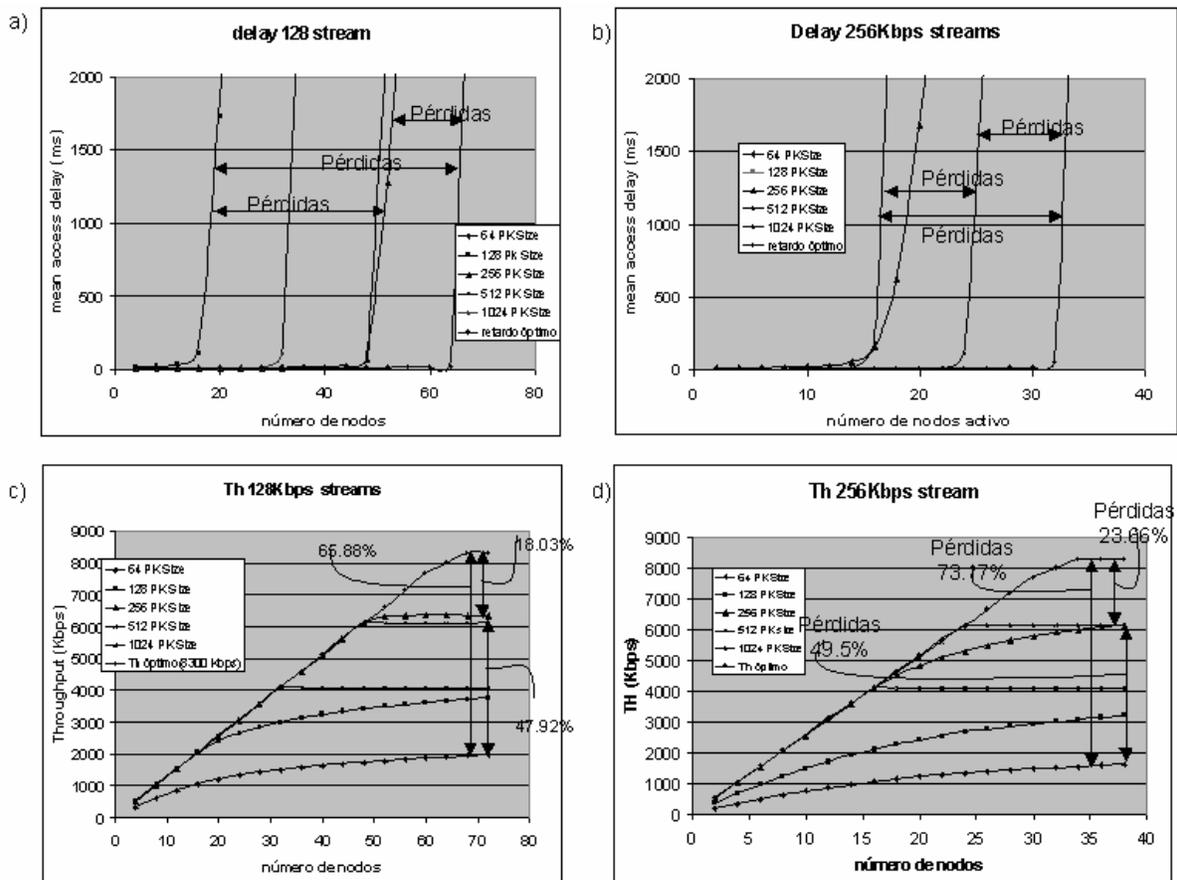


Figura 5-4: a) Retardo para streams de 128 kbps. b) Retardo para streams de 256 kbps. c)Throughput performance para streams de 128 kbps. d) Throughput performance para streams de 256 kbps.

Como se puede ver, las gráficas de las figuras 5-3 y 5-4 muestran que existe un gran porcentaje de pérdidas, éstas causadas por varios factores, como el desperdicio de slots de contención, el número alto de colisiones, la retransmisión de paquetes, etc. Todos estos factores van disminuyendo el rendimiento de la red en general y por lo mismo se obtienen malos resultados.

También se puede observar que los mejores valores obtenidos se dan cuando el tamaño de los paquetes va aumentando, sin embargo después de pasar los 256 bytes de tamaño, los valores comienzan a caerse, esto es a causa del número de slots desperdiciados por cada paquete, y entre más grande sea el paquete, mayor será la pérdida de slots sin uso, lo que conlleva a un mal rendimiento de la red.

Lo anterior se puede apreciar claramente con el porcentaje de pérdidas descrito en las figuras anteriores (5-3 a 5-10), por ejemplo para la figuras 5-3 y 5-4 se observa que la pérdida entre los paquetes de 64 bytes y los de 256 bytes es del 17.16%, y la pérdida entre el valor óptimo con el del paquete de 64 bytes es del 57.61%, el cual es demasiado grande, eso quiere decir que se está desperdiciando el canal de la red por más de la mitad, es un desperdicio muy grande y lógicamente no es óptimo para el buen desempeño de una red.

Como se puede notar en las gráficas el sistema va incrementando el número activo de nodos, el incremento del retardo, no debe superar los 20 ms para que el comportamiento de la red sea estable. El punto de estabilidad del sistema es diferente para cada tamaño de paquete y stream. Después del punto de estabilidad, el retardo se dispara exponencialmente haciendo que la red se comporte de manera inusual.

Es importante mencionar que el algoritmo exponencial BackOff usado en éste análisis en algunas ocasiones causa incrementos muy grandes del retardo, lo cual hace que la red se comporte de una manera inestable.

Una posible solución a esto son algunos mecanismos de reserva como el el piggyback request que no solo reduce los grandes retardos sino que también incrementa el Throughput teniendo un mejor y mayor rendimiento en la red.

La tabla 5-7 muestra un resumen de los resultados obtenidos de estas primeras pruebas realizadas en el presente estudio.

Packet Size(bytes)	Streams(Kbps)			
	32	64	128	256
64	48	17	10	7
128	118	56	31	15
256	150	96	48	17
512	118	86	45	23
1024	115	82	44	23

Tabla 5-7: Número máximo de nodos soportados por la red.

A continuación presentamos en las figuras 5-5 y 5-6 los resultados del comportamiento de la red usando los mismos escenarios de configuración pero implementando ahora piggyback, donde los resultados en esta ocasión son mejorados notablemente. Los valores de simulación permanecieron iguales, únicamente se activó el campo de piggyback al momento de correr las simulaciones.

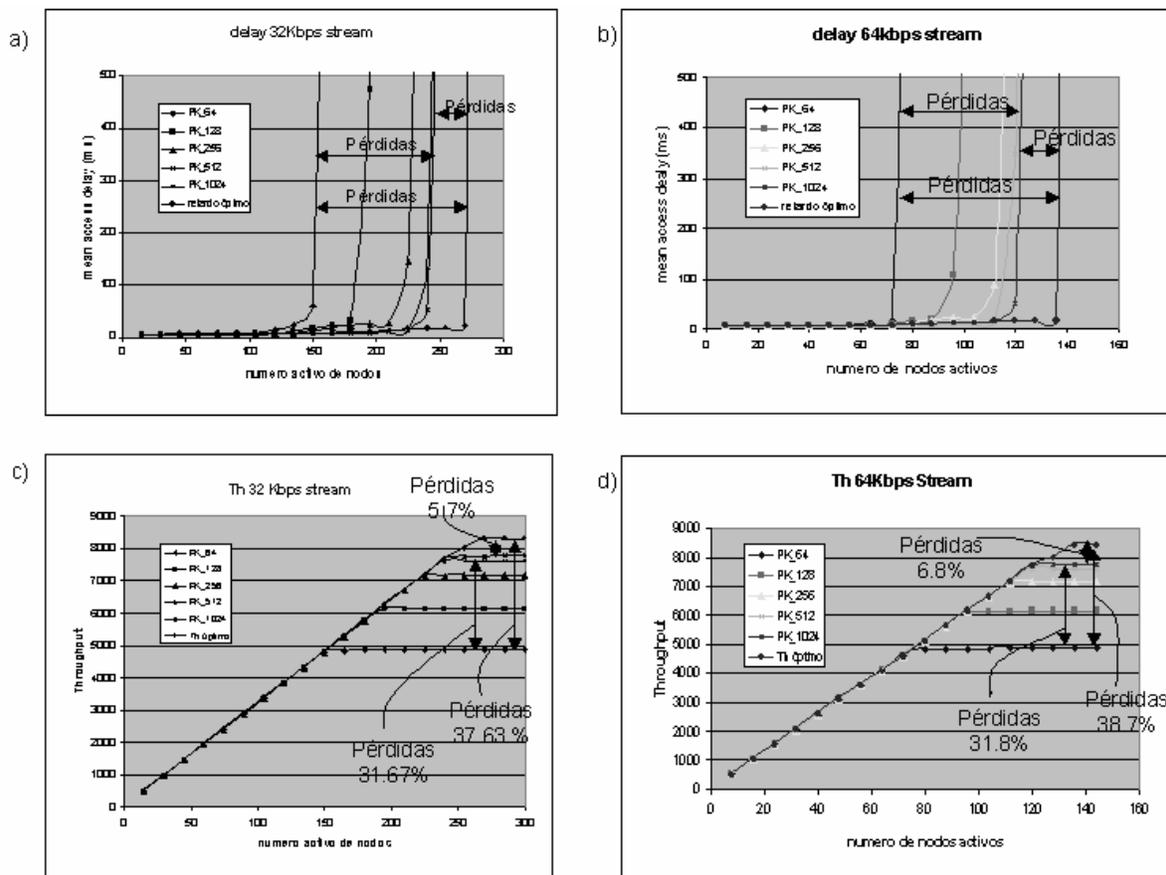


Figura 5-5: a) Retardo para streams de 32 kbps. b) Retardo para streams de 64 kbps. c) Throughput performance para streams de 32 kbps. d) Throughput performance para streams de 64 kbps. Piggyback habilitado.

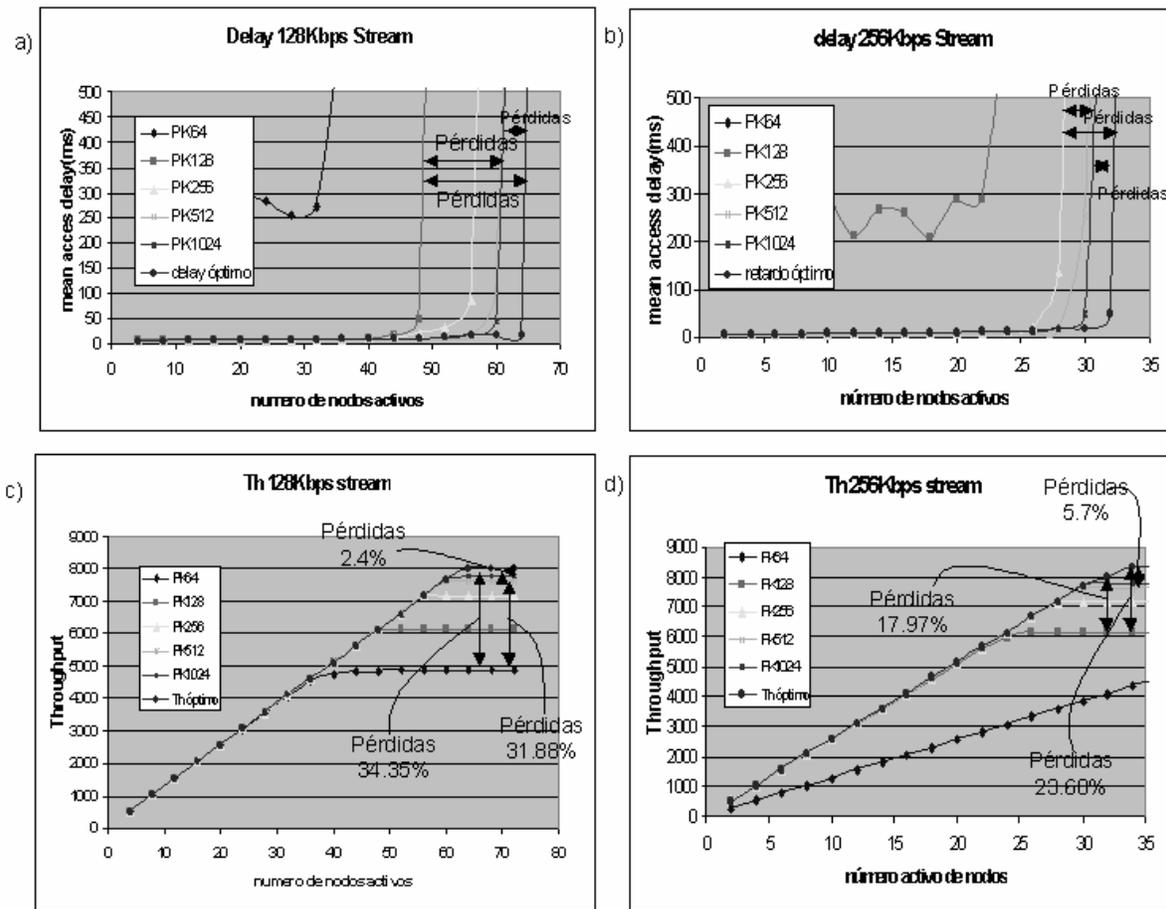


Figura 5-6: a) Retardo para streams de 128 kbps. b) Retardo para streams de 256 kbps. c) Throughput performance para streams de 128 kbps. d) Throughput performance para streams de 256 kbps. Piggyback habilitado.

