



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

Análisis Dinámico de la Movilidad en Redes WiMAX

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES
PRESENTA:

DANIEL CADENA GONZÁLEZ DE LA VEGA

Director de tesis: Dr. VÍCTOR RANGEL LICEA

México, D.F.

Mayo 2009

Este trabajo es la culminación de casi veinte años de estudio que han sido posibles gracias al apoyo y cariño de mis
padres Eduardo y María Cecilia

AGRADECIMIENTOS

A mis hermanos, Arturo y Betty, por su apoyo y comprensión durante todos estos años

A mi abuelita Eva, qepd, y a mi tía Lulú por haber estado siempre conmigo, acompañándome y brindándome su cariño

A mi novia Claudia Aidé por inspirarme a ser mejor cada día

A Oscar O. por haber despertado en mi el interés por esta apasionante área

A todos mis amigos, en especial a Alberto y Gerardo, por sus consejos y amistad

Al Dr. Rangel, por abrirme las puertas al laboratorio de redes y por todo el apoyo que me dio durante el desarrollo del presente trabajo

A los profesores de licenciatura Oleksandr Martynyuk, Roberto Mandujano, Gloria Mata y Enrique Arenas porque dejaron una huella en mí

A mis sinodales: Jesús Reyes, Víctor Garduño, Miguel Moctezuma y Javier Castellanos, por el tiempo que dedicaron a la revisión de este trabajo

A la DGAPA por el apoyo recibido a través de los proyectos PAPIIT IN 104907 y PAPIME PE 103807

A la FLAG, por el invaluable apoyo brindado para culminar mis estudios profesionales, y a la Sra. Julienne Gallardo, por escucharme, aconsejarme y por abrirme las puertas a la Fundación

A la Facultad de Ingeniería y a la Universidad Nacional Autónoma de México, por darme la oportunidad de ser parte de la universidad más importante de América Latina

ÍNDICE	I
LISTA DE FIGURAS	III
LISTA DE TABLAS	V
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	2
1.2 OBJETIVOS	2
1.3 ESTRUCTURA DE LA TESIS	3
2. WIMAX MÓVIL	4
2.1 INTRODUCCIÓN	4
2.2 ESTRUCTURA BÁSICA DE WIMAX MÓVIL	9
2.3 CAPA FÍSICA	10
2.4 CAPA MAC	12
2.5 CONCLUSIONES	15
3. MOVILIDAD	17
3.1 ARQUITECTURA DE RED	17
3.2 HANDOVER	21
3.2.1 <i>Tipos de Handover</i>	22
3.2.2 <i>HO en capa de enlace</i>	23
3.2.2.1 Adquisición de la Topología de Red	24
3.2.2.2 Proceso de HO	25
3.2.2.3 Reingreso a la red	27
3.2.3 <i>HO en capa de red</i>	30
3.3 CONCLUSIONES	34
4. OPNET Y SU MODELO WIMAX	36
4.1 OPNET MODELER	36
4.2 DESCRIPCIÓN DEL MODELO WIMAX	37
4.3 HO EN EL MODELO WIMAX	41
4.4 CONCLUSIONES	44
5. ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO 4G DINÁMICO	46
5.1 DESCRIPCIÓN DE LAS SIMULACIONES	46
5.2 DESCRIPCIÓN DE LOS ESCENARIOS	46
5.3 DESCRIPCIÓN DEL TRÁFICO	52
5.4 DESCRIPCIÓN DE LOS PARÁMETROS DE MEDICIÓN	53
5.5 RESULTADOS DEL ESCENARIO SIMPLE	54
5.6 COMPARACIÓN ENTRE EL MODELO DE SIMULACIÓN Y EL ESTÁNDAR IEEE 802.16E	61
5.7 RESULTADOS DEL ESCENARIO “REALISTA”	68
5.8 CONCLUSIONES	72
6. CONCLUSIONES	74
TRABAJOS A SEGUIR	75
REFERENCIAS	77
APÉNDICE	79

ACRÓNIMOS..... 79
MODELOS DE PÉRDIDAS DE PROPAGACIÓN..... 83

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2-1. ARQUITECTURA DE WIMAX EN LA CAPA FÍSICA Y MAC	9
FIGURA 2-2. EFECTO DEL CP SOBRE LA ISI	11
FIGURA 2-3. ESTRUCTURA OFDM DE UNA TRAMA WIMAX MAC EN TDD	13
FIGURA 3-1. NETWORK REFERENCE MODEL	18
FIGURA 3-2. TOPOLOGÍAS TÍPICAS EN REDES WIMAX.....	21
FIGURA 3-3. INTERCAMBIO DE MENSAJES DURANTE EL L2-HO	26
FIGURA 3-4. PROCESO DE REINGRESO A LA RED.....	27
FIGURA 3-5. FMIP EN MODO PREDICTIVO Y REACTIVO	34
FIGURA 4-1. ESTRUCTURA DE UNA BS EN EL MODELO	39
FIGURA 4-2. ESTRUCTURA DE UN MS EN EL MODELO.....	40
FIGURA 4-3. IMPLEMENTACIÓN DE MIP EN EL MODELO.....	43
FIGURA 5-1. ESCENARIO DE SIMULACIÓN SIMPLE PARA EL ANÁLISIS DEL PROCESO DE HO	47
FIGURA 5-2. ESCENARIO DE SIMULACIÓN REALISTA PARA EL ANÁLISIS DEL PROCESO DE HO	47
FIGURA 5-3. SNR CONTRA DISTANCIA PARA EL MODELO DE PROPAGACIÓN VEHICULAR EN EL PRIMER ESCENARIO	51
FIGURA 5-4. ENCAPSULAMIENTO DEL MENSAJE DE VOZ PARA EL ESCENARIO SIMPLE.	53
FIGURA 5-5. ENCAPSULAMIENTO DEL MENSAJE DE VOZ PARA EL ESCENARIO “REALISTA”.	53
FIGURA 5-6. TRÁFICO QUE ENVÍA MS_1_1, QUE RECIBE BS_RED Y QUE RECIBE BS_BLUE EN EL ESCENARIO SIMPLE BAJO UGS.....	55
FIGURA 5-7. TRÁFICO QUE RECIBE MS_1_1, QUE ENVÍA BS_RED Y QUE ENVÍA BS_BLUE EN EL ESCENARIO SIMPLE BAJO UGS	55
FIGURA 5-8. MODO DE ESCANEADO DE MS_1_1 EN EL ESCENARIO SIMPLE BAJO UGS.	56
FIGURA 5-9. TRÁFICO TOTAL ENVIADO Y RECIBIDO POR LAS CAPAS WIMAX MAC EN EL ESCENARIO SIMPLE BAJO UGS.	56
FIGURA 5-10. TRÁFICO DESECHADO POR BS_RED EN EL ESCENARIO SIMPLE BAJO UGS.	57
FIGURA 5-11. LATENCIA DE LOS PAQUETES DE VOZ EN EL ESCENARIO SIMPLE BAJO UGS	57
FIGURA 5-12. LATENCIA DE LOS PAQUETES DE VOZ EN EL ESCENARIO SIMPLE BAJO BE CON COLISIONES.....	58
FIGURA 5-13. TAMAÑO PROMEDIO DE LA COLA DE MS_1_1 Y TRÁFICO DESECHADO POR LA CAPA WIMAX MAC DE MS_1_1 EN EL ESCENARIO SIMPLE BAJO BE CON COLISIONES.....	58
FIGURA 5-14. RETARDO ACUMULADO MEDIDO EN OPORTUNIDADES DE TRANSMISIÓN DE LA REGIÓN DE CONTENCIÓN DEL ALGORITMO BACKOFF EXPONENCIAL CON UN MÁXIMO DE 16 COLISIONES, TRUNCAMIENTO A LAS 10 COLISIONES Y CONSIDERANDO EL RETARDO MEDIO EN CADA INTERVALO	59
FIGURA 5-15. LATENCIA DE LOS PAQUETES DE VOZ EN EL ESCENARIO SIMPLE BAJO BE SIN COLISIONES.	60
FIGURA 5-16. TAMAÑO PROMEDIO DE LA COLA DE MS_1_1 EN EL ESCENARIO SIMPLE BAJO BE SIN COLISIONES.	60
FIGURA 5-17. TRÁFICO QUE ENVÍA MS_1_1, QUE RECIBE BS_RED Y BS_BLUE EN EL ESCENARIO BAJO BE SIMPLE SIN COLISIONES.....	60
FIGURA 5-18. TRÁFICO QUE RECIBE MS_1_1, QUE ENVÍA BS_RED Y QUE ENVÍA BS_BLUE EN EL ESCENARIO SIMPLE BAJO BE SIN COLISIONES.....	60
FIGURA 5-19. INTERCAMBIO DE MENSAJES DURANTE EL L2-HO	62
FIGURA 5-20. INTERCAMBIO DE MENSAJES DURANTE EL L3-HO	64
FIGURA 5-21. PROCESO DE REINGRESO A LA RED QUE DEBERÍA HACER EL MODELO	67
FIGURA 5-22. TRÁFICO DESECHADO POR LA CAPA FÍSICA PARA UL Y DL , TRÁFICO DESECHADO POR LA CAPA MAC BAJO BE EN EL ESCENARIO REALISTA CON 8 CÓDIGOS CDMA Y UN SLOT.	68
FIGURA 5-23. TRÁFICO TOTAL DESECHADO, THROUGHPUT GLOBAL DE NODOS WIMAX BAJO BE EN EL ESCENARIO REALISTA, CON 8 CÓDIGOS CDMA Y UN SLOT.	68
FIGURA 5-24. LATENCIA DE LOS PAQUETES DE VOZ Y DE LAS TRAMAS WIMAX BAJO BE EN EL ESCENARIO REALISTA, CON 8 CÓDIGOS CDMA Y 1 SLOT.....	69
FIGURA 5-25. JITTER DE LOS PAQUETES DE VOZ BAJO BE EN EL ESCENARIO REALISTA, CON 8 CÓDIGOS CDMA Y 1 SLOT.	69
FIGURA 5-26. LATENCIA DE TODOS LOS L2-HO BAJO BE EN EL ESCENARIO REALISTA, CON 8 CÓDIGOS CDMA Y UN SLOT.....	70
FIGURA 5-27. PROBABILIDAD DE COLISIÓN EN FUNCIÓN DEL NÚMERO DE USUARIOS.....	70
FIGURA 5-28. TRÁFICO DESECHADO POR LA CAPA FÍSICA PARA UL Y DL , TRÁFICO DESECHADO POR LA CAPA MAC BAJO UGS EN EL ESCENARIO REALISTA.....	71
FIGURA 5-29. TRÁFICO TOTAL DESECHADO, THROUGHPUT GLOBAL DE NODOS WIMAX BAJO UGS EN EL ESCENARIO REALISTA.....	71
FIGURA 5-30. LATENCIA DE LOS PAQUETES DE VOZ Y DE LAS TRAMAS WIMAX BAJO UGS EN EL ESCENARIO REALISTA.....	72

FIGURA 5-31. JITTER DE LOS PAQUETES DE VOZ BAJO UGS EN EL ESCENARIO REALISTA,	72
FIGURA 5-32. LATENCIA DE TODOS LOS L2-HO EN LA SIMULACIÓN BAJO UGS EN EL ESCENARIO REALISTA.	72

LISTA DE TABLAS

TABLA 2-1. PERFILES DE CERTIFICACIÓN PARA WIMAX MÓVIL	5
TABLA 2-2. TIPOS DE ACCESO EN UNA RED WIMAX	6
TABLA 2-3. CARACTERÍSTICAS IMPORTANTES EN LAS VERSIONES FIJA Y MÓVIL DE WIMAX	7
TABLA 2-4. PARÁMETROS UTILIZADOS PARA OBTENER LAS TASAS DE TRANSMISIÓN DE LA TABLA 2-4	8
TABLA 2-5. TASAS DE TRANSMISIÓN EN WIMAX MÓVIL	8
TABLA 2-6. TIPOS DE MODULACIÓN Y CODIFICACIÓN DE CANAL EN WIMAX MÓVIL	12
TABLA 2-7. ELEMENTOS DE UNA TRAMA WIMAX MAC	13
TABLA 2-8. TIPOS DE FLUJOS DE SERVICIO EN EL ESTÁNDAR IEEE 802.16E	14
TABLA 2-9. TIPOS DE CID EN EL ESTÁNDAR IEEE 802.16E	14
TABLA 2-10. TIPOS DE QoS EN EL ESTÁNDAR IEEE 802.16E	15
TABLA 3-1 FUNCIONES DE LAS ENTIDADES FUNCIONALES DEL NRM	19
TABLA 3-2. PUNTOS DE REFERENCIA	20
TABLA 3-3. OPERACIÓN DE MIP	32
TABLA 4-1. DESCRIPCIÓN DE LOS EDITORES DE OPNET MODELER	37
TABLA 4-2. CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DEL MODELO WIMAX PARA OPNET MODELER	38
TABLA 4-3. PLANOS DE DATOS Y DE CONTROL	41
TABLA 4-4. CARACTERÍSTICAS DE LA IMPLEMENTACIÓN DEL HO	42
TABLA 5-1. PARÁMETROS PRINCIPALES DEL ESCENARIO	48
TABLA 5-2. SUPOSICIONES DE SNR	50
TABLA 5-3. CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DEL TRÁFICO DEL ESCENARIO SIMPLE	52
TABLA 5-4. INDICADORES DE LA OPERACIÓN DE LA RED	53
TABLA 5-5. ETAPAS DE REINGRESO A LA RED	65

CAPÍTULO 1

Introducción

En poco más de cien años las telecomunicaciones se han posicionado como uno de los factores clave en el desarrollo estratégico de las naciones. Han contribuido en gran medida en la integración de las sociedades alrededor del mundo, haciendo posible el intercambio de información en diferentes niveles: entre individuos, industrias y gobiernos. Las distancias ya no son una barrera. Los individuos pueden estar en contacto con otras culturas más que nunca. Las compañías multinacionales afianzan sus negocios gracias a que el desarrollo de sus proyectos se realiza por medio de cooperación y comunicación internacional entre sus sedes. La libertad de expresión ha alcanzado nuevos horizontes, la información está a un clic de distancia.