La utilización máxima del sistema es de 9.152 Mbps, la cual corresponde al 95.4% de la capacidad total del canal (9.6 Mbps), el otro 4.6% fue asignado al acceso de contención. De esta utilización (95.4 %), solo cierto porcentaje fue usado para la transmisión de datos, y corresponde al Máximo Throughput del Sistema para cada caso. El resto de las pérdidas, se consumieron por las cabeceras MAC y PHY del protocolo IEEE 802.16.

En todas estas gráficas, se muestra un estudio de las pérdidas que hay en términos de porcentaje, se hace una comparación entre el valor óptimo contra el mejor valor obtenido en la simulación y el peor, así como la diferencia entre el mejor y el peor valor obtenido del modelo de simulación.

Para estas nuevas gráficas se notan mejoras considerables, ya que estas pruebas fueron realizadas implementando la técnica de Piggy Back, en donde se aprovecha de una mejor manera el canal, notándose inmediatamente en los resultados.

En las figuras 5-6, inciso (d) se puede observar que el porcentaje de pérdidas entre el valor óptimo y el mejor valor obtenido de la simulación es de 5.7%, comparándola con la gráfica del mismo estudio pero sin implementar la técnica de piggyback (figura 5-3 inciso (d)), vemos que el porcentaje de pérdidas es del 23.66%, es muy notoria la gran diferencia entre una y otra, así como la notable mejoría en el rendimiento de la red.

Para este caso los resultados son muy buenos, al incrementar el tamaño del paquete se reducen los retardos y las pérdidas se reducen.

La tabla 5-8 resume los valores de este estudio, mostrando el máximo número de nodos soportados por la red, implementando la técnica de *piggyback*.

Packet Size(bytes)	Streams(Kbps)			
	32	64	128	256
64	150	75	35	21
128	170	85	47	26
256	220	107	55	27
512	235	118	59	28
1024	240	120	60	30

Tabla 5-8: Número máximo de nodos soportados por la red, Piggyback habilitado.

En general podemos observar que los resultados fueron mejorados notablemente, ya que en esta ocasión quien presenta el mejor comportamiento dentro de la red es el paquete de mayor tamaño (1024 bytes), por lo que podemos asumir que para éste tipo de tráfico, el piggyback funciona adecuadamente, y no sólo eso sino que es mucho más apropiado usarlo para tráfico isócrono (Voz, Video, Multimedia).

5.5.2. Efectos de los slots de contención para transmisiones de datos.

Se realizaron pruebas al variar el número de slots de contención, y se obtuvieron datos interesantes, la siguiente gráfica muestra el comportamiento del Throughput.

Estos resultados se obtuvieron usando tráfico de Internet a 32kbps y se muestran en las figuras 5-7 y 5-8.

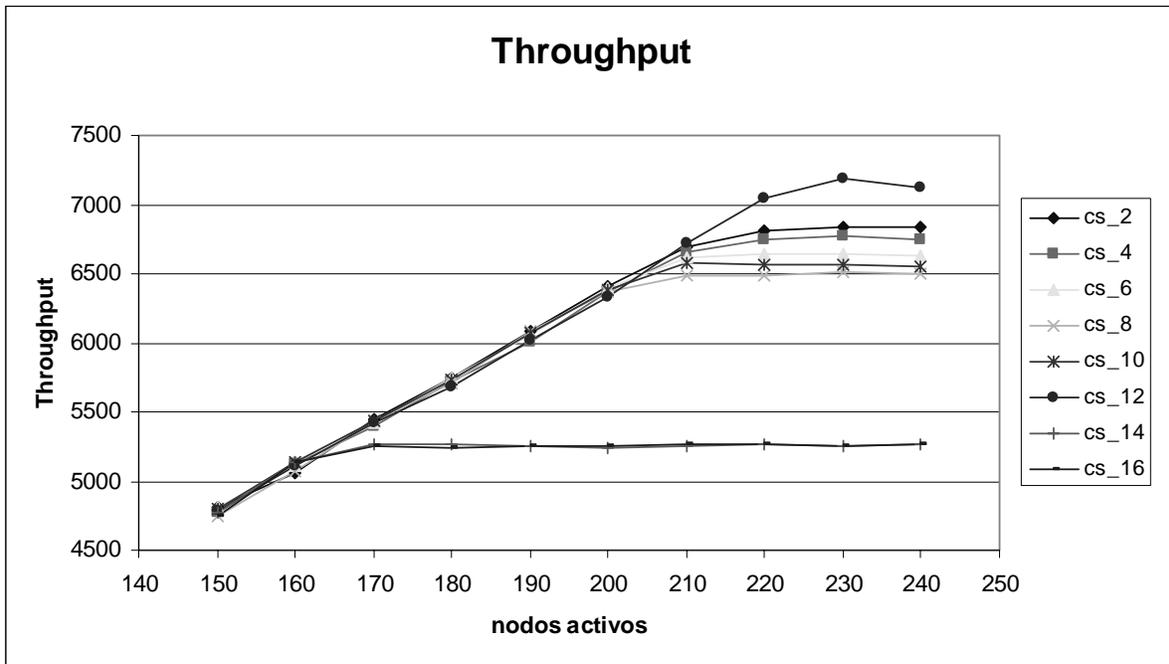


Figura 5-7: Throughput del sistema variando el número de slots de contención.

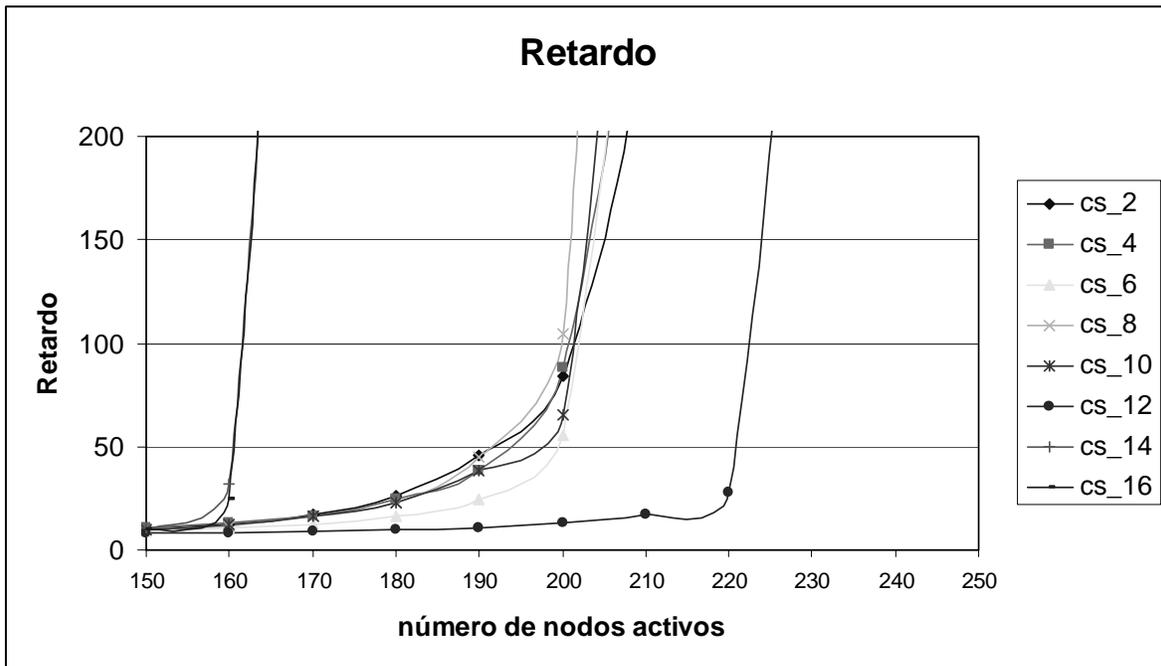


Figura 5-8: Retardo del sistema variando el número de slots de contención.

Cuando dos o más estaciones transmiten sus mensajes de reservación al mismo tiempo se genera una colisión y el algoritmo adoptado en el estándar IEEE 802.16 para la resolución de colisiones es el EBA (Exponential Back-Off Algorithm), el cual presenta una muy baja eficiencia en condiciones de congestión. Existen otros algoritmos de resolución de contención (ARC), que mejoran notablemente estos resultados de los cuales hablaremos en los trabajos futuros.

De estas gráficas se puede observar que el número de slots de contención más adecuado para obtener el mejor rendimiento de la red, es el de 12, superando incluso los 2 que nosotros hemos estado usando en nuestras simulaciones.

Del mismo modo se puede apreciar que más allá de 12 slots de contención, el rendimiento de la red sería malo, por lo que los valores más adecuados de uso serían de 2 a 12, o de lo contrario se tendrían comportamientos de bajo rendimiento en la red.

Esto es por que al tener demasiados slots de contención, éstos empiezan a desperdiciarse aumentando las pérdidas en el canal, es por ello que no debe excederse la región de contención o de lo contrario la red iniciará a disminuir su rendimiento notablemente, como lo muestran las gráficas.

5.5.3. Estudios con el EBA (Exponential Back-Off Algorithm).

También se realizaron estudios con el EBA (Exponential Back-Off Algorithm), variando tanto el valor máximo como el mínimo. Los resultados se resumen en las gráficas 5-9 y 5-10.

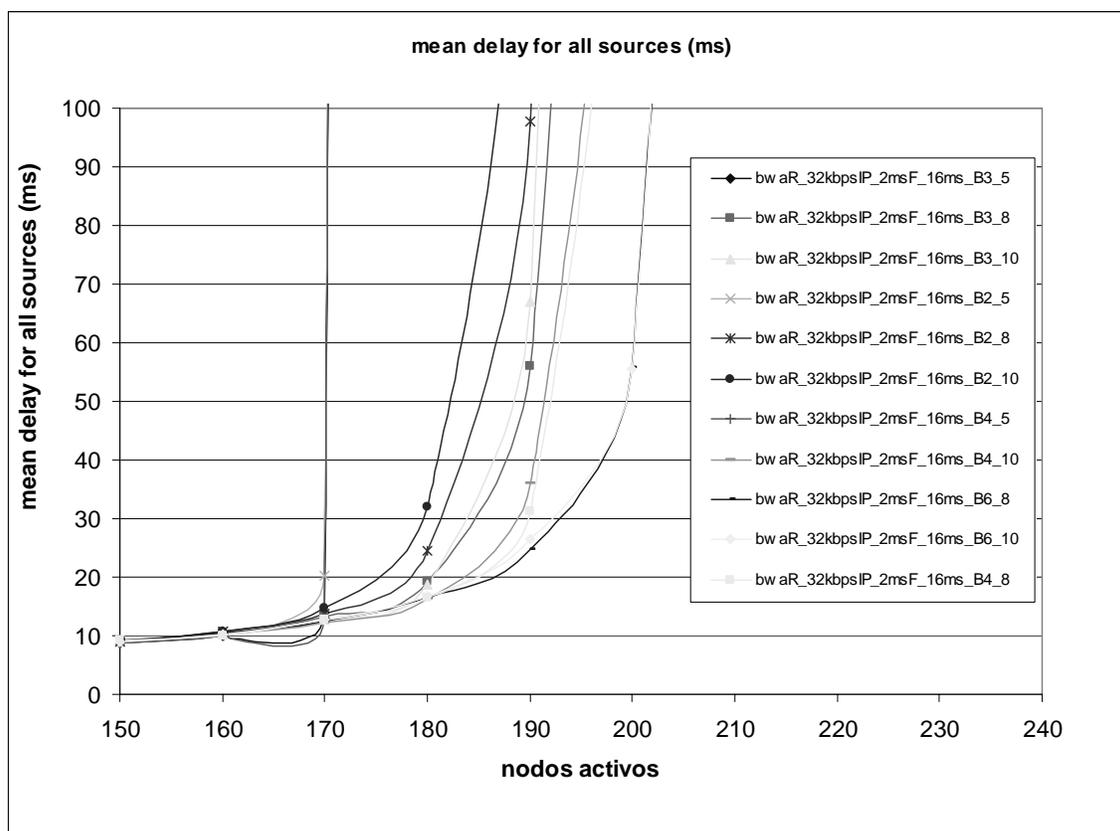


Figura 5-9: Retardo del sistema variando los valores MIN/MAX del EBA.