Viendo todos los beneficios es fácil entender por qué todo el mundo quiere estar conectado y por qué en los últimos años se ha visto un acelerado incremento en la demanda mundial de servicios de telecomunicaciones. Para comprobarlo basta ver las cifras de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico que indican que en 2005, 11.7 de cada 100 habitantes tenían acceso a Internet de banda ancha, y que tan sólo en dos años esta cifra llegó a 21.3, casi duplicándose. Además de la creciente demanda, lo que ha hecho posible semejante incremento ha sido la rentabilidad que han alcanzado tecnologías como DSL, cable y a los esquemas de tarificación.

Pero ya no es suficiente con estar comunicados, ahora queremos estarlo en todo momento y en cualquier lugar. Esta demanda ha motivado el desarrollo de tecnologías de acceso móviles, que complementan los servicios ofrecidos por las tecnologías de acceso fijo. En 2005 el número de suscriptores de telefonía móvil llegó a ser de 2.129 billones, y se espera que para finales del 2011 esta cifra llegue a aproximadamente 4 billones [28]. Los operadores fijos están al tanto de esta situación, y para no quedarse fuera están dispuestos a extender sus servicios con ayuda de la nueva generación de redes móviles.

Dicha generación representa un cambio radical en el paradigma de la estructura celular tradicional: en lugar de estar orientada a voz está orientada a datos. La arquitectura de las nuevas redes debe estar diseñada para operar con espectro limitado, tener soporte para operar con diferentes topologías y ser capaz de ofrecer servicios heterogéneos [10].

Worldwide Interoperability for Microwave Access (WiMAX) es una tecnología de acceso inalámbrico de banda ancha, basada en los estándares 802.16 del *Institute of Electrical and Electronic Engineers* (IEEE) y diseñada como una alternativa a las soluciones tradicionales de telefonía celular. Gracias a que su arquitectura de red está basada en *Internet Protocol* (IP) y protocolos estandarizados por la *Internet*

Engineering Task Force (IETF), puede soportar una gran variedad de servicios IP reduciendo gastos en capital y operativos.

1.1 Definición del problema

Investigaciones anteriores desarrolladas en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) utilizaron modelos de simulación desarrollados por la misma, que si bien cumplieron con el propósito de la investigación, resultaron ser demasiado particulares como para reutilizarlos fácilmente en proyectos enfocados a algún otro aspecto de la tecnología. Es más fácil partir de un modelo general y a partir de él modificar el aspecto que se esté investigando.

OPNET *Technologies* a través de un consorcio internacional ha desarrollado un modelo de WiMAX para OPNET *Modeler* pensado precisamente como una plataforma a partir de la cual se pueden investigar nuevas funcionalidades de WiMAX. Sin embargo, al querer utilizar el modelo uno se da cuenta que no hay un manual que explique cómo está estructurado.

Por otro lado, las investigaciones anteriores se centraron en los estándares IEEE 802.16, y no en WiMAX, es decir, sólo estudian las primeras dos capas del modelo OSI. Además, en los proyectos anteriores y en general, en casi ninguna publicación se explica el procedimiento seguido para el cálculo del enlace de radio, y el dimensionamiento de la red.

Pasando al punto medular, la movilidad es un requisito fundamental para las redes de siguiente generación, y uno de los factores más importantes para que se pueda llevar a cabo es un cambio de BS transparente al usuario. Uno de los más grandes retos en las redes orientadas a datos es que se requiere manejo de movilidad en capa de enlace y en capa de red. Y si se quieren soportar aplicaciones en tiempo real, el cambio debe ocurrir en un tiempo máximo de 150ms. A pesar de que ya se han desarrollado buenas soluciones a estos problemas, aún existen muchas oportunidades de mejorar su desempeño, por ejemplo, a través del diseño entre capas.

Para que la Facultad pueda hacer investigaciones en el área de movilidad basándose en el modelo de OPNET, es importante conocer detalladamente el estado actual del modelo en esta área y cuáles son sus limitaciones.

1.2 Objetivos

Para este estudio se utilizará el simulador OPNET *Modeler* en su versión 14. Esta herramienta permite modelar, simular y analizar cualquier tipo de red incluyendo una red WiMAX, y fue elegida porque cuenta con un modelo especializado de WiMAX que soporta a la versión fija y a la móvil. Entonces, los objetivos son:

- Generar una guía sobre la estructura lógica del modelo WiMAX de OPNET
- Escribir una referencia en español de la estructura básica de WiMAX móvil
- Describir el procedimiento seguido para calcular el enlace de radio y el diseño de la red
- Estudiar la movilidad en WiMAX hasta donde permita el modelo, incluyendo diferentes calidades de servicio, movilidad en capa de enlace y de red, múltiples usuarios desplazándose en trayectorias aleatorias y diferentes tipos de tráfico
- De encontrar alguna limitante en el modelo, indicar detalladamente qué se debe hacer para corregirla

Para evitar confusiones, la definición de todos los acrónimos utilizados se dará en inglés, y para que se identifiquen fácilmente se escriben en cursivas. En la lista de acrónimos se presenta el significado de cada uno junto con su traducción al español.

1.3 Estructura de la tesis

En el capítulo 2 se describe de forma general al estándar IEEE 802.16e, específicamente las características más importantes de la capa física y la capa MAC.

En el capítulo 3 se explica la arquitectura de red para WiMAX móvil, se explican los elementos que la componen y como se interconectan. También se explica a detalle el proceso de *handover* tanto en la capa de enlace como en capa de red.

En el capítulo 4 se presenta una breve introducción a OPNET *Modeler* y se explica la estructura lógica del modelo de WiMAX.

En el capítulo 5 se describen las simulaciones realizadas, se presentan los resultados obtenidos y se hace un análisis de estos.

En el capítulo 6 se presentan las conclusiones generales del estudio, las contribuciones y los pasos a seguir.

CAPÍTULO 2

WiMAX móvil

En los últimos años las redes inalámbricas de banda ancha se han multiplicado gracias a que solucionan las necesidades de conectividad tanto de usuarios comerciales como residenciales. Este tipo de redes son capaces de sustituir o complementar a las soluciones de última milla actuales, ya que: tienen un tiempo de ingreso al mercado y un costo total menor que el de las líneas arrendadas tradicionales; brindan flexibilidad para ofrecer el servicio ya que pueden operar con un ancho de banda dedicado o compartido; y por si fuera poco permiten utilizar la misma infraestructura para ofrecer servicios a comunidades urbanas y rurales. Pueden servir para interconectar sistemas de vigilancia y seguridad, que cubran desde hogares hasta ciudades enteras. Y también pueden ser utilizadas como redes de área metropolitana para cubrir, por ejemplo, ciudades universitarias o interconectar edificios que pertenezcan a una misma entidad.

En este capítulo se presenta *Worldwide Interoperability for Microwave Access* (WiMAX), una tecnología desarrollada para proporcionar acceso inalámbrico de banda ancha a usuarios fijos y móviles. Se da una breve introducción a la tecnología, y se describe a grandes rasgos su operación refiriéndola a las primeras dos capas del modelo OSI.

2.1 Introducción

WiMAX, Interoperabilidad Mundial para Acceso por Microondas, es una tecnología de acceso inalámbrico de banda ancha (BWA) metropolitano para usuarios fijos y móviles. Fue creado como una solución de última milla para competir con tecnologías como DSL y cable en lugares donde éstas estén disponibles; pero tiene la ventaja de poder brindar acceso en donde las otras no pueden. La versión móvil también puede competir con tecnologías como la telefonía celular y los servicios de datos de 3G. El término WiMAX prácticamente se ha vuelto sinónimo de IEEE 802.16, aunque no son lo mismo, ya que los estándares IEEE 802.16 sólo definen una parte de WiMAX. Esto es, la estructura del enlace entre la estación base y la estación móvil (interfaz aérea) está definida en los estándares 802.16 del IEEE y en *HiperMan* del *European Telecommunications Standards Institute* (ETSI). Los protocolos de señalización de capas superiores utilizados en el enlace aéreo, la arquitectura de red y todos los protocolos que están detrás de las *Base Stations* (BSs), requeridos para una especificación extremo a extremo, están definidos por grupos de trabajo del Foro WiMAX. Cabe mencionar que recientemente el estándar *HiperMAN* de la ETSI fue armonizado con los estándares IEEE 802.16, lo que asegura la interoperabilidad entre ambos.

El Foro WiMAX es una organización sin fines de lucro, formada por más de 522 miembros, que comprenden la mayor parte de los operadores y compañías de componentes y equipos que forman la industria de las telecomunicaciones, entre ellas están Intel, Motorola, Sprint Nextel, Nortel, Axtel, British Telecom y AT&T, por mencionar algunas. Sus objetivos son certificar y promover el uso de productos basados en los estándares 802.16 para acelerar la introducción de servicios BWA rentables al mercado. Además, el Foro trabaja en conjunto con proveedores de servicio, reguladores, fabricantes de equipo, fabricantes de equipos de prueba, laboratorios de certificación y proveedores de servicios, para asegurar que los equipos certificados por el Foro cumplan con los requerimientos de los clientes y de los gobiernos.

El Foro ha organizado varios grupos de trabajo para que se hagan cargo de las áreas críticas en la introducción de los productos certificados al mercado. Uno de ellos es el *Network Working Group* (NWG) que se encarga de crear las especificaciones más allá de lo que definen los estándares IEEE 802.16, es decir, a partir de la capa tres del modelo *Open Systems Interconnection* (OSI). Un punto importante es que la arquitectura de red está completamente basada en IP y que es capaz de garantizar calidades de servicio.

Tabla 2-1. Perfiles de certificación para WiMAX móvil [11].

Nombre del perfil	Banda de frecuencias (GHz)	Ancho de banda del canal (MHz)
1.A_2.3	2.3-2.4	8.75
1.B_2.3	2.3-2.4	5, 10
2.A_2.305	2.305-2.320, 2.345-2.360	3.5
2.B_2.305	2.305-2.320, 2.345-2.360	5
2.C_2.305	2.305-2.320, 2.345-2.360	10
3.A_2.496	2.496-2.69	5, 10
4.A_3.3	3.3-3.4	5
4.B_3.3	3.3-3.4	7
4.C_3.3	3.3-3.4	10
5.A_3.4	3.4-3.8	5
5L.A_3.4	3.4-3.6	5
5H.A_3.4	3.6-3.8	5
5.B_3.4	3.4-3.8	7
5L.B_3.4	3.4-3.6	7
5H.B_3.4	3.6-3.8	7
5.C_3.4	3.4-3.8	10
5L.C_3.4	3.4-3.6	10
5H.C_3.4	3.6-3.8	10

WiMAX es una tecnología versátil que puede operar bajo condiciones muy variadas, y para asegurar la interoperabilidad entre los equipos de los diferentes fabricantes y la creación de economías de escala, el

Foro ha definido perfiles de certificación. Los perfiles están definidos por la banda de frecuencias de operación (el estándar soporta hasta 66 GHz), el tipo de duplexaje (por tiempo o por frecuencia), el ancho de banda del canal (el estándar soporta desde 1.25 hasta 20 MHz) y la versión de WiMAX (fija o móvil). La creación de un perfil depende de factores tales como la demanda del mercado, la disponibilidad de espectro, el marco legal del espectro, los servicios a ofrecer y los intereses de los fabricantes. En la tabla 2-1 se muestran los perfiles de certificación para la versión móvil, todos los perfiles operan en TDD.

Para satisfacer los requerimientos de los distintos tipos de acceso, se han definido dos versiones de WiMAX. La primera se basa en el IEEE 802.16-2004 y puede proporcionar acceso fijo y nomádico; la segunda se basa en la enmienda IEEE 802.16e y está diseñada para soportar portabilidad y movilidad, aunque también soporta los accesos fijo y nomádico. En la tabla 2-2 se muestran los tipos de acceso que soporta WiMAX y sus requerimientos, en ella se puede observar que la versión móvil es soportada por más dispositivos que la fija. Esto significa que para la versión móvil los operadores pueden extender sus servicios a nuevos segmentos de mercado y darle una mayor libertad a sus suscriptores.

Tabla 2-2. Tipos de acceso en una red WiMAX [9].

Definición	Dispositivos	Posición / Velocidad	Handoff	802.16-2004	802.16e
Acceso fijo	CPEs interiores y exteriores	Única / Estacionaria	No	Sí	No
Acceso nomádico	CPEs interiores, tarjetas PCMCIA	Múltiple / Estacionaria	No	Sí	No
Portabilidad	Laptop con PCMCIA o mini tarjetas	Múltiple / Baja (caminando)	<i>Handoff</i> duros	No	Sí
Movilidad simple	Laptop con PCMCIA o mini tarjetas, PDAs o teléfonos inteligentes	Múltiple / Vehicular baja	<i>Handoff</i> Duros	No	Sí
Movilidad completa	Laptop con PCMCIA o mini tarjetas, PDAs o teléfonos inteligentes	Múltiple / Vehicular alta	<i>Handoff</i> suaves	No	Sí

Históricamente el primer estándar IEEE 802.16 estaba diseñado para operar en ambientes con *Line of Sight* (LOS), a altas frecuencias (10-66 GHz), utilizando modulación QAM con *single carrier*. Como sus prestaciones eran muy limitadas, el segmento de mercado que se podía favorecer de ellas era muy reducido, por lo que se le fueron agregando nuevas características a través de una serie de enmiendas al estándar original. Hasta la versión 802.16-2004, el estándar sólo soportaba acceso fijo y nomádico, es decir, no tenía soporte para movilidad. La enmienda 802.16e agregó soporte para movilidad completa e introdujo dimensiones variables en el tamaño de la FFT en OFDMA. En la tabla 2-3 se presentan las características más importantes de ambas versiones.

Tabla 2-3. Características importantes en las versiones fija y móvil de WiMAX.

	Fijo 802.16-2004	Móvil 802.16e
Radio típico de celdas	7 – 12 km	1 – 3 km
Topologías de red soportadas	Punto-Multipunto, Punto-Punto, enmallada	Punto-Multipunto
Condiciones del canal	LOS, OLOS, NLOS	LOS, OLOS, NLOS
Técnica de multiplexado	256 OFDM, 2048 OFDMA	S-OFDMA (128 – 2048)
Modulación	Adaptiva (BPSK, QPSK, 16QAM, 64QAM)	Adaptiva (QPSK, 16QAM, 64QAM)
Codificación de fuente	Adaptiva (RS-CC)	Adaptiva (CC, CTC, LDPC)
Tipo de duplexado	TDD, FDD	TDD
Antenas inteligentes	AAS, STC, SM	AAS, STC, SM
Servicio de gestión del enlace	ARQ	HARQ
QoS	UGS, rtPS, nrtPS, BE	UGS, rtPS, ertPS, nrtPS, BE
Seguridad	Triple DES	PKMv2, IETF EAP, AES-CCM
Gestión de la movilidad	Sin soporte	Soporte obligatorio de handover (duro, suave opcional)
Tipo de banda de frecuencias	Con licencia, libres (ISM)	Con licencia

La versión fija soporta una topología de red enmallada (*mesh*) además de la tradicional Punto-Multipunto (PMP). En PMP el tráfico sólo circula de las BSs a las *mobile stations* (MSs) y viceversa. En el modo *mesh* las MSs se pueden comunicar entre sí, ya sea para intercambiar información o para extender el alcance de una BS. La principal ventaja de la topología *mesh* es que no requiere de un enlace directo entre las MSs y las BSs, por lo que este tipo de redes pueden crecer sin necesidad de incurrir en grandes costos de despliegue.

Para que el lector tenga una mejor idea de la capacidad de transmisión de los sistemas WiMAX, en la tabla 2-5 se presentan las tasas de transmisión teóricas que se pueden llegar a obtener en un sistema WiMAX móvil, bajo diferentes esquemas de modulación y codificación. Para obtener los datos se utilizan los parámetros mostrados en la tabla 2-4, y para obtener las tasas de transmisión presentadas en la tabla 5-5 se utiliza:

$$R_{tx} = \frac{N_{utilizados}}{T_s} \cdot E \cdot R_{cc} \cdot \frac{OFDM_{datos}}{OFDM_{total}}$$

donde R_{tx} es la tasa de transmisión (bps), $N_{utilizados}$ es el número de sub-portadoras de datos, T_s es la duración de un símbolo (segundos), E es la eficiencia de la modulación (bits/símbolo), R_{cc} es la tasa de

codificación de canal, $OFDM_{\text{datos}}$ es el número de símbolos OFDM destinados a transmitir datos y $OFDM_{\text{total}}$ es el número de símbolos OFDM por trama, y:

$$T_s = \left(\frac{1}{BW \cdot n} \right) \cdot N_{FFT} \cdot (1 + T_g)$$

donde BW es el ancho de banda del sistema, n es el factor de muestreo, N_{FFT} es el tamaño FFT y T_g es la duración del tiempo de guarda (segundos).

Tabla 2-4. Parámetros utilizados para obtener las tasas de transmisión de la tabla 2-5.

Parámetro	DL	UL	DL	UL
Ancho de banda del sistema	5 MHz		10 MHz	
Tamaño FFT	512		1024	
Sub-portadoras nulas	92	104	184	184
Sub-potadoras piloto	60	136	120	280
Sub-portadoras de datos	360	272	720	560
Sub-canales	15	17	30	35
Duración de un símbolo	102.9 μ s			
Duración de la trama	5 ms			
Símbolos OFDM por trama	48			
Símbolos OFDM de datos	44			

Tabla 2-5. Tasas de transmisión en WiMAX móvil.

Modulación	Tasa de codificación	Canal de 5 MHz		Canal de 10 MHz	
		Tasa de transmisión en el canal DL (Mbps)	Tasa de transmisión en el canal UL (Mbps)	Tasa de transmisión en el canal DL (Mbps)	Tasa de transmisión en el canal UL (Mbps)
QPSK	1/2 CTC, 6x	0.53	0.40	1.06	0.83
	1/2 CTC, 4x	0.80	0.60	1.60	1.24
	1/2 CTC, 2x	1.60	1.21	3.20	12.49
	1/2 CTC, 1x	3.20	2.42	6.41	4.98
	3/4 CTC	4.81	3.63	9.62	7.48
16-QAM	1/2 CTC	6.41	4.84	12.82	9.97
	3/4 CTC	9.62	7.26	19.24	14.96
64-QAM	1/2 CTC	9.62	7.26	19.24	14.96
	2/3 CTC	12.82	9.69	25.65	19.95
	3/4 CTC	14.43	10.90	28.86	22.44
	5/6 CTC	16.03	12.11	32.07	24.94

En la siguiente sección se presenta cómo están estructurados los protocolos de la capa de enlace y física de los estándares 802.16.

2.2 Estructura básica de WiMAX móvil

Una de las mejores formas para entender y analizar cualquier sistema de telecomunicaciones es refiriéndolo en términos del modelo OSI, por ello esta sección se inicia describiendo a WiMAX en términos del mismo. Los estándares IEEE 802.16 definen a la capa física y a la subcapa *Media Access Control* (MAC), que junto a la subcapa *Logical Link Control* (LLC) forman la capa de enlace. La subcapa MAC a su vez se divide en tres subcapas más: *Convergence Sublayer* (CS), *Security Sublayer* (SS) y *Common Part Sublayer* (CPS). La capa de red es definida por el Foro WiMAX. Y las capas restantes ya no dependen de WiMAX sino de la aplicación que esté ejecutando el usuario. En la figura 2-1 se muestra la arquitectura de las capas física y MAC en WiMAX móvil.

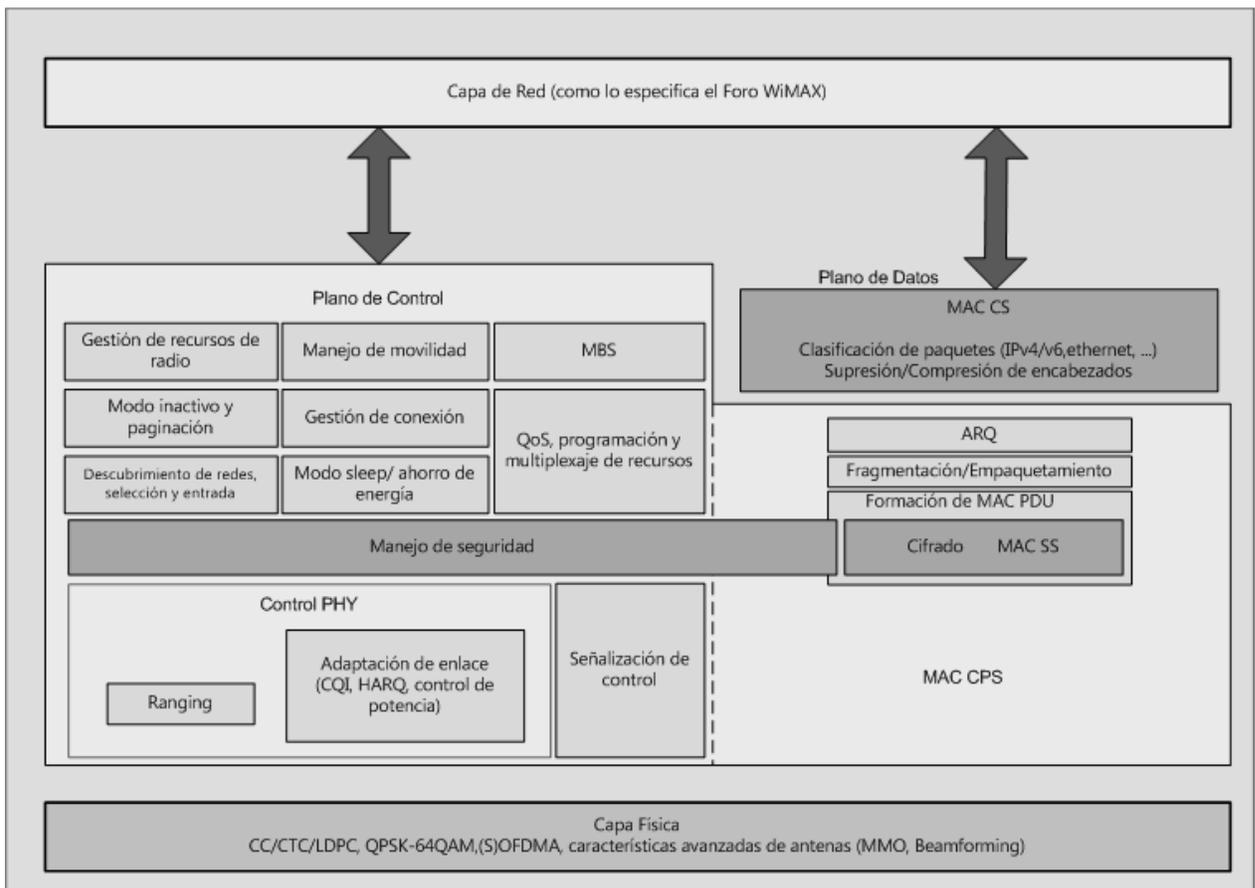


Figura 2-1. Arquitectura de WiMAX en la capa física y MAC [27].

Los bloques funcionales en la CPS pueden ser lógicamente clasificados en funciones MAC superiores, responsables del control de la movilidad y la gestión de recursos, y funciones MAC inferiores dedicadas al control y al soporte de los canales físicos definidos por la capa física. A pesar de que no se separen formalmente en el estándar, también es posible clasificar las funciones en un plano de control y otro plano de datos.