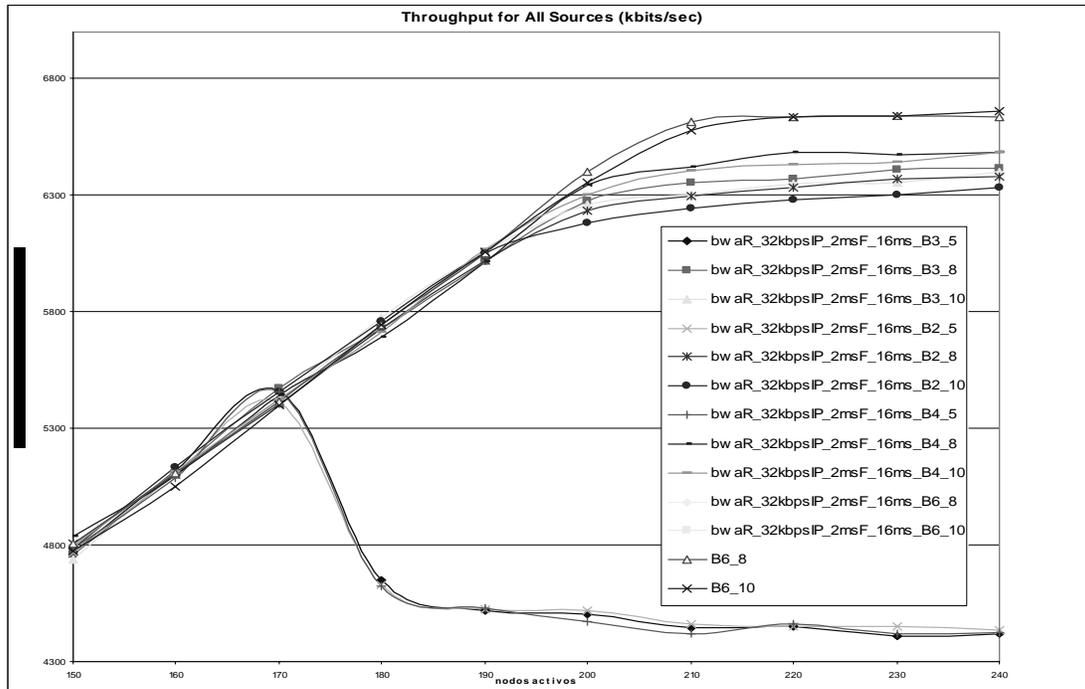


Figura 5-10: Throughput del sistema variando el número de slots de contención.

De las figuras 5-10 y 5-11 podemos apreciar que los mejores valores para el EBA son 6 para el mínimo y 8 para el máximo, nosotros hemos usado 3-10, sin embargo podemos ver que no es el más adecuado para obtener los mejores resultados. 6-8 y 6-10 son los valores más adecuados para obtener resultados óptimos.

Del mismo modo podemos notar que los peores valores a tomar son de 2-5 y 4-5, esto es por que la ventana de selección que se genera para la contienda es muy pequeña, es decir de 2^2 ó 2^4 , es decir de 4 ó 16 valores los cuales no son suficientes para el número de estaciones que están tratando de transmitir, lo que conlleva a que las colisiones aumenten y por tanto el rendimiento de la red sea disminuido notablemente.

5.5.4. QoS sobre diferentes tipos de tráfico.

Para el estudio de VoIP se incluyó una red con 150 nodos como se muestra en la Figura 5-12:

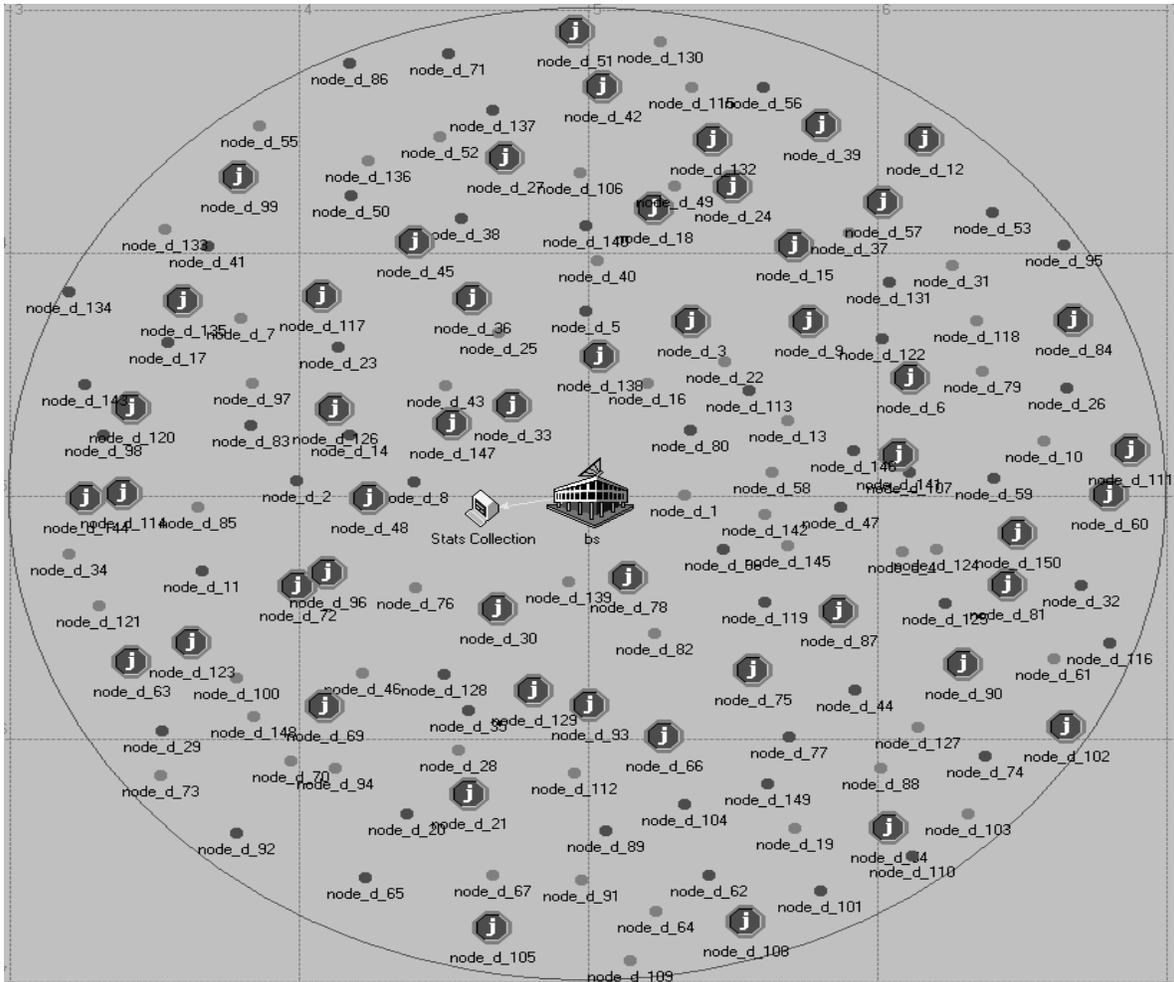


Figura 5-12: Red BWA con 150 usuarios (SSs).

En este estudio se están usando tres diferentes tipos de tráfico:

- Trafico de VoIP-G711.** Los nodos de color azul (1,4,7,10 etc) generan tráfico de VoIP usando el codec G711, el cual produce un frame de voz de 80 bytes cada 10 ms (64kbps, en la capa de Aplicación), como se muestra en la Figura 6.4. Cuando estos frames llegan a la capa BWA PHY (pasando por las capas RTP, UDP, IP SNAP, LLC, Ethernet MAC, BWA MAC), se produce un nuevo frame codificado, el cual requiere un Grant de 13 slots para su transmisión. La figura 5-13 muestra en forma detallada como se calcula el tamaño del Grant de 13 slots, para la transmisión de un frame de voz de 80 bytes.

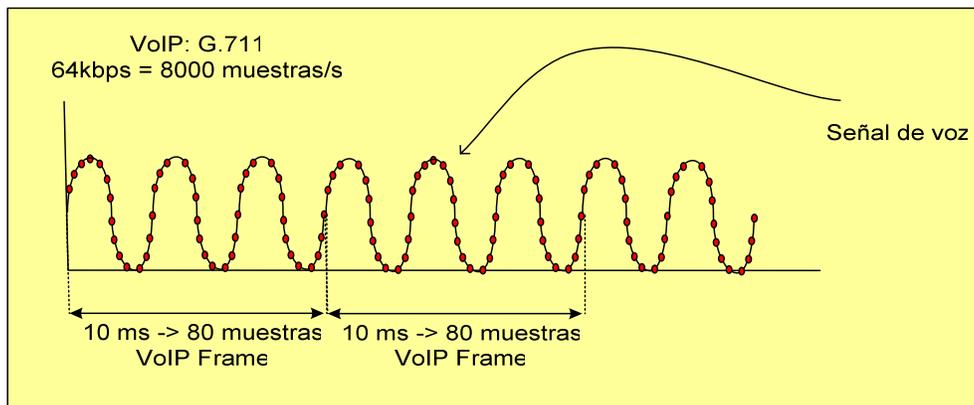


Figura 5-13: Codificación de una señal de voz basada en G.711.

- **Trafico de VoIP-G723.** Los nodos de color rojo (2, 5, 8, 11 etc.) generan tráfico de VoIP usando el codec G723, el cual produce un frame de Voz de 20 bytes cada 30 (5.3kbps, en la capa de Aplicación). Cuando estos frames llegan a la capa BWA PHY, se produce un nuevo frame el cual requiere un Grant de 9 slots para su transmisión. La única diferencia con el tráfico G711 es el tamaño del mensaje y el tiempo entre llegadas.
- **Internet.** Los nodos con una J (3, 6, 9, 12, etc.), generan tráfico de Internet, con tamaños de paquetes variable, que van desde los 64bytes hasta 1518bytes, y producen tráfico a razón de 32kbps en la capa Ethernet MAC.

Cuando el frame de voz llega a la capa BWA MAC, se forma un **BWA MAC frame**, el cual se puede transmitir en el canal UL usando palabras de código cortas, (short codewords) o palabras de código largas (long codeword), para determinar si se utilizan palabras de código cortas o largas, el SS usa la variable `BS_Short_Grant_Limit`, la cual se encuentra definida en el archivo `bwa_mac_defaul.ef`. Actualmente se usa un valor de 245 bytes. Por lo tanto, si se desea transmitir BWA **MAC frame** menor a 245 se usan palabras de código cortas, en caso contrario, se usarían palabras de código largas.

Para la transmisión del **BWA MAC frame** de 152 bytes, se tienen que utilizar palabras de código cortas, (porque $BWA\ MAC\ frame = 152 < BS_Short_Grant_Limit = 245$). El tamaño de las palabras cortas (o largas se encuadra definido en el archivo `bwa_phy.ef`). En este caso, cada palabra de código de 36-bytes debe incluir 30 bytes del **BWA MAC frame** + un encabezado de FEC (para detectar y corregir errores en los 30 bytes de datos). Es decir, por cada fragmento del **BWA MAC frame** de 30 bytes se agregan 6 bytes de protección. Finalmente, a estas palabras codificadas, se les agrega un preámbulo (*preamble*) para sincronía y espacio de guarda (*guardband*) para posibles variaciones o retardos en la transmisión. Todos los parámetros relacionados con la capa física (phy), se encuentran en el archivo `bwa_phy.ef`, y todos los relacionados con la capa BWA MAC se encuentran el archivo `bwa_mac_defaul.ef`. La figura 5-14 muestra el cálculo del número de slots a solicitar cuando se emplean palabras de código cortas.

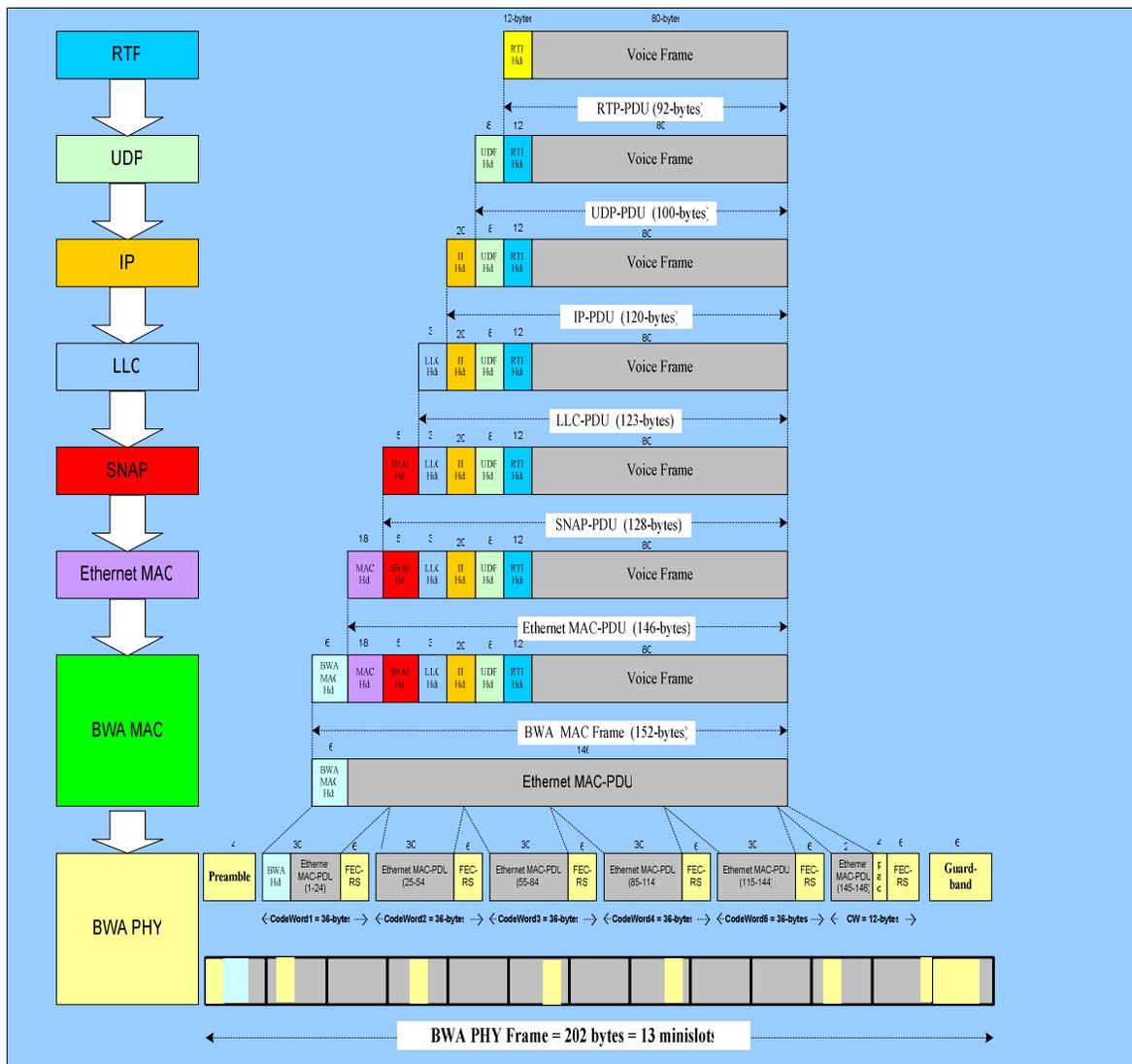


Figura 5-14: Cálculo del número de slots a solicitar (Grant Size) cuando se utilizan palabras de código cortas.

Para que un usuario pueda transmitir tráfico UGS, es necesario definir 9 parámetros, los cuales indicarán la distribución de las llegadas de: mensajes, paquetes, periodos activos, periodos inactivos. Estas variables se deben registrar como atributos del módulo generador de tráfico *src_type_1*.

La distribución que se utiliza para generar tráfico constante (UGS) se basan en:

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

La figura 5-15, muestra la forma como se especifica el tráfico de voz G711.

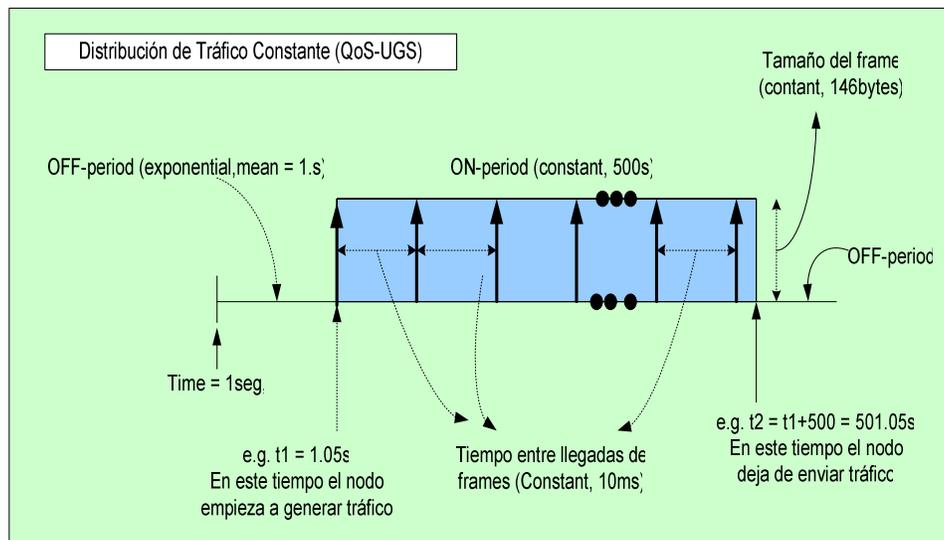


Figura 5-15: Distribución de tráfico UGS.

A continuación presentamos los resultados sobre VoIP, los valores de simulación son los mostrados en la tabla 5-4.

La figura 5-16 muestra la utilización del canal de ascenso y el Throughput de los diferentes tipos de servicio estudiados. Se puede observar que la utilización máxima del sistema es de 9.2 Mbps, la cual corresponde al 95% de la capacidad total del canal (9.6 Mbps), el otro 5% fue asignado al acceso de contención. De esta utilización solo el 66% (6.3 Mbps) fue usada para la transmisión de datos, y corresponde al Máximo Throughput del Sistema. El resto (29%), se consumió por el Radio Link Protocol (RLP) de IEEE 802.16 el cual consiste en las cabeceras MAC y PHY.

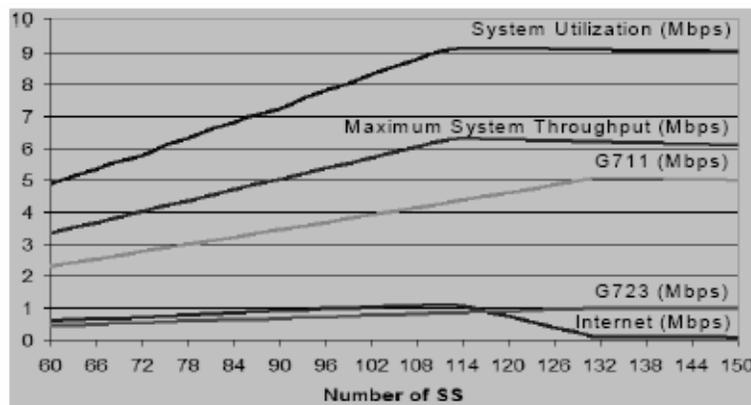


Figura 5-16: Throughput para todos los tipos de tráfico.

El máximo número de estaciones suscriptoras que puede soportar un canal de ascenso de 6MHz se puede obtener mediante la siguiente expresión:

$$\text{MaxSS} = 3 * \text{Utilización} / \text{VoIP}_{G711} + \text{VoIP}_{G723} + \text{Internet}$$

$$\text{MaxSS} = 3 * 9150 / 116.4 + 38.4 + 38.4 = 112$$

En la figura 5-16 podemos observar que el Throughput para el tráfico de Internet se empieza a caer cuando hay 112 usuarios en la red BWA (37-VoIP_{G711}, 38-VoIP_{G723}, 37-Internet).

En la figura 5-17 se puede observar que el 100% de los frames de VoIP son transmitidos en menos de 3.5 ms para G.711, y 7.5 ms para G.723, por lo tanto solo el 17% de los frames de Internet tuvieron retardos menores a 10 ms.

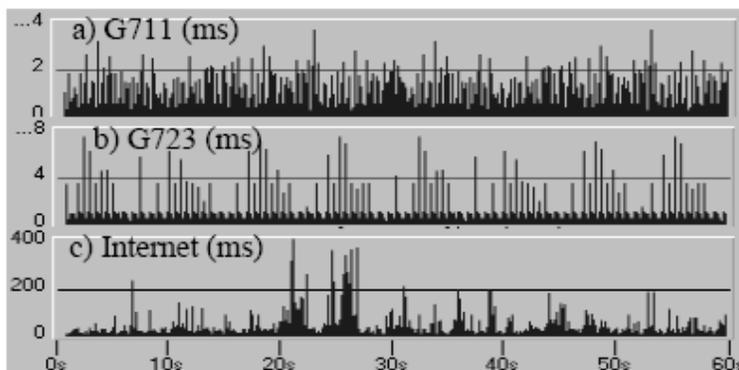


Figura 5-17: Retardo vs tiempo (112 SSs).

Por otro lado la figura 5-18 muestra la probabilidad acumulada respecto al retardo para los diferentes tipos de tráfico, con diferentes números de estaciones suscriptoras (112, 132, 135) respectivamente, mientras que la figura 5-19 muestra el retardo obtenido de los tres tipos de tráfico analizados respecto al tiempo de simulación, con 135 SS.

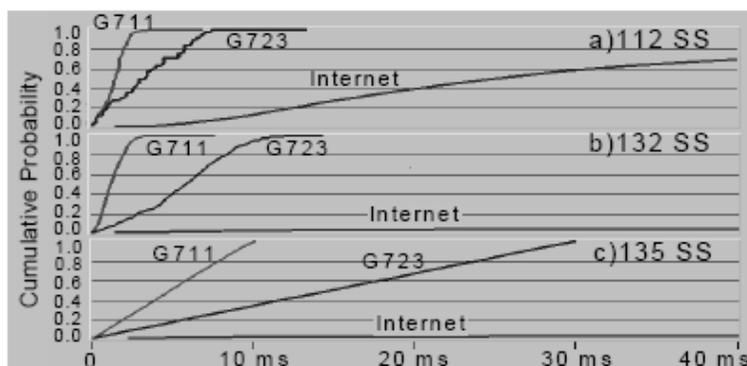


Figura 5-18: Probabilidad acumulada vs Retardo.

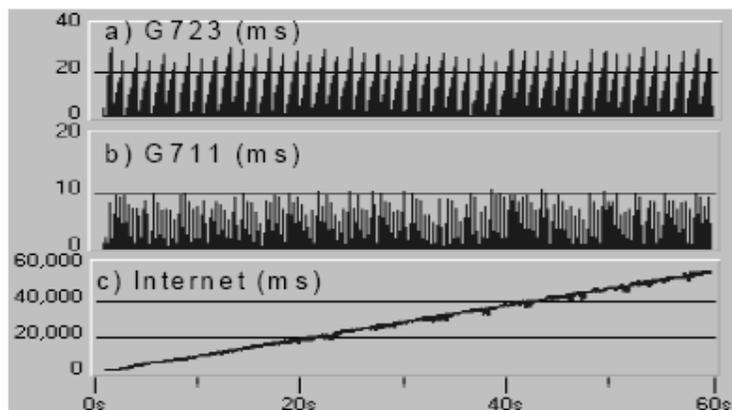


Figura 5-19: Retardo vs Tiempo (135 SSs).

Para realizar estos estudios mostrados anteriormente, se uso el algoritmo (EBSA) EDF-BWA Scheduling Algorithm.

Este algoritmo soporta diversos tipos de de tráfico con CBR (Constant Bit Rate) y VBR (Variable Bit Rate), además de diferentes servicios de Calidad de Servicio. El algoritmo combina Round Robin, Early Deadline First y Estrategias de prioridad.

El algoritmo trabaja de la siguiente manera:

- 1) Se identifican los requerimientos de las estaciones suscriptoras por el siguiente vector, que es registrado en la conexión y actualización cuando las SS hacen su petición de ancho de banda.

$$SS_n = \{QoS_i, s, \lambda, j, \text{Poll}, p, G\} \quad (1)$$

donde ' QoS_i ' es el tipo de servicio requerido por una SS y esta definido como

$$QoS_i = \{0 \text{ for } UGS, 1 \text{ for } rtPS, 2 \text{ for } nrtPS\} \quad (2)$$

' λ ' es el tiempo de llegada entre paquetes o el intervalo de polling medido en UL-Frames, (por ejemplo, si $\lambda = 10\text{ms}$ y $UL\text{-Frame} = 2 \text{ ms}$ entonces $\lambda = 10\text{ms}/2\text{ms} = 5 \text{ UL-Frames}$), j es el jitter medido en los UL-Frames, p es la prioridad de transmisión (tx), G es el tamaño del grant y s es el estado de la conexión, y para cada UL-MAP enviado, la estación base incrementa el estado del usuario (SSs_n) en 1. Cuando SSs_n es igual al interarrival time ($SSs_n = SS\lambda_n$), es tiempo de que la estación base envíe un grant o una oportunidad de transmisión para el usuario SS_n dependiendo del "Poll" bit.

- 2) Obtener el máximo número de prioridad ' Max_pi ', el cual será usado para los tipos de servicios QoS_i como sigue:

$$Max_p_i = \frac{\max\{SSj_{i_QoS_i}, SSj_{2_QoS_i}, \dots, SSj_{n_QoS_i}\}}{UL_Frame} \quad (3)$$

Donde $SSj_{i_QoS_i}$ se refiere al jitter del usuario SS_n requiriendo QoS_i .

- 3) Para cada SS_n con QoS_i se obtiene su prioridad de transmisión ' $SSp_{n_QoS_i}$ ' usando la siguiente expresión.

$$\begin{aligned} & \text{if } SSs_{n_QoS_i} - SS\lambda_{n_QoS_i} = 0 \text{ and } \text{Poll} = 1 \quad (\text{a utxop is required}) \\ & \quad SSp_{n_QoS_i} = Max_p_i \quad (\text{set } SSp \text{ to highest tx priority}) \\ & \text{else if } SSs_{n_QoS_i} - SS\lambda_{n_QoS_i} > 0 \quad (\text{a grant is required}) \\ & \quad (\text{get tx priority based on current state and tolerated delay}) \quad (4) \\ & \quad SSp_{n_QoS_i} = SSs_{n_QoS_i} - SSj_{n_QoS_i} - SS\lambda_{n_QoS_i} + Max_p_i \\ & \text{else} \quad (\text{a grant is not required in the current UL-Frame}) \\ & \quad SSp_{n_QoS_i} = 0 \quad (\text{set tx priority to } 0) \end{aligned}$$

- 4) Se programa primero cualquier región de mantenimiento, luego se programan los minislots que serán usados en la contención (para la petición de ancho de banda para la transmisión), usando un Contention Slot Allocator (CSA). Si hay algunas SS_n pidiendo utxop en el actual UL-Frame se programan primero éstos slots. Los usuarios con servicio UGS y el Poll bit puesto en 1, usarán la utxop para indicar a la estación base (BS) que reestablezca el servicio. Los usuarios con $rtPs$ o $nrtPs$ siempre tienen el Poll bit puesto en 1, y éstas estaciones suscriptoras usan el utxop para peticiones de ancho de banda.