El grupo funcional MAC superior, que forma parte del plano de control, incluye los protocolos relacionados con el control de los recursos de radio y funciones relacionadas con la movilidad como: adquisición de la topología de red, selección e ingreso; paginación y manejo del modo inactivo; gestión de los recursos de radio; manejo de la movilidad en capa 2 y de los protocolos de *handover*; QoS, programación de transmisión, gestión de conexiones; servicios de *multicast* y *broadcast*; manejo del modo en espera [27].

También en el plano de control, el grupo funcional MAC inferior incluye funciones relacionadas a la seguridad en capa 2, gestión del modo *sleep*, control del enlace, asignación de recursos, y de multiplexaje. El bloque de control del enlace se encarga de la señalización en la capa física como el *ranging*, medición/*feedback* (CQI), *Hybrid Automatic Repeat Request* (HARQ) *Acknowledgement* (ACK)/*negative ACK* (NACK) [27]. El bloque de señalización de control genera mensajes de asignación de recursos.

El resto de funciones de la CPS forman parte del plano de datos junto con las funciones de la CS. Las funciones restantes de la CPS son: manejo del MAC ARQ; fragmentación o empaquetamiento de MAC *Service Data Units* (MSDUs) basándose en los resultados de la programación de transmisión; creación de los MAC *Packet Data Unit* (PDU) [27]. La CS está integrada por sólo un bloque funcional encargado básicamente de aceptar los PDUs de las capas superiores, clasificarlos y mapearlos a las conexiones apropiadas. Opcionalmente puede encargarse de suprimir partes repetitivas del encabezado MAC.

Las funciones de la *Security Sublayer* (SS) son proveer autenticación, intercambio de llaves, control de la integridad, y encriptación. Sólo esta última pertenece al plano de datos y el resto al plano de control [7].

2.3 Capa física

En la capa física se define la forma en la que se van a transmitir las secuencias de bits para enlazar a dos nodos. En ella se definen, entre otras, las características físicas del medio de transmisión, la codificación de canal, la modulación, la Potencia Isotrópica Radiada Efectiva (PIRE), el método de multiplexaje.

La interfaz aérea de WiMAX móvil adopta el *Scalable Orthogonal Frequency Division Multiple Access* (SOFDMA) como técnica para compartir el medio. SOFDMA está basada en *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM), la cual es una técnica de multiplexaje que sub-divide el ancho

de banda en múltiples sub-portadoras. En un sistema OFDM, el flujo de datos de entrada es dividido en varios sub-flujos de menor tasa de transmisión y cada sub-flujo es modulado y transmitido de forma separada en una sub-portadora ortogonal.

En un sistema OFDM, los recursos están disponibles en el dominio del tiempo por medio de símbolos OFDM y en el dominio de la frecuencia por medio de sub-portadoras. Los recursos en el tiempo y frecuencia pueden ser organizados en sub-canales, que en OFDMA son asignados a usuarios individuales. El acceso múltiple en un sistema OFDM puede hacerse por medio de *Time Division Multiple Access* (TDMA), en cambio, en OFDMA el acceso múltiple se hace asignando sub-canales [6].

SOFDMA permite despliegues escalables, en donde la duración de los símbolos OFDM y la separación entre las sub-portadoras es constante, sin importar el ancho de banda del canal [26].

OFDM es una técnica muy robusta en ambientes con multirayectorias y sin LOS. Esto se debe a que la tasa de transmisión de cada sub-portadora es menor a la de entrada, lo que provoca una mayor duración de los símbolos, que las hace más robustas a la *Inter Symbol Interference* (ISI). Si además se le agrega el *cyclic prefix* (CP) se puede eliminar completamente la *Inter Symbol Interference* (ISI) siempre y cuando la duración del CP sea mayor al *delay spread* del canal. El CP es una repetición de la última porción del bloque de datos, que se está transmitiendo en el símbolo OFDM; en la figura 2-2 se aprecia claramente el efecto favorable del CP ante la ISI. Una desventaja de usarlo es que reduce la eficiencia espectral al introducir carga adicional a cada símbolo.

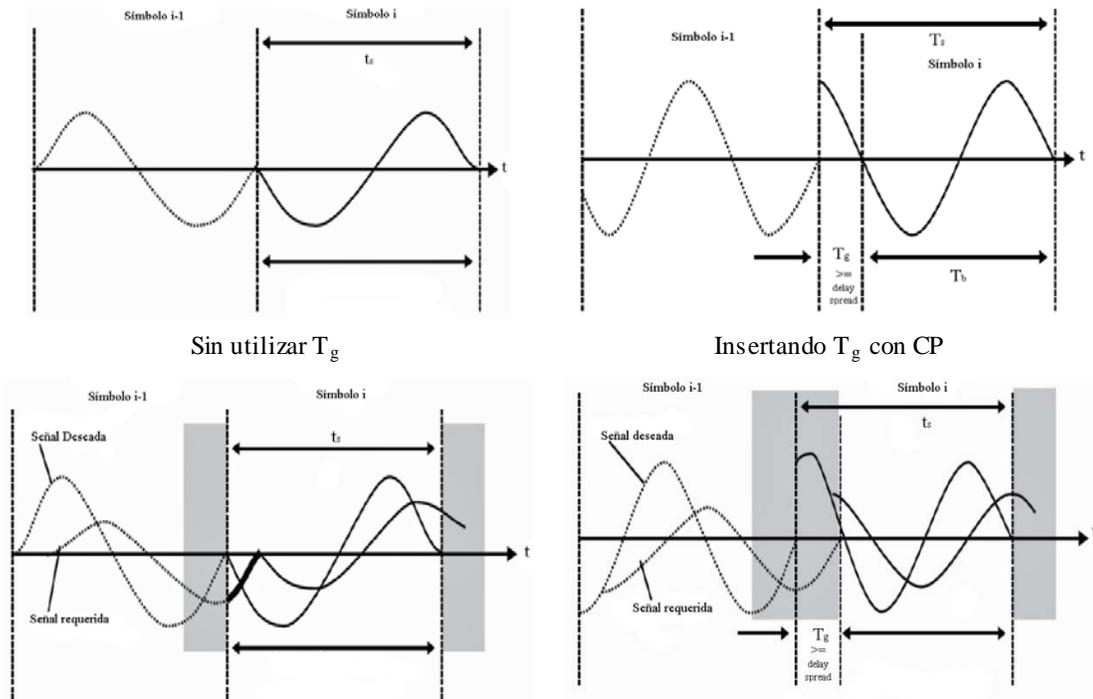


Figura 2-2. Efecto del CP sobre la ISI

El protocolo IEEE 802.16e puede operar en *Time Division Duplexing* (TDD) y *Frequency Division Duplexing* (FDD), aunque por el momento, el Foro WiMAX sólo ha definido perfiles para TDD.

También en WiMAX móvil se introdujo la *Adaptive Modulation and Coding* (AMC), HARQ y *Channel Quality Indicator* (CQICH) para mejorar su cobertura y capacidad en aplicaciones móviles. En la tabla 2-6 se muestran los tipos de modulaciones y codificadores de canal soportados en WiMAX móvil.

Tabla 2-6. Tipos de modulación y codificación de canal en WiMAX móvil [11].

		DL	UL
Modulación		QPSK, 16QAM, 64QAM	QPSK, 16QAM, 64QAM
Tasa de codificación	CC	1/2, 2/3, 3/4, 5/6	1/2, 2/3, 5/6
	CTC	1/2, 2/3, 3/4, 5/6	1/2, 2/3, 5/6
	Repetición	x2, x4, x6	x2, x4, x6

El CQI es utilizado por las MSs para proveer el estado del canal al programador de la BS, que se utiliza por ejemplo, para controlar la AMC. También soporta HARQ que provee de respuesta rápida a errores y mejora la cobertura en los bordes de las celdas. En el UL se tiene un canal ACK para la señalización ACK/NACK de HARQ.

2.4 Capa MAC

Como se mencionó en la sección 2.2, la capa MAC es una subcapa de la capa de enlace. Se encarga de la creación de MAC PDUs, direccionamiento físico, asignación de ancho de banda, control del enlace y establecimiento de conexiones.

Básicamente su operación consiste en recibir los MAC SDUs de la CS ya mapeados a alguna conexión MAC; lleva a cabo la programación de la transmisión considerando la QoS y los envía a la capa física para que sean transmitidos.

En esta sección se van a explicar los elementos más importantes de esta capa, incluyendo la estructura de la trama WiMAX MAC para TDD, la gestión de conexiones, el soporte para QoS y la programación de transmisión.

Estructura de la trama WiMAX MAC en TDD

La figura 2-3 muestra la estructura OFDM de una trama WiMAX MAC para una implementación TDD. Cada trama se divide en sub-tramas UL y DL, que se separan por medio de intervalos dedicados a que la MS efectúe la transición transmisor-receptor, o viceversa.

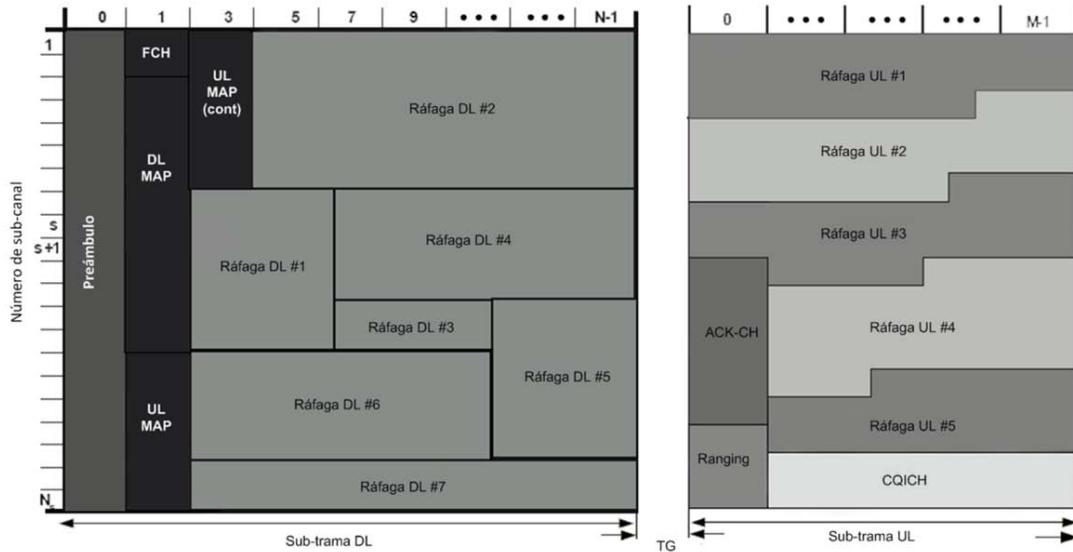


Figura 2-3. Estructura OFDM de una trama WiMAX MAC en TDD.

La trama está compuesta por los elementos que se describen en la tabla 2-7 y por las ráfagas asignadas a las conexiones de los usuarios.

Tabla 2-7. Elementos de una trama WiMAX MAC [6].

Elemento	Descripción
Preámbulo	Se difunde en el primer símbolo OFDM de la trama, y se utiliza para sincronización física con la BS, y durante la etapa de escaneo
Frame Control Header (FCH)	Está enseguida del preámbulo y provee la información de configuración de la trama, como la longitud de los mensajes MAP, el esquema de codificación y los sub-canales utilizables
DL-MAP y UL-MAP	Proveen la asignación de los sub-canales e información de control de las tramas DL y UL
UL ranging	Es asignado para que las MSs lleven a cabo ajustes de tiempo, frecuencia y potencia así como solicitudes de ancho de banda
UL CQICH	Es asignado para que las MSs den retroalimentación sobre el estado del canal
UL ACK	Es asignado para que las MS retroalimenten DL HARQ ACKs

Programador de transmisión y QoS

El rol del programador de transmisión es asignar eficientemente los recursos disponibles en respuesta al tráfico en ráfagas y a las condiciones variables del canal. Para hacerlo, debe monitorear siempre la calidad del enlace a través de los valores *Carrier to Interference and Noise Ratio* (CINR) recibidos en el CQICH, que le permiten determinar el perfil de ráfaga (parámetros de modulación y codificación de canal). También tiene que determinar el ancho de banda que requiere cada MS considerando el tipo de QoS de cada conexión y la cantidad de tráfico requerida.

La QoS está dada por flujos de servicio, que son servicios MAC que proveen transporte de paquetes unidireccional para UL y DL. Los flujos de servicio están caracterizados por un conjunto de parámetros de QoS, incluyendo detalles sobre cómo la MS puede solicitar asignaciones de ancho de banda para el UL y el comportamiento esperado del programador de transmisión ascendente en la BS. Cada flujo es identificado por una secuencia de 32 bits llamada *Service Flow Identifier* (SFID). En la tabla 2-8 se presentan los tipos de SFIDs definidos en el estándar IEEE 802.16e.