- 5) En el espacio restante del UL-Frame, se programan las SS_n de acuerdo a su prioridad de transmisión, empezando con el servicio de tipo UGS , luego con $rtPs$ y por ultimo con $nrtPs$. Una mayor prioridad tiene precedencia de una menor, donde la prioridad ($SSp_{n_QoS_i}$)=1 es la prioridad mas baja, y Max_p_i es la mayor prioridad. Si hay dos o más SS_n con la misma prioridad, se usa la técnica de Round Robin. Para servicios $nrtPs$, si el espacio disponible en el actual UL-Frame $< G$ entonces la BS debe usar la técnica de fragmentación y enviar continuas oportunidades de transmisión mientras G se complete. Para servicios $rtPs$, si el espacio disponible del actual UL-Frame $< G$ entonces la BS debe usar la técnica de fragmentación y los usuarios pueden hacer peticiones para ancho de banda próximo usando la técnica de piggyback request. Para cada grant puesto en el UL-MAP, se actualiza el estado del usuario de la siguiente manera:

$$SS_{s_n} - QoS_i = SS_{s_n} - QoS_i - SS_{\lambda_n} - QoS_i \quad (5)$$

- 6) Si después de programar a todas las SS_n con QoS_i , hay slots disponibles, entonces se programa cualquier petición BE (Best Effort) usando fragmentación + piggyback request, para una mejor utilización del canal UL.

Para *UGS*, la tabla 5-9 incluye tres diferentes flujos de servicio con diferentes requerimientos de QoS. El servicio VoIPa corresponde al codec G711 que genera un frame de voz de 80 bytes cada 10 ms y la capa física del IEEE 802.16, este servicio demanda un grant de 13 slots (Usando los parámetros de simulación usados en éste estudio). El servicio VoIPb y VoIPc corresponden a los codecs G729 y G723 respectivamente. Cuando una SS registra un servicio UGS, el estado (**s**) de una SS es 1 (ver SS1 en la tabla x) y **s** se incrementa en 1, cada vez que la BS envía un UL-MAP, cuando $s = \lambda$ (ver SS₂) el EBSA checa primero el Poll bit, para Poll bit=0, se requiere un grant de tamaño $G=13$ slots, EBSA determina la prioridad de transmisión para este usuario, $SS_{p2_UGS} = 25$.

QoS	SS	CoS	s	λ	j	Poll	p	Grant
UGS	1	VoIPa	1	5	5	0	0	13
	2	VoIPa	5	5	5	0	25	13
	3	VoIPa	10	5	5	0	30	13
	4	VoIPb	30	30	15	1	30	11
	5	VoIPb	31	30	30	0	1	11
	6	VoIPb	60	30	30	1	30	11
	7	VoIPc	15	15	15	0	15	9
	8	VoIPc	30	15	15	0	30	9
	9	VoIPc	31	15	15	0	loss	9
rtPS	10	MPEGa	20	20	20	1	20	1
	11	MPEGa	21	20	20	1	1	17
	12	MPEGa	22	20	20	1	2	9
	13	MPEGb	20	20	20	1	20	1
	14	MPEGb	21	20	20	1	1	139
	15	MPEGb	40	20	20	1	20	139
nrtPS	15	MPEGb	41	20	20	1	loss	139
	16	FTP	50	50	100	1	100	1
	17	FTP	51	50	100	1	1	65
	18	FTP	100	50	100	1	50	120
	19	FTP	150	50	100	1	100	50
20	FTP	151	50	100	1	101	20	

Tabla 5-9: Prioridades EDF-BWA.

La prioridad más grande para *UGS* es $Max_{p_{UGS}} = 30$. Así SS_2 necesita esperar hasta que usuarios con una prioridad de transmisión más grande sean programados como SS_3 . Para Poll bit=1, una utxop es requerida, EBSA programa una utxop con la prioridad de transmisión puesta al máximo, ver SS_4 . Si SS_4 se activa, esta estación usara la utxop para indicarle a la BS que restaure su servicio *UGS*. La BS, recibe esta indicación y pone el Poll bit a 0, y EBSA obtiene la nueva prioridad de tx para este usuario (SS_5 muestra este evento). Como la congestión en la red se incrementa, las prioridades de transmisión de los usuarios empiezan a hacerse más grandes, si las prioridades de tx se hacen más grandes, entonces llegarán a ser mayores que Max_{p_i} , EBSA envía grants nulos a los usuarios con tipos de servicio *UGS* y *rtPs* por que ellos perderán el plazo. Un grant nulo indicará a la SS destruir el paquete atrasado y esperará el siguiente grant, (ver SS_9). Se nota que cuando $s = \lambda$, hay algunos servicios que tienen una prioridad de tx más grande que otros (ver SS_2 y SS_7), esto es por que un servicio con un jitter bajo requiere de una mayor prioridad de tx que un usuario con un jitter grande.

Para *rtPs*, EBSA usa los mismos pasos para programar grants, que los usados para servicios de tipo *UGS*, con la excepción que la *utxop* se usará para petición de ancho de banda de tamaño variable. La BS recibe una petición de ancho de banda de un usuario con este servicio, actualizará su vector programará el tamaño del grant de acuerdo a su prioridad de transmisión. La Tabla X incluye dos tipos de servicio MPEG4a y MPEG4b que demandan en promedio 76 kbps y 444kbps (en la capa de aplicación), respectivamente. Éstas tasas de tráfico son calculadas usando un tamaño pequeño I, P y B frames para MPEG4a y tamaño medio I, P y B frames para MPEG4b a 25 fps ($\lambda = 20$ UL-frames ó 40ms). Por lo tanto si un P-frame es recibido, (por ejemplo 417 bytes para MPEG4a y 2934 bytes para MPEG4b), el tamaño del grant requerido será de 17 minislots para MPEG4a y 139 para MPEG4b, como se muestra para SS_{11} y SS_{14} . La tabla X muestra el evento cuando el grant no se ajusta en el espacio disponible después de programar el servicio *UGS*. Si en el momento de programar SS_{11} hay solo 10 minislots disponibles en el actual UL-Frame, éstos minislots son programados para SS_{11} , y en el siguiente UL-Frame, la BS programa el resto (7 minislots) más 2 minislots por cabeceras de fragmentación, como se muestra para el usuario SS_{12} .

El tipode servicio *nrtPs* es programado al igual que para *rtPs*, con la excepción de que esta permitido el retardo de los paquetes, Para este servicio, se uso FTP donde un usuario envía un paquete de 5.12 kbyte, el cual demanda 5-1024 byte TCP PDUs y requiere un grant de 365 minislots (ver SS_{17}). Este es un grant demasiado grande, la BS normalmente envía grants pequeños de acuerdo a las políticas de servicio de Iso usuarios, basados en el mínimo y máximo soportado por el ancho de banda. Siempre que un usuario recibe un grant pequeño, debe enviarse la fracción del mensaje que pueda fijarse en ese grant y piggyback del resto del paquete (ver SS_{18} y SS_{19}). Si después de algunos grants el mensaje no se ha transmitido completamente y el retardo acumulado de la transmisión para éste mensaje es más grande que el máximo retardo registrado para este servicio, la BS mantiene enviando grants ghasta que el mensaje se transmita por completo, este servicio soporta grandes retardos pero no permite la pérdida de paquetes, como se muestra para el SS_{20} , donde el retardo máximo está puesto a 100 UL-frames y el actual retardo es 101 UL-Frames.

5.6. Conclusiones

En este capítulo hemos observado los resultados que se obtuvieron después de realizar diferentes tipos de prueba sobre el modelo de simulación de la red, los cuales mostraron comportamientos interesantes y con los cuales se pudieron establecer varias consideraciones para los próximos modelos, o simulaciones venideras.

Las pruebas que se realizaron, fueron elegidas porque con ellas se puede analizar el comportamiento general de una red de banda ancha, así como los servicios que ésta es capaz de soportar con calidad aceptable, del mismo modo se puede considerar el número máximo de usuarios en la red, la distancia más grande que puede existir entre una estación suscriptor y la estación base, la capacidad de transmisión de la red, los retardos que puede llegar a tener, etc. Es decir en breves palabras se obtiene el rendimiento general de la red con valores confiables, los cuales pueden ser usados por el personal de gestión de redes para evaluar sus posibilidades en el mercado, y poder saber cuales servicios pueden ofrecer a sus clientes, que tarifas asignar, etc.

De acuerdo a los resultados obtenidos transmitiendo tráfico isócrono y sin usar Piggy Back podemos decir que los resultados no son aceptables, ya que hay un desperdicio del ancho de banda, en las gráficas se puede observar que los paquetes con mayor tamaño no son los que presentan el mejor comportamiento, siendo los que efectivamente deberían presentarlo, esto es por que al enviar los paquetes de mayor tamaño, incluyendo las cabeceras correspondientes se requiere de enviar un frame más extra casi vacío, solo con el contenido de la parte faltante, entonces en cada transmisión se está desperdiciando casi un frame, por lo que los retardos aumentan y en general el comportamiento de la red al transmitir paquetes grandes, es notablemente desmejorado.

Por el contrario, al momento de realizar solicitudes con Piggy Back, se observa una mejoría inmediata, y ahora sí, las transmisiones de paquetes con longitud más grande, son las que presentan el mejor comportamiento. Esto es por que ahora ya no se desperdician los frames por cada transmisión ya que en cada transmisión de datos también se esta enviando el ACK, ahorrándose así un frame, lo que mejora notablemente el rendimiento de la red.

En cuanto a los resultados arrojados por las pruebas de la variación del número de slots de contención, se puede concluir que los valores más adecuados a usar en el protocolo IEEE 802.16 son de 2 a 12, siendo éste último el valor que mostró los mejores resultados en el comportamiento de la red, cabe señalar que la mayoría de nuestras simulaciones se hicieron con 2 slots de contención por lo que los resultados mostrados en este capítulo pueden mejorarse si se usan 12 slots de contención en vez de los 2 usados para estos estudios.

Por otra parte los estudios hechos con el EBA (Exponential Back-Off Algorithm), donde se varió el número máximo y mínimo que usa el algoritmo, se obtuvieron resultados interesantes, este tipo de estudio se realizó principalmente, para encontrar la relación de los valores de este algoritmo con el protocolo IEEE 802.16, para así obtener resultados óptimos en futuras simulaciones. Los resultados arrojados de este estudio, mostraron que los mejores valores a usar son 6 y 8, mínimo y máximo respectivamente. En nuestras simulaciones usamos valores de 3-10, valores que no corresponden a los óptimos, sin llegar tampoco a ser de los peores, por lo que es otro factor importante en los próximos estudios para seguir mejorando y optimizando la red.

De los estudios realizados sobre VoIP podemos decir que los resultados mostraron que el mecanismo estándar de reservación de acceso del IEEE 802.16 puede ser mejorado notablemente adoptando otros mecanismos. El mecanismo de UGS (Unsolicited Grant Slot) y el mecanismo de piggyback son los más apropiados para los servicios interactivos que requieren mostrar sus resultados en tiempo real.

Para el tráfico de Internet no existe tanto problema si se usa o no el mecanismo de piggyback.

En general el incremento del funcionamiento de la red se puede obtener cuando las características del tráfico son cuidadosamente analizadas. La elección de un mecanismo erróneo conllevará a la reducción de la calidad del servicio considerablemente.

Capítulo 6

Conclusiones

6.1. Discusiones Finales

De acuerdo a los resultados obtenidos en las diferentes pruebas realizadas se pueden concluir varias cosas, por una parte podemos decir que el modelo de simulación no es del todo el óptimo, sin embargo y a pesar de ello, los resultados observados son los esperados de acuerdo al protocolo IEEE 802.16, a pesar de que faltan implementar muchos algoritmos y métodos que mejoren el rendimiento del sistema.

Por otro lado se pudieron observar los diferentes tipos de servicios que la red puede soportar, así como la cantidad máxima de usuarios soportados por cada escenario diferente de red. Se analizaron los diferentes escenarios por su cuenta y se vieron las diferencias entre ellos, así como las mejoras que se pueden llegar a tener implementando nuevas técnicas ó algoritmos que incrementen el rendimiento de la red.

6.2. Trabajo Futuro

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

Hay muchos aspectos que hacen falta mejorar al actual modelo de simulación, de hecho ya se está trabajando en ellos, hay diferentes grupos de trabajo que se están encargando de los principales problemas que se tienen con el actual modelo. Una vez que se tengan resueltos todos estos problemas, el modelo se comportará de una manera óptima y servirá incluso para hacer pruebas más confiables y aplicarlas a nivel masivo y comercial.

Se trabajará sobre la implementación y evaluación de nuevas técnicas adaptivas de Alojamiento de Slots de Contención (ASC). Las redes BWA no incluyen este tipo de algoritmos para asignar el tamaño adecuado de la región de contención en cada trama de señalamiento.

El algoritmo que designa el uso de cada slot en el canal uplink, mantiene un número fijo en cada trama de señalamiento lo que genera un bajo rendimiento de la red celular. Esto se debe porque en periodos de congestión, los usuarios requieren un número mayor de slots de contención para transmitir correctamente sus mensajes de reservación, y al tener siempre el mismo valor, se genera un número considerable de colisiones, provocando la caída de eficiencia.

También hay un estudio sobre la evaluación de nuevas técnicas de control de acceso al medio (MAC), usando Algoritmos de Resolución de Contención (ARC). Cuando dos o más estaciones transmiten sus mensajes de reservaciones en el mismo instante ó slot de contención se genera una colisión y el algoritmo adoptado en redes BWA para la resolución de colisiones es el algoritmo Exponencial Backoff (EB), el cual presenta una muy baja eficiencia en condiciones de congestión.

En el algoritmo EB cuando hay una colisión, genera un número aleatorio 'backoff' entre $[0, 2^{i+c}-1]$, donde 'i' es la ventana inicial del algoritmo y 'c' el número de colisiones. Este número aleatorio 'backoff' representa el número de slots de contención que debe dejar pasar un usuario (o módem inalámbrico) antes de intentar retransmitir un mensaje de reservación. Si dos o más estaciones vuelven a seleccionar el mismo slot de contención se produce nuevamente otra colisión y el rango del valor backoff se incrementaría exponencialmente, lo que causaría que un usuario tenga que esperar por mucho tiempo antes de intentar transmitir una petición de reservación. Además de incrementar el tiempo de transmisión, se reduce considerablemente la velocidad de transmisión de datos (throughput) al mantener el canal ocupado tratando de resolver las colisiones.

Otro de los trabajos futuros a realizar son las técnicas de mejoramiento de asignación de slots (de reservación y fijos) en el canal uplink para la transmisión de datos (denominados "Scheduling Algorithms"). Las propuestas para redes BWA aún no han definido como se deben asignar los slots de reservación y los slots fijos de tal manera que todos los usuarios de la red compartan justamente los recursos. Conforme el número de usuarios activos en la red aumenta, hay ocasiones en las cuales algunos usuarios no pueden ser atendidos de igual forma que otros que quieren transmitir la misma clase de aplicación o servicios, esto se debe a que las redes BWA utilizan una distribución de servicio del tipo FIFO (primero que llega, primero que se atiende). Esta distribución causa una baja calidad de servicio en los usuarios que llegaron tarde lo que puede afectar severamente la comunicación en algunas aplicaciones.

Uno de los principales problemas a resolver es el del Handover, el cual tiene dos diferentes puntos de vista, el Handover dentro del área de servicio de un mismo operado y el Handover entre diferentes operadores.

Un problema fundamental por resolver es como se provisiona a una célula para garantizar que terminales que ingresan con determinada clase de servicio puedan obtener una clase de servicio similar después de concluido el proceso de handover. Cabe recordar que una célula implementa diferentes clases de servicio dando preferencia a ciertos paquetes (mejor calidad de servicio) en detrimento de otros (peor calidad de servicio). De esta forma una célula tiene un tope máximo en cuanto al número de usuarios que puede aceptar en cada clase de servicio de tal forma que no se viole la calidad de servicio de las demás clases. En el caso de handover, una célula tiene que contemplar no solo el número de usuarios que está sirviendo en un momento determinado, si no también los usuarios visitantes que ingresarán a dicha célula en el futuro después de implementar un handover.

Otro problema relacionado con el anterior es como balancear la carga de tráfico en células para el caso donde una terminal móvil pueda realizar un handover en más de una célula.

También es importante minimizar los problemas relacionados con el flujo de paquetes después de un handover. Debido a que un handover involucra un cambio en la ruta que siguen los paquetes es muy probable que un handover represente algunos de los siguientes problemas: pérdida de la conexión (no hay recursos en la célula receptora), degradación de la clase de servicio en célula receptora, pérdida de paquetes, reordenamiento de paquetes, retraso excesivo en la llegada de paquetes. Todos estos problemas seguramente degradarán la calidad de servicio observada por las aplicaciones corriendo en la terminal móvil. Este problema tiene mucho que ver con el protocolo de enrutamiento usado para implementar el handover en la capa de red. En el estándar actual de una BWA se usa un handover duro "hard-handover". En el cual la conexión anterior a

un handover se destruye, y solo una vez concluido el handover, una nueva conexión se crea. Este método de handover tiene casi todas las degradantes que se mencionan.

Un problema adicional por resolver en el caso de handover entre operadores diferentes es que los nombres de las clases de servicio ofrecidas por un operador de servicios de WMAN y los parámetros de calidad de servicio asociados con cada una de estas clases pudieran ser diferentes. Es necesario estandarizar estos parámetros de calidad de servicio para hacer transparente el proceso de handover para terminales inalámbricas.

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

6.3. Contribuciones

De los resultados obtenidos en la presente investigación se obtiene una referencia para las implementaciones prácticas de un diseño de infraestructura para una red de comunicación inalámbrica de banda ancha. Las diversas condiciones y parámetros involucrados en las simulaciones corresponden a distintos escenarios y ambientes prácticos en los que se consideran los servicios más comunes en el mercado. Pueden agregarse otras consideraciones de acuerdo con el nivel de detalle que se requiera en cada caso. De esta forma, los estudios realizados pueden servir como punto de partida para la ejecución de diseños y planeaciones de proyectos de comunicaciones inalámbricas así como de mejoras al protocolo BWA. El detalle involucrado en los modelos empleados permite obtener resultados que también pueden considerarse en futuras investigaciones o en desarrollos que contribuyan a la optimización del protocolo IEEE 802.16 o el modelo de simulación.

De acuerdo con el análisis realizado en este estudio en el que se consideraron aspectos específicos descritos en el protocolo IEEE 802.16, ha sido posible determinar qué parámetros pueden optimizarse para casos específicos de tipo de tráfico, tasas de transmisión, dispersión geográfica de los usuarios, número de usuarios, entre otros. La información detallada en los resultados de la investigación incluye diversas recomendaciones al protocolo IEEE 802.16 que pueden mejorar significativamente el desempeño de una implementación real.

Los modelos desarrollados para la reproducción de las funciones de los componentes involucrados en el protocolo BWA realizan las operaciones más importantes de las redes inalámbricas. Creados con base en el protocolo de cable módem DOCSIS, estos modelos integran características específicas para los enlaces inalámbricos entre los que destacan los parámetros que describen las propiedades físicas de los componentes de transmisión. Estos modelos pueden ser adaptados, modificados, ampliados u optimizados para incorporar un mayor número de parámetros y funciones que conformen un esquema adaptable a los requerimientos específicos de alguna investigación, desarrollo o implementación en particular.

Las características específicas del modelo en OPNET facilitan las adecuaciones mencionadas anteriormente mediante funciones flexibles. Entre las características que se incorporaron al modelo destacan el algoritmo exponencial Back-Off para la resolución de colisiones, la variación de las tasas de transmisión y de la longitud de los paquetes transmitidos por las Estaciones Suscriptoras para simular los distintos tipos de tráfico de aplicación empleados actualmente, así como otros parámetros de la subcapa MAC. Pueden agregarse funciones adicionales que ajusten o mejoren parámetros para el estudio de los tópicos descritos como parte del trabajo futuro en materia de comunicaciones inalámbricas de banda ancha.

Cabe destacar que los resultados de esta investigación pueden ser considerados en aplicaciones para generación de infraestructura de comunicación de bajo costo para el soporte de una amplia gama de servicios. En particular, estos servicios pueden ofrecerse en aquellas localidades cuyas características geográficas dificulten el despliegue de nuevas tecnologías. Una red de acceso inalámbrico de banda ancha puede mejorar significativamente las posibilidades de desarrollo económico y social de este tipo de regiones, integrando los servicios más comunes actualmente de voz, datos, video, entre otros en una sola tecnología fácilmente escalable.

6.4. Conclusiones Finales

El modelado de los distintos ambientes de simulación permitió obtener resultados a través de los cuales puede determinarse qué parámetros ofrecen el mejor desempeño bajo distintas condiciones. Sin embargo, puede mejorarse este desempeño si se incorporan otras características al modelo. Parte de estas características se encuentran las funciones de Calidad de Servicio para el soporte de aplicaciones de comunicación en tiempo real. También puede optimizarse el uso del canal inalámbrico mediante la supresión de encabezados en la capa MAC o la incorporación del algoritmo Splitting-Tree para la resolución de colisiones. Adicionalmente, pueden hacerse las modificaciones correspondientes que permitan integrar movilidad a las estaciones suscriptoras.

De los resultados de la investigación se comprobó que el protocolo IEEE 802.16 puede integrar distintos servicios de datos, voz, video entre otros siempre que se realicen las adecuaciones que optimicen su comportamiento. Esta integración se ofrece, adicionalmente, bajo el esquema del canal inalámbrico, un medio que resulta bastante conveniente en términos de inversión para la implementación o escalamiento de la infraestructura tecnológica.

Finalmente, los objetivos planteados al inicio de esta investigación pudieron ser cumplidos al recrear diversas condiciones que se adaptan a las necesidades reales de comunicación. Adicionalmente, fue posible realizar recomendaciones que optimizan el comportamiento del protocolo en distintos escenarios.

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

- Modelo de simulación. Se observó que de acuerdo con las pruebas realizadas puede mejorarse agregando otras características como QoS, Header supresión, etc.
- Aplicaciones soportadas de acuerdo con los resultados. Voz, Internet, tiempo-real, video bajo demanda (streaming media).
- Mejoras al protocolo IEEE 802.16
- Resulta conveniente la implementación de esta tecnología cuando hay limitaciones de infraestructura.
- Se cumplió uno de los objetivos principales al realizar un análisis detallado de distintos ambientes

Referencias

IEEE Standard for Local and metropolitan area networks. Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems. The Institute of Electrical and Electronics Engineers. December, 2001.

Draft New Recommendation ITU-R F.BWA. Radio Transmission Systems for Fixed Broadband Wireless Access (BWA) Based on Cable MODEM Standards (Annex B of ITU-T Rec J.112). International Telecommunications Union. April, 1999.

Data-Over-Cable Service Interface Specifications. Radio Frequency Interface Specification. Cable Television Laboratories, Inc. 2001.

Fellows, David; Jones, Doug. DOCSIS™ Cable Modem Technology. IEEE Communications Magazine. March 2001.

Sdralia, V.; Smythe, C.; Tzeferos, P.; Cvetkovic, S. Performance Characterisation of the MCNS DOCSIS 1.0 CATV Protocol with Prioritised First Come First Served Scheduling.

Computer networks : a systems approach / Larry L. Peterson & Bruce S. Davie Amsterdam : M. Kaufmann, 2003.

The complete handbook of the Internet / by W.J. Buchanan Boston, Massachusetts : Kluwer Academic, 2002.

Quality of service control in high-speed networks / H. Jonathan Chao, Xiaolei Guo New York : Wiley, 2002.

Communication networking : an analytical approach / Anurag Kumar, D. Manjunath, Joy Kuri Amsterdam : Elsevier ; M. Kaufmann, 2004.

[http://www.uv.es/~montanan/mondragon/492,70,Cronología estándares CATV](http://www.uv.es/~montanan/mondragon/492,70,Cronología%20est%C3%A1ndares%20CATV)

Apéndice A

Acrónimos y Abreviaturas

3-DES	Triple Data Encryption Standard
AK	Authorizatoin 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 Comparision Value
CEPT	European Conference of Postal and Telecommunications Administrations
CG	Continuos 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	Download 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
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
VCI	Virtual Channel Identifier
VLAN	Virtual Local Area Network
VP	Virtual Path
VPI	Virtual Path Identifier
XOR	Exclusive OR

Apéndice B

Mensajes Adicionales de la Subcapa MAC

B.1. Mensajes de Control de Llave de Privacidad (PKM-REQ/PKM-RSP)

Los mensajes PKM-REQ y PKM-RSP se emplean para cumplir con las funciones de autenticación, autorización y control de llaves entre la Estación Base y la Estación Suscriptora. Para la definición de estas funciones, se incorporan las Asociaciones de Seguridad (SA, Security Association) que consisten en el conjunto de información compartida entre una Estación Base y una o más Estaciones Suscriptoras para el soporte de seguridad en las comunicaciones que establecen. Dado que los procesos de seguridad implican distintas etapas, se han definido diversos mensajes que se incluyen en los PKM-REQ y PKM-RSP como se indica a continuación:

- **Mensaje de Agregación de Asociación de Seguridad.** Enviado por la Estación Base hacia la Estación Suscriptora para el establecimiento de una o más SAs adicionales. Se incluye el Identificador de Asociación de Seguridad (SAID) correspondiente
- **Mensaje de Solicitud de Autorización.** Este mensaje es transmitido por la Estación Suscriptora e incluye el Certificado X.509, las capacidades de seguridad y el SAID primario que corresponde al CID Básico de la SS, asignado durante el Ranging inicial. El Certificado X.509 relaciona la información de identidad de la Estación Suscriptora con una llave pública RSA emitida por el fabricante de la SS. La Estación Base deberá conocer dicha llave para poder establecer una relación de confianza con la Estación Suscriptora, para lo cual también se requiere de un Certificado X.509 emitido por una Autoridad Certificadora. Las capacidades de seguridad se refieren a los algoritmos de cifrado y autenticación empleados por la Estación Suscriptora.
- **Mensaje de Respuesta de Autorización.** Una vez que la Estación Base ha recibido la Solicitud de Autorización de una Estación Suscriptora y la autoriza, envía la llave de Autorización cifrada con la llave pública de la SS, el tiempo de validez de la Autorización, la secuencia numérica de la llave de Autorización, así como atributos y propiedades adicionales para la SA.