Tabla 2-8. Tipos de flujos de servicio en el estándar IEEE 802.16e[2].

Tipo de flujo de servicio	Descripción
Aprovisionado	Este tipo de flujo de servicio es conocido a través del aprovisionamiento, por ejemplo, el sistema de gestión de la red
Admitido	Este tipo de flujo de servicio indica que los recursos han sido admitidos, sin embargo, hasta que las negociaciones concluyan serán activados
Activo	Este tipo de flujo de servicio indica que los recursos en la BS han sido comprometidos

Antes de proveer cierto tipo de servicio de datos, la BS y la MS deben establecer una conexión, que se define como un enlace lógico unidireccional entre las capas MAC pares con el propósito de transportar el tráfico del flujo de servicio. Para cada tipo de servicio (VoIP, email, FTP, etc.) se debe crear una conexión, que debe ser identificada por una secuencia de 16 bits llamada *Connection Identifier* (CID). En la tabla 2-9 se muestran los tipos de CIDs definidos en el estándar.

Tabla 2-9. Tipos de CID en el estándar IEEE 802.16e[7].

Tipo de CID	Descripción
Básica	Es utilizada para el intercambio mensajes MAC de mantenimiento urgentes y cortos
Primaria	Es utilizada para el intercambio de mensajes MAC de mantenimiento más largos y no tan urgentes
Secundaria	Es utilizada para el intercambio de mensajes de control, basados en estándares (DHCP, SNMP, TFTP, etc.), que pueden ser muy largos y que pueden tolerar retrasos Los mensajes de mantenimiento secundarios son transportados en paquetes IP, por lo que no son mensajes de mantenimiento MAC

A cada conexión se le asigna un flujo de servicio, que incluye un tipo de servicio de programación y sus parámetros de QoS asociados. Con esta información el programador en la BS puede anticipar la latencia y el *throughput* que cada conexión va a requerir. Los tipos de servicio de programación, o tipos de QoS, soportados en el estándar IEEE 802.16e se muestran en la tabla 2-10, junto con los parámetros asociados a cada uno y sus aplicaciones típicas.

Basándose en las solicitudes de ancho de banda, parámetros de QoS, y prioridades en el servicio de programación, el programador de la BS determina el orden y la programación de las asignaciones de

ancho de banda. Estas decisiones son transmitidas en los mensajes de mantenimiento MAC UL-MAP y DL-MAP, para el canal UL y DL, respectivamente.

Tabla 2-10. Tipos de QoS en el estándar IEEE 802.16e [6].

Tipo de QoS	Especificaciones	Aplicaciones
UGS <i>Unsolicited Grant Service</i>	<ul style="list-style-type: none"> Tasa máxima sostenida Latencia máxima tolerada Jitter tolerado 	Vo IP
rtPS <i>Real-Time Polling Service</i>	<ul style="list-style-type: none"> Tasa mínima reservada Tasa máxima sostenida Latencia máxima tolerada Prioridad de tráfico 	Audio y video en streaming
ertPS <i>Extended Real-Time Polling Service</i>	<ul style="list-style-type: none"> Tasa mínima reservada Tasa máxima sostenida Latencia máxima tolerada Jitter tolerado Prioridad de tráfico 	Vo IP con supresión de silencio
nrtPS <i>Non-Real-Time Polling Service</i>	<ul style="list-style-type: none"> Tasa mínima reservada Tasa máxima sostenida Prioridad de tráfico 	<i>File Transfer Protocol (FTP)</i>
BE <i>Best-Effort</i>	<ul style="list-style-type: none"> Tasa máxima sostenida Prioridad de tráfico 	Transferencia de datos, navegación web

La MS también tiene un servicio de programación dedicado a clasificar todos los paquetes provenientes de sus diferentes conexiones.

El estándar no define un algoritmo de programación de transmisión en particular. Cualquier algoritmo existente se puede utilizar: *Round Robin*, *Round Robin Ponderado*, etc. También es posible desarrollar y utilizar nuevos algoritmos de programación de transmisión.

2.5 Conclusiones

En este capítulo se presentó una descripción muy breve de las características más relevantes de WiMAX móvil. Esta tecnología fue desarrollada y es promovida por el IEEE y por un grupo de vendedores y operadores que conforman el Foro WiMAX.

El estándar 802.16e contiene la definición de las primeras dos capas de WiMAX, y todo lo que le hace falta para que se forme una solución completa punto a punto es definido por el Foro, incluyendo la definición de la capa de red.

WiMAX es una tecnología que utiliza técnicas avanzadas en la capa física y en la capa MAC que le permiten tener, entre otras cosas, una eficiencia espectral mayor a la de cualquier tecnología de 3G y soporte completo para QoS.

Además es la primera tecnología de acceso inalámbrico que utiliza OFDMA, que tiene prestaciones muy similares a CDMA con la ventaja de no estar patentada, lo que implica costos menores en los dispositivos WiMAX, y que permite despliegues escalables en los que se puede ajustar el ancho de banda de acuerdo a las necesidades del operador.

Con la aparición de las nuevas tecnologías de comunicación, los usuarios pueden tener acceso a todos los servicios que les ofrecen los prestadores de acceso fijo en cualquier momento y en cualquier lugar. Esto quiere decir que los usuarios ya no van a estar atados físicamente a una computadora personal o a un *hotspot* para mantenerse comunicados. Van a poder acceder a sus aplicaciones de correo electrónico, videoconferencia o mensajería instantánea mientras van caminando, o cuando viajan de una ciudad a otra.

Para poder ofrecer verdadera movilidad es necesario que las redes que la soportan cumplan con ciertos requisitos. El más importante es la habilidad para cambiar de BS servidora de acuerdo al movimiento del usuario. Además, el usuario no debe notar ninguna perturbación en la comunicación debida al cambio. El segundo requisito se deriva de que la cantidad de energía que pueden almacenar las baterías es limitada, por lo que es imperativo que el dispositivo móvil consuma la menor cantidad de energía posible.

El propósito de este capítulo es que el lector entienda qué hay detrás de la movilidad en WiMAX Móvil. En la primera sección se presenta la arquitectura de red, porque conociéndola es posible entender fácilmente el proceso de *handover* (HO). Éste último se explica detalladamente en la siguiente sección, primero su clasificación y después cómo ocurre. Luego se explica de forma breve el control de potencia, y por último se presentan las conclusiones.

3.1 Arquitectura de Red

Hasta este momento sólo se han presentado dos elementos de las redes WiMAX: la MS y la BS. Además, sólo han sido cubiertos los pormenores de los protocolos utilizados por las primeras dos capas de la tecnología WiMAX. En esta sección se aborda lo que hay más allá de la BS, una arquitectura completamente basada en IP, y que maximiza el uso de los protocolos del IETF y de estándares abiertos.

El estándar 802.16e define la interfaz aérea de WiMAX, dejando sin especificar la forma en que se van a conectar las BSs entre sí y a Internet. Por ello el Foro WiMAX constituyó al *Network Working Group* (NWG) que se encargó de crear el *Network Reference Model* (NRM), mostrado en la figura 3-1.

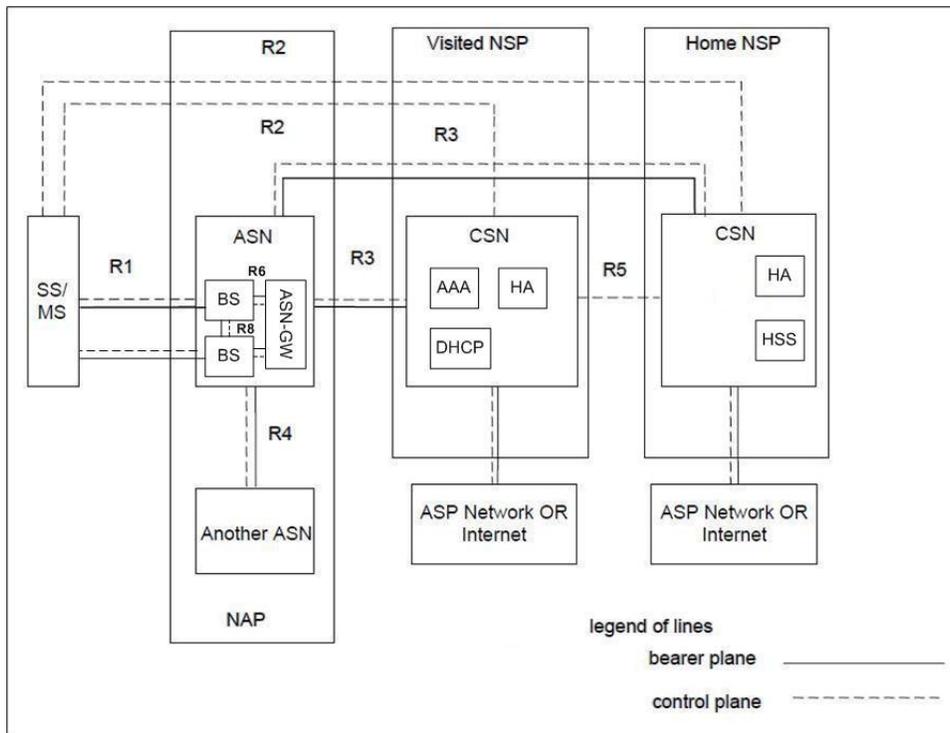


Figura 3-1. Network Reference Model [5].

Network Reference Model

El NRM es una representación lógica de la arquitectura de una red WiMAX. Define entidades funcionales clave y puntos de referencia en donde se produce la interoperabilidad entre los elementos de red. Una entidad funcional representa una agrupación lógica de funciones, físicamente puede estar formada por uno ó varios elementos de red.

Antes de definir cuáles son las entidades y sus funciones es conveniente definir los conceptos de *Network Service Provider (NSP)* y *Network Access Provider (NAP)*. Un NAP es una entidad de negocios que provee la infraestructura de acceso; un NSP es una entidad de negocios que provee servicios de conectividad IP y servicios de WiMAX a sus suscriptores, de acuerdo a un *Service Level Agreement (SLA)*. Un NSP puede estar relacionado con uno o varios NAPs, también pueden ser la misma entidad de negocios.

Los elementos funcionales definidos en el NRM son: MS que provee al usuario conectividad a una red WiMAX, *Access Service Network (ASN)* que es el punto de ingreso de una MS a la red WiMAX, y *Connectivity Service Network (CSN)* que provee la conectividad IP a los suscriptores. Sus funciones principales se presentan en la tabla 3-1, y aquella que resume el propósito de la entidad se escribe en *itálicas*.

Tabla 3-1 Funciones de las entidades funcionales del NRM [5].

Entidad funcional	Funciones
MS	<i>Equipo del usuario que provee la conectividad inalámbrica entre uno o varios hosts en una red WiMAX</i> Puede representar a una terminal fija ó móvil
ASN	<i>Provee el acceso inalámbrico a la MS</i> Provee la conectividad WiMAX L2 a la MS Transfiere los mensajes de <i>authentication, authorization and accounting</i> (AAA) a su <i>home</i> NSP (H-NSP) Descubre y selecciona al NSP preferido del suscriptor Funcionalidad de <i>relay</i> para establecer conectividad L3 con la MS Gestiona los recursos de radio Crea túneles ASN-CSN y ASN-ASN Cumplimiento de políticas y QoS Soporte para <i>ASN anchored mobility</i> y <i>CSN anchored mobility</i> Paginado y manejo de la ubicación
CSN	<i>Provee servicios de conectividad IP al suscriptor</i> Maneja las direcciones IP Da los servicios de AAA Implementa políticas de QoS y de control de admisión de acuerdo al perfil del suscriptor Crea túneles entre la con la ASN, en los que se envía la información de cobro y de acuerdos entre operadores Crea túneles con otras CSN para ofrecer <i>roaming</i> en las redes de otros NSP Provee conectividad a Internet y a otros servicios de WiMAX (navegación, IMS, <i>broadcast, multicast</i> , etc.) Soporta movilidad inter-ASN

ASN Reference Model

Como se observa en la figura 3-1, la ASN puede estar formada por dos o más BSs, y cuando menos por un ASN Gateway (ASN-GW); también es posible que todas sus funciones se lleven a cabo en un solo nodo. La BS básicamente actúa como interfaz entre la ASN y la MS a través de un enlace de radio, implementado de acuerdo a las especificaciones de los estándares 802.16. El ASN-GW tiene funciones relacionadas con QoS, seguridad, manejo de movilidad, interacción con la CSN y con otras ASNs.

Puntos de referencia

En la figura 3-1 hay siete *reference points* (RP) cuya descripción se presenta en la tabla 3-2. Se pueden entender, como una interfaz en la que convergen todos los protocolos utilizados por las entidades funcionales que se encuentran a sus lados.

Tabla 3-2. Puntos de Referencia [5].

RP	Definición
R1	Protocolos y procedimientos utilizados entre la MS y la ASN. Incluye al 802.16e y a los protocolos L3
R2	Protocolos y procedimientos utilizados entre la MS y la CSN. Está asociado principalmente con el manejo de la configuración IP del suscriptor, y los servicios de autenticación y autorización
R3	Protocolos del plano de control entre la ASN y la CSN. Incluye el soporte para AAA, cumplimiento de políticas, y manejo de la movilidad
R4	Protocolos usados entre ASNs. Puede ser utilizado para permitir la movilidad entre diferentes ASNs y ASN-GWs
R5	Protocolos necesarios para soportar el roaming entre la CSN operada por el H-NSP y otras CSNs visitadas operadas por otros NSP
R6	Protocolos asociados a QoS, seguridad, y movilidad, utilizados entre la BS y el ASN-GW
R7	Punto de referencia dedicado a la coordinación de políticas y AAA
R8	Punto de referencia opcional dedicado a la comunicación entre BSs para asegurar HOs rápidos y transparentes

R7 no se encuentra en la figura debido a que forma parte de otra descomposición que se puede hacer al ASN-GW, en la que se le divide en *Decision Point* y *Enforcement Point*, y se ubica a R7 en la conexión entre ambos.

Perfiles de ASN

El NWG creó tres perfiles para guiar a los fabricantes y operadores en la creación de una red WiMAX móvil funcional. En el perfil A el control del HO y el controlador de los recursos de radio están en el ASN-GW, lo que le permite gestionar los recursos de radio de varias BSs. En el perfil B la ubicación física de las entidades del ASN se deja a los operadores, sin embargo, se debe seguir cumpliendo que la ASN se pueda comunicar con otras ASNs a través de R3 y/o R4. Por último, el perfil C es similar al A con la diferencia de que el control del HO y la gestión de los recursos de radio se hacen en la BS.

ASN/CSN anchored mobility

La arquitectura de red define dos niveles de movilidad: uno con anclaje en la ASN y otra en la CSN. El punto de anclaje se refiere al punto de referencia por el que la MS está accediendo a la red, para la ASN es R1 y para la CSN es R3. La movilidad con anclaje en la ASN (ASN-M) es completamente transparente a la CSN, y ocurre en cada cambio de BS sin importar si el prefijo de red ó el punto de terminación del túnel de *Mobile IP* (MIP) cambia. Más formalmente, ASN-M se refiere al conjunto de procedimientos asociados con el movimiento de una MS entre dos BSs, donde la BS objetivo puede pertenecer a la misma ASN o a otra diferente. La movilidad con anclaje en la CSN (CSN-M) se presenta cuando cambia el punto de anclaje a la CSN (punto de referencia R3), o viéndolo de otra forma, cada vez que cambia el prefijo de red. CSN-M puede definirse como el conjunto de procedimientos para cambiar el punto de anclaje a la CSN.

No hay que confundirse al pensar que la CSN-M sólo se da cuando hay un cambio de CSN, ni que la ASN-M sólo cuando cambia la ASN. En la figura 3-2 se muestran algunas topologías típicas en redes WiMAX. En la 3-2A se tienen dos grupos formados por 5 BSs y un *Access Router* (AR equivalente al ASN-GW de la figura 3-1), que en conjunto forman dos ASNs. La ASN-M se presenta cada vez que cambia R1, es decir, en cada cambio de BSs sin importar si se encuentran en la misma ASN. La CSN-M sólo ocurre cuando la MS se mueve de una BS a otra que esté bajo otro AR, porque cambia R3. En la figura 3-2A la CSN-M sólo se produce cuando la MS va de BS5 a BS6, ó viceversa; en cambio en la figura 3-2B cada cambio de BS va a implicar CSN-M. Para ambas figuras la ASN-M se va a presentar en todos los cambios de BSs, incluyendo de BS5 a BS6 en la figura 3-2A.

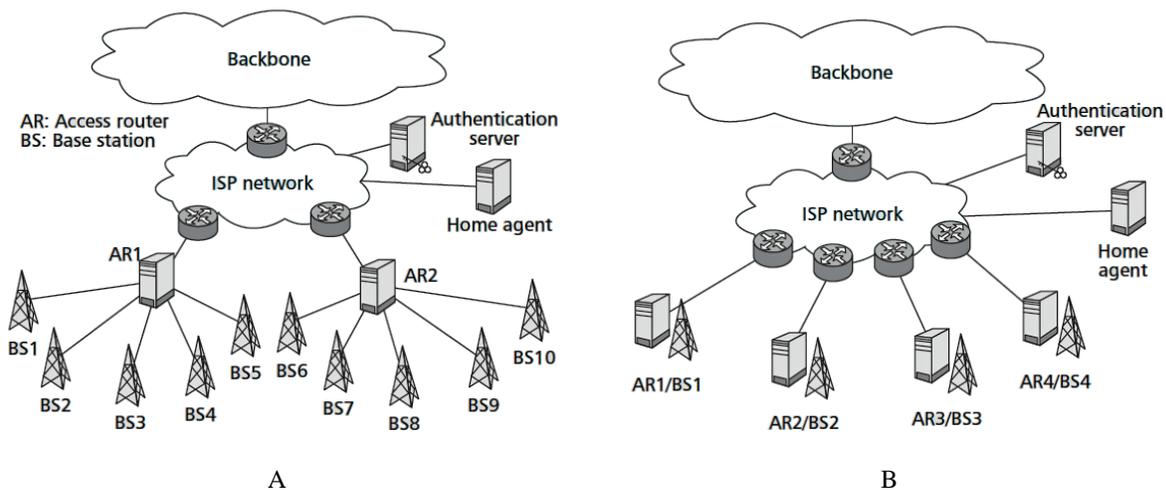


Figura 3-2. Topologías típicas en redes WiMAX [17].

La idea detrás de la definición de arquitectura de red en WiMAX es que sólo defina entidades que agrupan funciones sin ninguna consideración sobre la implementación física, de forma tal que los fabricantes y operadores tengan la oportunidad de innovar [10].

Por último es importante mencionar que como la arquitectura de red de WiMAX está completamente basada en IP la interconexión con otras tecnologías es posible, y hasta cierto punto simple [9].

En la siguiente sección se va a explicar el proceso de *Handover* mostrando su relación con los conceptos que se acaban de introducir.

3.2 Handover

Uno de los principales requerimientos para la movilidad es que una MS pueda cambiar de BS si, por ejemplo, existe otra que ofrezca una conexión de mejor calidad. A este cambio se le conoce como *Handoff* ó *Handover* (HO), y su complejidad estriba en que debe hacerse de forma transparente al usuario. Las razones para hacer un HO pueden ser muchas, las más comunes son que la CINR de una BS distinta a la

servidora sea mayor, para distribuir el tráfico de una celda saturada a otra con más recursos disponibles, o que haya una red más rápida o más económica.

Contrario a lo que normalmente se piensa, el HO no sólo se produce cuando hay un cambio de BS. Probablemente el HO que se presenta con más frecuencia es el que ocurre entre sectores de una misma BS, llamado *intra-cell* HO. Al HO entre BSs se le conoce como *inter-cell* HO, y no está limitado necesariamente a cambio de BSs de la misma tecnología, frecuentemente se definen y requieren HOs entre redes que operan con tecnologías diferentes. Por ejemplo, el HO entre *Wireless Fidelity* (WiFi) y WiMAX va a ser parte del perfil 2.0 de la última.

De manera más precisa, podemos definir al HO como el proceso de mantener las sesiones de una MS activas mientras cambia su punto de acceso a la red. Dependiendo del tipo de HO puede existir un intervalo corto en el que la MS no puede enviar ni recibir paquetes. A este intervalo se le conoce como latencia del HO y varía de acuerdo al método empleado para hacerlo. Para que el HO sea transparente al usuario, la pérdida de paquetes debe ser mínima y debe tener una latencia baja (entre 50 y 150ms para aplicaciones en tiempo real [18]).

3.2.1 Tipos de Handover

La arquitectura de red de WiMAX define movilidad con punto de anclaje en la ASN y en la CSN; la primera implica un HO a nivel de enlace (L2-HO) y la segunda uno a nivel de red (L3-HO). En L2-HO las BSs involucradas residen en la misma subred, por lo que la MS sólo necesita restablecer la conectividad a nivel de enlace con la nueva BS sin tener que cambiar su configuración IP (dirección IP, *default gateway*, máscara de subred, y demás). En un L3-HO, las BSs involucradas residen en diferentes subredes, por lo que la MS debe restablecer conectividad en nivel de red.

Resumiendo, el HO se puede clasificar de acuerdo a la capa del modelo OSI en el que ocurre. Puede haber HO en capa de enlace y en capa de red. Además, el L2-HO puede llevarse a cabo en dos formas: duro (*break-before-make*) ó suave (*make-before-break*).

- El **HO duro** se lleva a cabo terminando la conexión con la BS servidora antes de crear la nueva conexión con la BS objetivo. El HO duro es natural en esta tecnología por lo que es barato y relativamente fácil de implementar, además es muy eficiente en cuanto al uso de recursos porque en todo momento sólo utiliza un canal. Sus desventajas son muchas, las más importantes son la pérdida de paquetes, la latencia que introduce, y que si falla puede dañar severamente a la conexión
- El **HO suave** es sumamente confiable dado que la conexión se termina hasta que se tiene una nueva conexión funcionando. Su principal desventaja es que requiere de muchos recursos: cada

MS debe tener enlaces con dos o más BSs lo que limita la capacidad de cada BS, además demanda una gran capacidad de procesamiento que impacta en el costo del equipo y en el consumo de energía. A cambio de ello, el HO suave presenta latencias significativamente menores que las del HO duro

En los perfiles de WiMAX móvil sólo el HO duro es obligatorio, el soporte para el HO suave es opcional tanto para la MS como para la BS. El estándar 802.16e define dos tipos de HO suave: *Macro Diversity Handover* y *Fast Base Station Switching*.

Macro Diversity Handover (MDHO)

La MS mantiene una lista de las BSs con capacidad de MDHO que se encuentran en su área de cobertura. Al conjunto se le conoce como *diversity set*. Durante el MDHO, la MS transmite y/o recibe información con todas las BSs que forman parte del *diversity set* en el mismo intervalo de tiempo. Para el tráfico de bajada, dos o más BSs envían información a la MS, y ésta lleva a cabo la combinación de ambas señales. Para el tráfico de subida, la señal enviada por la MS es recibida por todas las BSs del *diversity set* y se lleva a cabo la *selection diversity*.

Para que se pueda llevar a cabo se han de cumplir varias condiciones. De allí tenemos: las BSs involucradas deben estar sincronizadas con una fuente común, las tramas enviadas deben llegar a la MS dentro del intervalo del prefijo, deben tener la misma asignación de frecuencias, deben utilizar el mismo conjunto de CIDs, y todas deben enviar los mismos MAC/PHY PDUs, y compartir o transferir su contexto MAC (toda la información que normalmente intercambian una MS y una BS durante el ingreso a la red).

Fast Base Station Switching (FBSS)

Al igual que en el MDHO la MS forma un *diversity set*, pero a diferencia de éste, la MS se comunica sólo con una BS del *diversity set*. La BS con la que la MS se comunica se conoce como ancla, y puede ser cambiada en cada trama. Esto es posible porque todas las BSs en el *diversity set* reciben los datos dirigidos a la MS, pero sólo la BS ancla los transmite por la interfaz aérea. Las condiciones son las mismas que para MDHO excepto por el uso del mismo conjunto de CIDs y MAC/PHY PDUs.

3.2.2 HO en capa de enlace

En esta sección se va a describir el proceso de L2-HO duro definido en el estándar 802.16e. El HO se lleva a cabo en dos etapas. Primero, antes de que se envíe la solicitud de HO, se lleva a cabo una adquisición de la topología de red. Después, se lleva a cabo el proceso de HO que incluye la toma de decisión e inicio, los procedimientos de *ranging* y el reingreso a la red.

3.2.2.1 Adquisición de la Topología de Red

Anuncio de la Topología de Red

Las BSs difunden información sobre la topología de red a través del mensaje de mantenimiento MBR_NBR-ADV. En él envían información, obtenida a través del *ranging*, que las BSs vecinas normalmente transmiten en sus mensajes *Downlink Channel Descriptor/Uplink Channel Descriptor* (DCD/UCD). El propósito de esta etapa es facilitar la sincronización de la MS con las BSs vecinas al evitar que la MS tenga que monitorear la transmisión de los mensajes DCD/UCD de las BSs vecinas.