- **Mensaje de Rechazo de Autorización.** Si la Estación Base no acepta la Solicitud de Autorización, envía un código de identificación de la razón del Rechazo así como información opcional adicional.
- **Mensaje de Solicitud de Llave.** En este mensaje la Estación Suscriptora envía la Secuencia Numérica de la Llave de Autorización, el SAID correspondiente y la llave HMAC (Hashed Message Authentication Code) para la autenticación de mensajes en transmisión descendente.
- **Mensaje de Respuesta de Llave.** A través de este mensaje, la Estación Base envía la Llave de Cifrado de Tráfico (TEK, Traffic Encryption Key) asignada a algún SAID en particular. En todo momento, la Estación Base cuenta con dos conjuntos de información relativa a la generación de llaves para cada SAID que lo haya solicitado. Estos dos conjuntos se distinguen designando a uno como “nuevo” y al otro como “viejo”. Los parámetros de ambos conjuntos se incluyen en este mensaje. Adicionalmente, se envía el atributo HMAC Digest mediante el cual la Estación Suscriptora autentifica el Mensaje de Respuesta de Llave.
- **Mensaje de Rechazo de Llave.** Este mensaje indica a la Estación Suscriptora que ha dejado de obtener autorización para usar un SAID en particular. Se incluye un código que identifica a la razón por la cual se ha perdido la autorización, así como el parámetro HMAC Digest que permite a la SS autenticar el origen del mensaje.
- **Mensaje de Autorización Inválida.** Este mensaje indica a la Estación Suscriptora que debe reiniciar la autorización con la Estación Base en el caso de que esta última no reconozca a la BS en espera de autorización, es decir, cuando no se cuenta con una Llave de Autorización válida correspondiente a la Estación Base. También es posible recibir este mensaje cuando ha fracasado la verificación de la Estación Base mediante el parámetro HMAC Digest.
- **Mensaje de TEK Inválida.** En caso de que la TEK enviada por la Estación Suscriptora durante un proceso de solicitud de Autorización no sea reconocida por la Estación Base, se enviará un mensaje de este tipo.
- **Mensaje de Información de Autenticación.** Mediante este mensaje, la Estación Suscriptora envía a la Estación Base el Certificado X.509 emitido por una Autoridad Certificadora. La transmisión de este mensaje es de carácter informativo.

B.2. Mensajes de Solicitud, Respuesta y Confirmación de Agregación Dinámica de Servicio (DSA-REQ, DSA-RSP, DSA-ACK)

La transmisión de estos mensajes se realiza cuando se agrega un nuevo Flujo de Servicio, flujo unidireccional de transmisión de unidades de información de servicio MAC a través de una conexión empleando algún parámetro particular de Calidad de Servicio.

La solicitud de Agregación Dinámica de Servicio puede ser generada por la Estación Base o por la Estación Suscriptora. Sólo puede incluir los parámetros para un solo flujo de servicio en cada dirección de la transmisión.

La respuesta DSA-RSP, contiene el CID de la conexión recién creada. Incluye los parámetros del flujo de servicio así como los de QoS para la conexión, entre los que destacan Prioridad de Tráfico, conjunto de parámetros de QoS, Tasas Máximas de Tráfico, Tipo de Programación de Transmisión Ascendente (descrito más adelante), Latencia Máxima, Tolerancia de Jitter, Tamaño de los SDU, entre otros. También se envía información correspondiente a la Subcapa de Convergencia, como el Tipo de Tráfico transmitido (IPv4, IPv6, 802.3, etc.). En caso de que la Agregación no haya resultado exitosa, la Estación Base informará a la Estación Suscriptora sobre los parámetros que fracasaron.

Finalmente, el mensaje DSA-ACK permite confirmar a la Estación Suscriptora la recepción de DSA-RSP. En caso de ocurrir algún error durante la Agregación, se indican los detalles acerca de los Parámetros que fracasaron durante el proceso.

B.3. Mensajes de Solicitud, Respuesta y Confirmación de Modificación Dinámica de Servicio (DSC-REQ, DSC-RSP, DSC-ACK)

Estos mensajes se envían con la finalidad de realizar algún cambio en alguno de los parámetros que caracterizan a alguna conexión existente. El proceso se inicia en la Estación Suscriptora y es similar al de la Agregación Dinámica de un nuevo Servicio. Los parámetros capaces de ser modificados son los mismos que se especifican durante una Agregación.

B.4. Mensajes de Solicitud y Respuesta de Eliminación Dinámica de Servicio (DSD-REQ, DSD-RSP)

La supresión de alguna conexión puede iniciarse tanto por la Estación Base como por la Estación Suscriptora. Se incluye el Identificador de Flujo de Servicio, SFID, así como el CID de la Conexión de Control Primario de la Estación Suscriptora.

B.5. Mensajes de Solicitud y Respuesta de Asignación a Grupos Multicast de Consulta (MCA-REQ, MCA-RSP)

La Estación Suscriptora transmite el mensaje MCA-REQ con la finalidad de solicitar su asignación a algún grupo Multicast, indicado el CID correspondiente. También se emplea cuando la SS requiere ser removida de alguno de los grupos Multicast a los que pertenezca. La respuesta MCA-RSP proveniente de la Estación Base indica mediante el Código de Confirmación el resultado de la operación.

B.6. Mensajes de Solicitud y Respuesta de Modificación del Perfil de Transmisión Descendente (DBPC-REQ, DBPC-RSP)

Las Solicitudes de Modificación del Perfil de Transmisión Descendente son realizadas por la Estación Suscriptora cuando se requiere hacer algún cambio de este tipo en la transmisión desde la Estación Base. Generalmente esto ocurre cuando la SS detecta degradación en la señal de la BS. También es posible que este mensaje se envíe a través de un RNG-REQ.

B.7. Mensaje de Comando de Reseteo (RES-CMD)

Cuando la Estación Base detecta que alguna Estación Suscriptora deja de responder o bien ha presentado numerosas anomalías en su operación, puede enviar el mensaje RES-CMD para forzar el reinicio del proceso de acceso al Sistema BWA.

B.8. Mensajes de Solicitud y Respuesta de Capacidades Básicas (SBC-REQ, SBC-RSP)

Durante la inicialización de una Estación Suscriptora, es necesario informar de sus capacidades soportadas, tanto los parámetros físicos como las correspondientes a la asignación de Ancho de Banda. Esto se realiza mediante el envío del mensaje SBC-REQ, que la Estación Base responde indicando su confirmación para el uso de las capacidades informadas por la SS. La BS también especifica aquellas que no es posible emplear o que no reconoce.

B.9. Mensaje de Comparación de Reloj (CLK-CMP)

La transmisión Broadcast de este mensaje permite a la Estación Base sincronizar periódicamente su hora con la de las Estaciones Suscriptoras. Se puede tomar como referencia un reloj de símbolo en el canal inalámbrico o bien un reloj ajustado al reloj de la red.

B.10. Mensaje de Finalización o Renovación de Registro (DREG-CMD)

El mensaje DREG-CMD es transmitido por la Estación Suscriptora para solicitar una modificación a su estado con relación al acceso a la red. Contiene un Código de Acción para ser considerado por la Estación Base y que corresponde a lo siguiente:

- La Estación Suscriptora abandonará el canal que usa actualmente e intentará emplear otro.
- La Estación Suscriptora continuará usando el canal actual pero no realizará transmisiones hasta no recibir el mensaje RES-CMD desde la Estación Base.
- La Estación Suscriptora continuará usando el canal actual sólo para transmitir en las Conexiones Básica, Primaria y Secundaria.
- La Estación Suscriptora regresará a su operación normal para la transmisión en cualquiera de sus Conexiones disponibles.

B.11. Mensaje de Recepción de DSx (DSX-RVD)

Cuando la Estación Base ha recibido cualquiera de los mensajes de solicitud de DSA, DSC o DSD, y es necesario realizar las funciones de Autenticación, envía a la Estación Suscriptora solicitante una confirmación de recepción del mensaje, previa al envío de DSx-RSP.

B.12. Mensajes de Finalización y Respuesta de Configuración de Archivo TFTP (TFTP-CPLT, TFTP-RSP)

Una vez que la Estación Suscriptora ha terminado de recibir su archivo de configuración desde el servidor correspondiente, informa de ello a la Estación Base a través del mensaje TFTP-CPLT. A su vez, la BS confirma la recepción mediante el mensaje de respuesta TFTP-RSP.

Apéndice C

Porciones de código de modelos OPNET

C.1. Generación del paquete Mapa en la BS

```

/*****
*
* MAP_Time (enter)
*
* The time has arrived to create the next MAP
*
* Revision History
* Dec 3, 1996 - Mil3 * Initial Development
* Nov 14, 1997 - Mil3 * Rewrote
* Mar 30, 1998 - MIL 3 * Merged request_list and ack_request_list
    into one list: request_list
    Rewrote the part where the IEs were generated
    Added the "req_arrive_time" field in requests.
* Apr 01, 1998 - MIL 3 * Combined IE lists ie_lst_request and
    ie_lst_req_data into one list ie_lst_req_data
* Apr 08, 1998 - MIL 3 * Added statistics for MAPs
* Apr 15, 1998 - MIL 3 * Modified the last_ack_time
* May 17, 1998 - MIL3 * Updated for priorities
* Jn 17, 1998 - MIL3 * Added switch for Bay Networks scheduler
*****/

int zero_slots, cont_slots, ug_slots, rtp_slots,
    be_slots, pad_slots, map_slots;

//printf("-- ***** \n Sending Map now \n\n");

if (op_prg odb_ltrace active("state_track"))
    printf("\t\t BS STATE: ENTER - MAP_Time\n");

ie_list_clean();
ld_ptr = lev_init (request_list, num_priorities + noCIR_lists, map_end_time,

```

```

        bs_max_map_ies, bs_max_map_slots, bs_max_map_grant_time,
        (Fixed_Frame_On) ? Fixed_Frame_Duration : 0.0);

switch (scheduler_algorithm)
{
    case CSF_BAY:
        {
            bay_scheduler (ld_ptr);
        }
        break;
    case CSF_BROADCOM:
        {
            op_sim_end ("Requested scheduler not available", "", "", "");
        }
        break;
    case CSF_DEFAULT:
        default:
        {
            map_slots = lev_time_to_slots (Fixed_Frame_Duration);
            max_slots_in_map = map_slots;
            // ld_ptr->max_slots should be equal to map_slots in IEEE 802.16
            //printf("ld_ptr->max_slots %d, map_slot %d \n", ld_ptr->max_slots,
map_slots);

            //ld_ptr->max_slots = map_slots;
            //printf("ld_ptr->max_slots %d, map_slot %d \n", ld_ptr->max_slots,
map_slots);

            zero_slots = ld_ptr->num_slots;
            if (zero_slots != 0)
            {
                printf ("--> BS error, initial slots not zero but %d\n",
                    op_sim_time(), zero_slots);
            }
            // Modifiy the following Intruccion Jun 1, 2004
            lev_ie_request_prim (ld_ptr, CM_BROADCAST_SID, contention_slots);

            cont_slots = ld_ptr->num_slots - zero_slots;
            zero_slots = ld_ptr->num_slots;

            if (!lev_complete(ld_ptr, OPC_FALSE))
            {
                if (Use_EDF_Scheduling == 1)
                    lev_UG_with_EDF_grant(ld_ptr);
                else
                    lev_UG_grant(ld_ptr);
            }
            else
                printf ("%f: WARNING!! BS MAP full after contention (%s)\n",
                    op_sim_time(), lev_complete_cause(ld_ptr, OPC_FALSE));

            ug_slots = ld_ptr->num_slots - zero_slots;
            zero_slots = ld_ptr->num_slots;

            if (!lev_complete(ld_ptr, OPC_FALSE))
                lev_RTP_grant (ld_ptr);
            else
                printf ("%f: WARNING!! BS MAP full after US Grant (%s)\n",
                    op_sim_time(), lev_complete_cause(ld_ptr, OPC_FALSE));

            rtp_slots = ld_ptr->num_slots - zero_slots;
            zero_slots = ld_ptr->num_slots;

            if (!lev_complete(ld_ptr, OPC_FALSE))
                lev_best_effort_grant (ld_ptr);
            else
                printf ("%f: WARNING!! BS MAP full after RTP Polls (%s)\n",
                    op_sim_time(), lev_complete_cause(ld_ptr, OPC_FALSE));

            be_slots = ld_ptr->num_slots - zero_slots;
            zero_slots = ld_ptr->num_slots;