Escaneo

Las BSs asignan intervalos de escaneo a las MSs para que busquen y monitoreen a las BSs vecinas con el objetivo de encontrar alguna adecuada para un eventual HO. Se inicia con el envío de un mensaje MOB_SCN-REQ de la MS a la BS servidora en el que le solicita un intervalo de escaneo. En cuanto recibe el mensaje, la BS responde con un mensaje MOB_SCN-RSP, en él concede un intervalo de escaneo que dure cuando menos lo solicitado por la MS o rechaza la solicitud. Si la MS recibe una respuesta afirmativa, a partir del instante que le indicó la BS, escanea una o más BSs durante el tiempo que le fue autorizado. En ese intervalo, la MS puede intentar sincronizar sus transmisiones en el canal DL y estimar la calidad del enlace para cada BS. Al finalizar el intervalo, la MS puede enviar a la BS servidora un mensaje MOB_SCN-REP para reportarle los resultados del escaneo.

Durante los intervalos de escaneo se interrumpe la comunicación entre la MS y la BS servidora, por lo que esta última puede almacenar los datos dirigidos a la MS, que le lleguen durante el intervalo y transmitirlos al término del mismo.

Si la MS requiere llevar a cabo múltiples escaneos puede solicitar en el MOB_SCN-REQ un grupo de intervalos de escaneo, separados por intervalos de “interleaving” en los que opera normalmente. En caso de aceptar la petición, en el MOB_SCN-RSP la BS servidora le indicará, utilizando la duración de las tramas como unidad, el tiempo que debe esperar antes de iniciar el primer intervalo de escaneo, la duración del propio intervalo, y la de los intervalos de *interleaving*.

Procedimientos de asociación

La asociación es un procedimiento de *ranging* opcional que ocurre durante el intervalo de escaneo. Su propósito es que la MS adquiera y almacene, para las BSs con las que se asocie, parámetros de *ranging* y de disponibilidad de servicio. Esta información le puede servir para que pueda hacer una selección adecuada de una BS objetivo y/o acelerar el proceso de HO con la BS asociada.

El estándar define tres niveles de asociación:

- **Asociación nivel 0** (Sin coordinación): La BS servidora y la MS negocian la duración y los intervalos de asociación. La MS utiliza *ranging* basado en contención.

- **Asociación nivel 1** (Con coordinación): La BS objetivo reserva una oportunidad de transmisión y un código de *ranging* inicial para la MS. De esta forma se elimina la probabilidad de colisión ya que no habrá otra MS que utilice el mismo código en el mismo slot de *ranging*. Esto se logra gracias a que la BS servidora coordina la asociación entre la MS y las BSs vecinas, a través del *ranging*, y le envía a la MS, unilateralmente, los parámetros de asociación,
- **Asociación nivel 2** (Reporte de asociación asistido por red): Es igual al nivel 1, excepto que la MS no espera la llegada del mensaje RNG-RSP de la BS objetivo. Ésta información llega a su BS servidora, a través del *ranging*, y ésta se la hace llegar a la MS.

3.2.2.2 Proceso de HO

Generalmente, la decisión de efectuar un HO depende de varios factores, entre ellos están las condiciones de red, el desempeño del sistema, los tipos de aplicaciones, requisitos de consumo de energía, preferencias del usuario, condiciones de la MS, seguridad y costo. Ni el estándar, ni el foro WiMAX eligen algún algoritmo de decisión del HO, éste debe ser definido por los proveedores de equipo de acuerdo a las necesidades de los proveedores de servicio y de los usuarios finales. Por ejemplo, si un proveedor quiere optimizar el uso de la capacidad de su red va a buscar balancear la carga de las BSs altamente saturadas a las que estén menos activas. O a un usuario final que busque reducir el costo del servicio le va a interesar cambiarse a una red WiFi gratuita cuando se encuentre a su alcance.

La MS constantemente está escaneando a sus BSs vecinas, en cada escaneo evalúa la posibilidad de hacer un HO con alguna de las BSs vecinas, utilizando alguno de los criterios que se acaban de mencionar. Una vez que la MS o la BS servidora han tomado la decisión de efectuar un HO, comienza el proceso con el envío de un mensaje de mantenimiento MAC tipo MOB_MSHO-REQ ó MOB_BSHO-REQ, el primer caso si la MS decide hacer el HO y el segundo si lo hace la BS servidora.

Reelección de celda

Se refiere al proceso en el que la MS escaneo y/o se asocia con una o más BSs para encontrar una BS objetivo potencial de un HO. Para hacerlo, la MS puede utilizar la información adquirida a través de los mensajes MOB_NBR-ADV. También puede solicitar la asignación de intervalos de escaneo o de inactividad para escanear, y posiblemente llevar a cabo el proceso de *ranging*, con las BSs vecinas. Este proceso le permite conocer las alternativas de HO antes de que la conexión con la BS servidora sea interrumpida.

Decisión e Inicio del HO

El HO comienza cuando la MS toma la decisión de cambiar de BS servidora. La decisión puede venir de la MS ó de la BS servidora. El primer paso consiste en enviar un mensaje de notificación en donde se

anuncie la intención la MS, o de la BS, de que la MS haga un HO. Si lo envía la MS será el mensaje MOB_MSHO-REQ, y si lo hace la BS servidora será el mensaje MOB_BSHO-REQ. Ambas notificaciones pueden incluir una o más BSs objetivo potenciales, identificadas en la etapa de reelección de celda.

A través del mensaje MOB_BSHO-REQ la BS puede forzar a la MS a hacer un HO, pero no puede forzarla a elegir alguna BS objetivo. Si el HO es obligatorio, la MS debe responder con un mensaje MOB_MSHO-IND en el que le indica a la BS el compromiso de hacer el HO, salvo que no pueda hacer HO con ninguna de las BSs recomendadas por la BS servidora en el mensaje MOB_BSHO-REQ.

Si el HO es iniciado por la MS, la BS responde confirma la recepción del mensaje MOB_MSHO-REQ con el mensaje MOB_BSHO-RSP. En el instante en el que la MS va a ejecutar el HO envía el mensaje MOB_MSHO-IND para indicar que está comprometida con el HO y para confirmar la BS objetivo.

En la figura 3-3 se presenta el intercambio de mensajes que se da durante el proceso de HO iniciado por la MS, y durante la primera parte del reingreso a la red. El reingreso a la red se va a explicar en la siguiente sección. Se presenta en este diagrama para mostrar el enlace entre ambas etapas y se aprovecha para introducir las primeras etapas a través de la descripción del mismo.

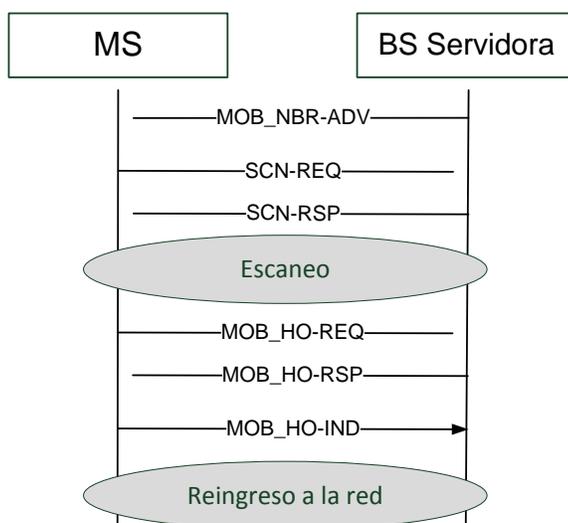


Figura 3-3. Intercambio de mensajes durante el L2-HO.

El HO comienza con el envío de un mensaje MOB_MSHO-REQ por parte de la MS a la BS servidora. Al recibir el mensaje, la BS envía un mensaje MOB_BSHO-RSP confirmando su recepción. Cuando la MS va a iniciar el proceso de HO envía el mensaje MOB_MSHO-IND con el que se compromete al HO y para confirmar a la BS objetivo. El reingreso a la red comienza cuando la MS se sincroniza con el canal de bajada y de subida de la BS objetivo, y recibe los parámetros básicos de conexión (DL_MAP, UL_MAP, DCD y UCD). Después se lleva a cabo el *ranging* que, como se va a explicar más adelante, es susceptible

a colisiones y que por lo mismo tiene una duración es aleatoria. Inicia cuando la MS envía el mensaje RNG-REQ, si no hay colisión, la BS responde con el mensaje RNG-RSP. El intercambio de estos dos mensajes continúa hasta que los parámetros de la MS quedan debidamente ajustados. El reingreso a la red continúa hasta que se restablecen las conexiones y continúa la transmisión normal.

3.2.2.3 Reingreso a la red

En la figura 3-4 se muestra el proceso de ingreso a la red, que ocurre cuando se enciende la MS, y el reingreso a la red, que ocurre durante un HO. Ambos procedimientos son muy similares. La diferencia va a depender de que tanta información pueda obtener la BS objetivo sobre la MS por medio de la red *ranging*, y de la que la MS haya obtenido de la BS objetivo antes del HO. Las etapas a omitir se indican durante la etapa de *ranging* en el mensaje RNG-RSP.

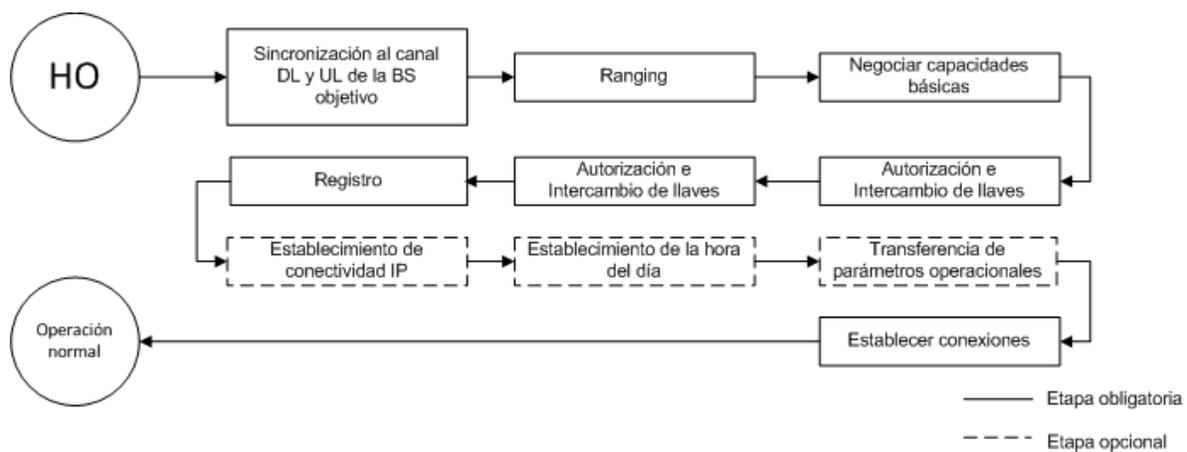


Figura 3-4. Proceso de reingreso a la red.

Sincronización al canal de bajada y de subida de la BS objetivo

Después del inicio del HO la MS debe sincronizarse al canal de bajada de la BS objetivo, y luego con el canal de subida. Para hacerlo intentará detectar de manera periódica los preámbulos de cada trama. Cuando la MS sea capaz de recibir los parámetros básicos de conexión (DL_MAP, UL_MAP, DCD y UCD) habrá concluido esta etapa. Si en algún momento deja de recibirlos debe comenzar nuevamente la sincronización.

Esta etapa puede ser abreviada si la MS ha recibido un mensaje MOB_NBR-ADV con el BSID de la BS objetivo, su frecuencia de operación, DCD y UCD. Si la BS objetivo recibió previamente una notificación sobre el HO por parte de la BS servidora a través del *ranging*, entonces le puede asignar una oportunidad de *ranging* inicial para evitar la contención.

Ranging

El propósito de esta etapa es que la MS ajuste el *offset* de la sincronización (*timing*) y los parámetros de potencia. Comienza cuando la MS envía un mensaje RNG-REQ en una región de contención reservada para este propósito.