```

```

        pad_slots = 0;

        //The following instructions has been changed to include pad_slots as
contention slots in IEEE 802.16
        //UNAM: Jun 1, 2004, VRL

        /*
        if (Fixed_Frame_On)
        {
            int ff_slots, ds;
            ff_slots = lev_time_to_slots (Fixed_Frame_Duration);
            ds = ff_slots - ld_ptr->num_slots;
            if (ds > 0)
            {
                pad_slots = ds;
                lev_ie_request_prim (ld_ptr, CM_BROADCAST_SID, ds);
            }
        }
        */
        if (Fixed_Frame_On)
        {
            int ff_slots, ds;
            ff_slots = lev_time_to_slots (Fixed_Frame_Duration);
            ds = ff_slots - ld_ptr->num_slots;
            if (ds > 0)
            {
                pad_slots = ds;
                lev_ie_request_prim (ld_ptr, CM_BROADCAST_SID, ds);
            }
        }

        total_contention_slots = total_contention_slots + cont_slots +
pad_slots;

    }

    if (!lev_valid(ld_ptr))
    {
        printf ("Error in MAP! Invalid LEV DATA structure\n");
    }

    acd_log (OPC_NIL, "BS MAP { size %d, cont_slots %d, ug_slots %d, "
        "rt_slots %d, be_slots %d, pad_slots %d }\n",
        map_slots, cont_slots, ug_slots, rtp_slots,
        be_slots, pad_slots);

    MAP_ctr++;
    if (PRINT_MAPS || op_prg_odb_ltrace_active("MAP") )
        printf ( "BS MAP No. %d { size %d, MAP_Sart %-12.9f, MAP_End %f, cont_slots %d,
ug_slots %d, "
            "rt_slots %d, be_slots %d, pad_slots %d at %-12.9f}\n",
            MAP_ctr, map_slots, ld_ptr->map_start_time, ld_ptr->map_time, cont_slots, ug_slots,
rtp_slots,
            be_slots, pad_slots, op_sim_time());

    if (op_prg_odb_ltrace_active("pk_snd"))
    {
        printf ("BS MAP { size %d, cont_slots %d, ug_slots %d, "
            "rt_slots %d, be_slots %d, pad_slots %d, at %f }\n",
            map_slots, cont_slots, ug_slots, rtp_slots,
            be_slots, pad_slots, op_sim_time());
    }
}

```

```

lev_stats_write(ld_ptr);

if (last_map_time != 0.0)
{
    op_stat_write (time_between_maps_shandle,
                  time_now - last_map_time);
}
last_map_time = time_now;
last_ack_time = ld_ptr->last_ack;

map_pk_ptr = op_pk_create_fmt (BS_MAP_PK_FMT);
op_pk_nfd_set (map_pk_ptr, "Allocation Start Time", ld_ptr->map_start_time);
op_pk_nfd_set (map_pk_ptr, "ACK Time", ld_ptr->last_ack);
op_pk_nfd_set (map_pk_ptr, "Information Elements", ld_ptr->map_time);

op_pk_nfd_set (map_pk_ptr, "UCD_count", config_change_count);

op_pk_nfd_set (map_pk_ptr, "data_backoff_start", data_backoff_start);
op_pk_nfd_set (map_pk_ptr, "data_backoff_end", data_backoff_end);
op_pk_nfd_set (map_pk_ptr, "total_contention_slots", cont_slots+pad_slots);

total_reserved_slots = total_reserved_slots + be_slots + ug_slots + rtp_slots;
total_slots = total_slots + map_slots;
pk_size = BASE_MAP_SIZE + (IE_SIZE * ld_ptr->num_ies);

op_pk_total_size_set (map_pk_ptr, pk_size);

if (op_prg_oddb_ltrace_active("MAP"))
{
    write_bs_map( ld_ptr->map_start_time, ld_ptr->map_time, ld_ptr->last_ack);
    printf("MAP Size: pk_size(BASE_MAP+IEs) = %d, BASE_MAP_SIZE %d, ld_ptr->num_ies %d,
MAC_Header_Base_sz %d \n ",
          pk_size, BASE_MAP_SIZE, ld_ptr->num_ies, MAC_Header_Base_sz);
}

lev_delete(ld_ptr);

/*****
* Create MAC header
*****/
hdr_ptr = op_pk_create_fmt (BS_MNG_MAC_HD_FMT);
hdr_size = MAC_Header_Base_sz;
op_pk_total_size_set (hdr_ptr, 8*hdr_size);

if (op_prg_oddb_ltrace_active("he_pk_snd1"))
{
    //printf("\t BS sending message of type %s, size %d at %lf\n",
    //      BS_MAP_PK_FMT, op_pk_total_size_get (map_pk_ptr), time_now);
    printf("\t BS MAP { size %d, cont_slots %d, ug_slots %d, rt_slots %d, be_slots %d, pad_slots
%d, total_contention_slots %d }\n",
          map_slots, cont_slots, ug_slots, rtp_slots, be_slots,
          pad_slots, total_contention_slots);
}

encap_pkt (map_pk_ptr, hdr_ptr, CM_BROADCAST_ADDR, BS_MSG_TYPE_MAP);

/*****
* Schedule next MAP
*****/
++map_seq;
schedule_next_map();

//printf("-- Map sent at time %f \n **** \n", time_now);
//printf("-- \t **** Packets = %d , Requests = %d \n\n", packets_received, requests_received);

```



```

op_ima_sim_attr_get(OPC_IMA_DOUBLE, "Do", &Do);
op_ima_sim_attr_get(OPC_IMA_DOUBLE, "ht", &ht);
op_ima_sim_attr_get(OPC_IMA_DOUBLE, "hr", &hr);
op_ima_sim_attr_get(OPC_IMA_INTEGER, "Category",&Category);
op_ima_sim_attr_get(OPC_IMA_DOUBLE, "ABC_a", &ABC_a);
op_ima_sim_attr_get(OPC_IMA_DOUBLE, "ABC_b", &ABC_b);
op_ima_sim_attr_get(OPC_IMA_DOUBLE, "ABC_c", &ABC_c);
op_ima_sim_attr_get(OPC_IMA_DOUBLE, "Sf_Media",&Media);
op_ima_sim_attr_get(OPC_IMA_DOUBLE, "Sf_Dstd", &Dstd);

txch_count = op_topo_object_count (OPC_OBJTYPE_RATX);
/* Loop through the channels and abort the transmission. */
for (i = 0; i < txch_count; i++)
{
    ch_id = op_topo_object (OPC_OBJTYPE_RATX, i);
    //printf ("ch_id %d \n", ch_id);
    /* Get object ID of this module and its parent's node name. */
    parent_id = op25_topo_parent (ch_id);
    op_ima_obj_attr_get (parent_id, "name", child_node_name);
    if (strcmp(child_node_name, parent_node_name)==0) //The ch_object makes reference
to_link_channel model, so we can change the power.
    {
        op_ima_obj_attr_get (parent_id, "x position", &node_x_position);
        op_ima_obj_attr_get (parent_id, "y position", &node_y_position);
        //Get the SS's Distance to the BS and set the Minimum Tx Power
        ss_distance = 1000*sqrt (pow(node_x_position-bs_x_position,2)+pow(node_y_position-
bs_y_position,2));
        printf ("node_name %s, sid %d x_pos = %f, y_pos = %f, bs (%f, %f), D = %f )
\n",
                parent_node_name, station_SID, node_x_position, node_y_position,
bs_x_position, bs_y_position, ss_distance);

        /***** This is the Propagation Model *****/
        /*****
        *****/
        //op_ima_obj_attr_get (ch_id, "channel [0].min frequency", &ss_frequency);
        op_ima_obj_attr_get (parent_id, "to_link_tx.channel [0].min frequency",
&ss_frequency);

        ss_frequency = ss_frequency*1000000;
        //op_ima_obj_attr_get (ch_id, "channel [0].bandwidth", &ss_bandwidth);
        op_ima_obj_attr_get (parent_id, "to_link_tx.channel [0].bandwidth",
&ss_bandwidth);

        ss_bandwidth = ss_bandwidth*1000;
        ss_frequency = ss_frequency + ss_bandwidth/2; //this is the central frequency
used to get lamda

        op_ima_obj_attr_get (parent_id, "from_link_rx.noise figure", &bs_noise_figure);
//The noise figure is the same for ss and bs
        op_ima_obj_attr_get (parent_id, "power", &ss_tx_power);

        lamda = 300000000/(ss_frequency);
        ss_Lp = 20*log10(lamda/(4*3.14159264945*ss_distance)); //in [db]
        op_ima_sim_attr_get(OPC_IMA_INTEGER, "SS_Antenna_Gain", &SS_Antenna_Gain);
        op_ima_sim_attr_get(OPC_IMA_INTEGER, "BS_Antenna_Gain", &BS_Antenna_Gain);
        //op_ima_obj_attr_get (ch_id, "channel [0].power", &ss_tx_power);

        //printf("ss_tx_power1 %f, ss_tx_power %f \n", ss_tx_power1, ss_tx_power);
        // the BS allways Tx at Maximum Power set to 1W.
        bs_rx_power = 10*log10(ss_tx_power) + SS_Antenna_Gain + BS_Antenna_Gain +
ss_Lp; //in [dB]

        env_noise = ss_bandwidth*pow(10,-26);
        ss_termal_noise = 10*log10(290*bs_noise_figure*ss_bandwidth*1.379*pow(10,-23));
        bs_snr = bs_rx_power - 10*log10(env_noise + ss_termal_noise);
        bs_ef_snr = bs_snr +bs_proc_gain;

        /*****
        *****/

```

```

//UNAM: A new prop models is used: It takes into account the pathloss of a
medium terrain field CAT B
// ( Hilly/lighth-tree density or Flat /Moderate-to-heavy tree density) and
// compensates the frequency and the heigth of the Tx and Rx antennas. It also
considers shadow fading.
//path_loss = (lambda * lambda) / (SIXTEEN_PI_SQ * prop_distance *
prop_distance);

A = 20*log10((4*3.14159264945*Do/lamda)); // PL in free space
Cf = 6*log10(ss_frequency/2000000000);
if (Category < 2)
    Ch = -10.7*log10(ht/2); //for Cat A and B
else
    Ch = -20*log10(ht/2); //for Cat C
n = (ABC_a-ABC_b*hr+ABC_c/hr);
PL_D = A + 10*n*log10(ss_distance/Do)+Cf+Ch;
z = gaussrand();
S_fading = Media + z*Dstd;
shadow_fading_for_station[station_address] = S_fading;
path_loss = PL_D + S_fading;

printf("lamda %f, freq %f, A %f, Cf %f, Ch %f, n %f, PL(Cf+Ch) %f, S_f %f, z
%f, PL(Cf+Ch+s) %f, PL_D %f, D %f m, T_Noise %f dB \n",
        lamda,ss_frequency, A, Cf, Ch, n, PL_D, S_fading, z,
path_loss, PL_D, ss_distance, ss_termal_noise );

printf("station_SID %d, ss_frequency %f ss_bandwidth %f bs_noise_figure %f
SS_Antenna_Gain %d BS_Antenna_Gain %d lamda %f path_loss %f \n",
        station_SID, ss_frequency, ss_bandwidth, bs_noise_figure,
SS_Antenna_Gain, BS_Antenna_Gain, lamda, path_loss );

//printf("station_SID %d,          ss_tx_power %f, bs_rx_power          %f env_noise %e
ss_termal_noise %e dB bs_snr %f, bs_ef_snr %f \n",
//          station_SID, ss_tx_power, bs_rx_power, env_noise,
ss_termal_noise, bs_snr, bs_ef_snr );

//Get the min SS Tx power based on min theshold value for SNR
//SNR_min = 10.9 + 3 - bs_proc_gain; //The value of 10.9 dB is used to get a
BER below 1E-6

SNR_min = 12; //dB as in IEEE 802.16a-2003 pp 284
Pr_dB = SNR_min + ss_termal_noise;
SS_min_Tx_power_dB = Pr_dB - SS_Antenna_Gain - BS_Antenna_Gain + path_loss;

SS_min_Tx_power = pow(10, (double)SS_min_Tx_power_dB/10);

printf("station SID %d, SNR_min %f, Pr_dB %f, SS_min Tx power %e,
SS_min_Tx_power_dB %f, Gt %d dB, Gr %ddb, path_loss %f dB, parent_id %d, ch_id %d \n",
        station_SID, SNR_min, Pr_dB, SS_min_Tx_power,
SS_min_Tx_power_dB, SS_Antenna_Gain, BS_Antenna_Gain, path_loss, parent_id, ch_id);

op_ima_obj_attr_set (parent_id, "power", SS_min_Tx_power);
op_ima_obj_attr_set (ch_id, "channel [0].power", SS_min_Tx_power);

}
}
FOUT;
}

double gaussrand()
{
    static double V2, fac;
    static int phase = 0;
    double S, Z, U1, U2, V1, V3, V4, V5;

    FIN (gaussrand ());
}

```

```
if (phase)
  Z = V2 * fac;
else
  {
  do {

      U1 = (double)rand() / RAND_MAX;
      U2 = (double)rand() / RAND_MAX;
      V3 = RAND_MAX;
      V4 = (double)rand();
      V5 = (double)rand();
      V1 = 2 * U1 - 1;
      V2 = 2 * U2 - 1;
      S = V1 * V1 + V2 * V2;
    } while(S >= 1);

    fac = sqrt (-2 * log(S) / S);
    Z = V1 * fac;
  }

phase = 1 - phase;

FRET (Z);
}
```