Todas las MSs que quieran ejecutar el proceso de *ranging* con la misma BS van a tener que elegir un slot (que en OFDMA está formado por Y símbolos y X subcanales) que se encuentre en esta región. Si dos o más MSs eligen el mismo slot se presentará una colisión, y todas las MSs involucradas tendrán que retransmitir el mensaje esperando el tiempo indicado por el algoritmo de Backoff Exponencial. El estándar 802.16e introduce el concepto de CDMA *ranging*, en el que además de utilizar *Time Division Multiple Access* (TDMA) utiliza *Code Division Multiple Access* (CDMA). La MS selecciona, con la misma probabilidad, un código CDMA de un conjunto de códigos destinados al *ranging*, inicial o de HO. La MS transmite el código seleccionado en un slot de la región de *ranging*. Al recibirlo, la BS asigna una oportunidad de transmisión a la MS enviando un CDMA_Allocation_IE al CID de *broadcast*, que especifica el slot y el código utilizado por la MS. Esto le permite a la MS determinar si la asignación está destinada a ella, al comparar los parámetros con los que ella utilizo. Si la asignación fue para ella, la MS transmite un mensaje RNG-REQ con el código y la región asignada, sino asume que hubo una colisión y utiliza el mecanismo de resolución de colisiones.

A continuación, independientemente si se utiliza CDMA *ranging* o no, cuando la BS recibe el RNG-REQ, responde con un mensaje RNG-RSP en donde le asigna los CIDs de las conexiones MAC de mantenimiento básica y primaria junto con los parámetros físicos.

Esta etapa puede servir para omitir algunas de las etapas subsecuentes, por ejemplo, si la MS incluye la tupla HMAC/CMAC válida en el RNG-REQ y la BS la incluye en el RNG-RSP, se puede omitir la etapa de autorización e intercambio de llaves. La BS va a indicarle a la MS qué etapa pueden ser omitidas en el RNG-RSP.

Esta etapa puede ser abreviada cuando la BS servidora le notifica a la BS objetivo del HO y la última le asigna una oportunidad de transmisión por medio de un Fast_Ranging_IE.

Negociar capacidades básicas

En esta fase la MS y la BS intercambian los parámetros que cada una soporta. La MS empieza enviando un mensaje SBC-REQ a la BS en donde incluye parámetros físicos (máxima potencia de transmisión, modulaciones soportadas en el modulador y demodulador, tipos de HO soportados, soporte de MIMO, parámetros de seguridad soportados, entre otros), adjudicación de ancho de banda (soporte para TDD y/o FDD) y el tamaño del *Fragment Sequence Number* (utilizados al formar MAC PDUs para conexiones que no utilizan ARQ). La BS responde con un mensaje SBC-RSP en el que confirma o rechaza el uso de los parámetros propuestos por la MS.

La BS objetivo puede abreviar esta etapa enviando un mensaje SBC-RSP no solicitado a la MS, siempre y cuando haya obtenido la información necesaria a través de la red *ranging*.

Autorización e intercambio de llaves

A continuación la MS debe autenticarse intercambiando llaves de seguridad a través del protocolo Privacy Key Management (PKM). La MS envía un mensaje PKM-REQ en el que solicita a la BS llaves que le permitan cifrar información que sólo la BS servidora pueda descifrar, y descifrar la información cifrada que la BS servidora le envíe. La BS responde enviando las llaves en un mensaje PKM-RSP.

El proceso completo puede ser omitido si durante la etapa de *ranging* la MS incluye en el mensaje RNG-REQ una tupla *Hashed Message Authentication/Code Cipher-based Message* (HMAC/CMAC) válida, y si la BS la incluye en el RNG-RSP.

Registro

En esta etapa la MS es admitida en la red, y la BS le asigna un CID de mantenimiento secundario. Para registrarse con la BS, la MS le envía un mensaje REG-REQ en donde le indica, entre otras cosas: los parámetros de ARQ que soporta, la versión de IP, soporte para gestión (si puede ser gestionada por medio de mensajes IP estándar), identificación del vendedor, capacidades de la MS (soporte para ARQ, soporte para MAC CRC, etc.), capacidades de la subcapa de convergencia y la versión de MAC que utiliza. La BS responde con un mensaje REG-RSP en donde le asigna un CID de mantenimiento secundario junto con una respuesta que indica cuales capacidades de la MS pueden ser usadas.

La conexión de mantenimiento secundaria, a diferencia de la básica y la primaria, es segura. Esto es gracias a que se establece justo después de que concluye el procedimiento de autorización en la etapa de registro.

Al igual que la etapa de negociar capacidades básicas el registro puede ser abreviado si la BS envía un mensaje REG-REQ no solicitado a la MS, evidentemente debe haber obtenido la información necesaria a través de la red *ranging*.

Establecimiento de conectividad IP

Esta es una etapa opcional que sólo se lleva a cabo si la MS puede ser gestionada por medio de mensajes IP estándar. Su propósito es que la MS obtenga una dirección IP, junto con los parámetros necesarios para tener conectividad IP.

Todos los mensajes destinados al establecimiento de conectividad IP son transmitidos por medio de conexiones de mantenimiento secundarias que, como se mencionó en el capítulo 2, se utilizan para transmitir tráfico tolerante al retraso. Evidentemente esto contribuye a que la latencia de esta etapa tienda a ser alta cuando hay congestión en la red.

En la siguiente sección se explican los retos que conlleva la movilidad para una red basada en IP. En este punto basta mencionar que existen varias alternativas para llevarla a cabo esta etapa, la más común es

Dynamic Host Configuration Protocol (DHCP) aunque en redes móviles conviene utilizar *Mobile IP* (MIP) o *Fast MIP* (FMIP).

Establecimiento de la hora del día

Al igual que el establecimiento de conectividad IP, esta etapa es opcional y se lleva a cabo por medio de la conexión de mantenimiento secundaria. La MS obtiene la hora de día de un servidor por medio de la BS, esto es necesario para el registro de eventos y para la operación de algunos algoritmos.

Transferencia de parámetros operacionales

Esta etapa también es opcional. Sirve para que la MS obtenga su archivo de configuración por medio del protocolo *Trivial File Transfer Protocol* (TFTP) y de una conexión de mantenimiento secundaria. Se lleva a cabo después de que se ejecuta correctamente el mecanismo DHCP cuando en la respuesta del servidor DHCP se especifique.

Establecer conexiones

Para finalizar el reingreso a la red, la MS envía a la nueva BS mensajes DSA-REQ para crear conexiones asociadas a flujos de servicio. La BS responde con un mensaje DSA-RSP aceptando o rechazando la conexión.

3.2.3 HO en capa de red

Para entender las dificultades que conlleva la movilidad en la capa de red hay que precisar algunos puntos de la operación del protocolo IP y de su interacción con protocolos de otros niveles.

Las direcciones IP se utilizan para identificar de forma única a los dispositivos conectados a una red. El sistema *Domain Name Server* (DNS), que opera en la capa de aplicación, también sirve para identificar dispositivos a través de un *Fully Qualified Domain Name* (FQDN). Existen ambas porque para una persona es más fácil recordar una serie de palabras (FQDN) que una serie de números (dirección IP). El control del mapeo entre las dos lo lleva a cabo un servidor DNS. Protocolos de la capa de transporte, como el *Transmission Control Protocol* (TCP), llevan el seguimiento de la sesión de los dispositivos que se están comunicando por medio de sus direcciones IP y de los puertos que estén utilizando.

Las direcciones IP también se utilizan para encontrar una ruta entre dos terminales. Casi siempre, la ruta elegida va a depender únicamente de la dirección IP destino y la congestión de la red. Entonces todos los paquetes que envíe una terminal a otra van a seguir siempre la misma ruta a menos que en algún punto intermedio un *router* elija una ruta distinta a la que normalmente elegiría, porque el tráfico enviado a esa ruta se está retrasando o desechando debido a congestión. Y los paquetes enviados en el sentido inverso no necesariamente van a tomar la misma ruta que los paquetes de ida.

La unión de ambos usos resulta en una situación contradictoria para la movilidad. Por un lado, la MS necesita tener una dirección IP estable para que pueda ser identificada por el resto de los dispositivos

conectados a la red. Y por otro lado, si la dirección se mantiene estable, sin importar donde este la MS todos los paquetes van a ir siempre al mismo lugar.

DHCP

Una forma de solucionar esto es que en cada nuevo punto de acceso a la CSN la MS obtenga una nueva dirección IP de un servidor DHCP. Este cambio va a provocar que todas las aplicaciones de red en la MS van a dejar de funcionar hasta que el usuario reinicie los servicios de red o, más probablemente, hasta que reinicie el dispositivo. Lo anterior es consecuencia de que todas las sesiones de TCP abiertas van a terminar ya que dependen de que la dirección IP sea estable. Otro gran problema es que muchas aplicaciones identifican inicialmente a un dispositivo a través de su FQDN y a través de un servidor DNS obtienen su dirección IP, si la ésta última es asignada dinámicamente, el mapeo en el servidor DNS va a ser erróneo a menos que sea actualizado cada vez que la dirección IP cambie. Modificar constantemente información en el servidor DNS requiere protocolos muy bien diseñados, implementados y administrados. Ya que mientras haya más actualizaciones y más nodos involucrados en las mismas, será más probable que haya problemas de seguridad y rendimiento en el servidor.

Mobile IP

El IETF estandarizó en el *Request For Comments* (RFC) 3344 al protocolo MIP que resuelve el dilema de la movilidad en IP utilizando dos direcciones, una para identificar al dispositivo y otra para el enrutamiento; a la primera se le llama *home address* y a la segunda *care-of address*. El protocolo define tres entidades: un *mobile node* (MN) que vendría siendo la MS, un *Home Agent* (HA) que es un *router* ubicado en la red a la que pertenece la *home address*, y un *Foreign Agent* (FA) que es un *router* ubicado en cualquier red excepto la de la *home address*. La red a la que pertenece la *home address* se conoce como *home network*. En la tabla 3-3 se resume la operación del protocolo.

La arquitectura de red de WiMAX adopta a MIP como el protocolo encargado del manejo de la movilidad a nivel de red. Como se observa en la topología de la figura 3-2, el HA típicamente reside en la CSN junto con los servidores de AAA, y en cada ASN se encuentran una o más FAs.

A pesar de que MIP resuelve el conflicto derivado de la movilidad en IP, resulta inadecuado cuando se quiere utilizar en redes destinadas a aplicaciones en tiempo real. MIP es una solución basada únicamente en la capa de red, por lo que la decisión de ejecutar un cambio de FA se basa únicamente en las indicaciones de dicha capa. En consecuencia, cada vez que hay un cambio de BS, que implique un cambio de FA, el proceso para restablecer la conectividad IP va a comenzar hasta que haya concluido el HO en la capa de enlace, en el momento en que la MS reciba el mensaje de anuncio del nuevo agente. Otra inconveniente es que cuando la MS está fuera de su *home network* todos los paquetes dirigidos a ella tienen que pasar siempre por su HA, en lugar de llegarle directamente. Este problema, conocido como enrutamiento triangular, se soluciona utilizando la optimización de ruta que a grandes rasgos, consiste en

actualizar la tabla de ruteo del nodo con el que la MS se está comunicando para que le envíe los paquetes a su *care-off address* en lugar de a su *home address*. Otro factor que puede contribuir significativamente a incrementar la latencia es la forma en que la MS obtenga y confirme su *care-of address*.

Tabla 3-3. Operación de MIP [3].

Etapas	Descripción
Descubrimiento de agentes	Los agentes de movilidad dan a conocer su presencia enviando periódicamente mensajes de anuncio de agente (RTR_ADV). Opcionalmente, un MN puede solicitar el envío de un mensaje de agente. El mensaje de anuncio contiene una o más direcciones que pueden ser utilizadas como <i>care-of address</i> .
	Tras recibir el anuncio de un agente, el MN determina si está en su <i>home network</i> o en una red foránea. Cuando está en su <i>home network</i> , el MN actúa como cualquier otro nodo.
	Cuando un MN se aleja de su <i>home network</i> obtiene una <i>care-of address</i> de la red foránea, ya sea escuchando/solicitando mensajes de anuncio de agente, o a través del protocolo DHCP ó <i>Point to Point Protocol</i> (PPP). Típicamente la dirección <i>care-of address</i> es la misma que la del FA.
	Los agentes de movilidad dan a conocer su presencia a los MNs de una forma muy similar a la que utilizan los <i>routers</i> para darse a conocer en una red, utilizando el protocolo <i>Internet Control Message Protocol Router Discovery Protocol</i> (IRDP).
Registro	Mientras el MN esta fuera de su <i>home network</i> , debe registrar cada <i>care-of address</i> nueva con su HA a través de los FA. Esto lo hace enviando un mensaje de registro al FA (REG_REQ) en donde indica su <i>home address</i> y la dirección de su HA. El FA reenvía la petición de registro al HA indicando su dirección y la <i>home address</i> del MN (REG_REQ). Al recibirlo, el HA registra el nuevo estado del MN y su nueva <i>care-of address</i> y confirma la recepción del mensaje al FA enviando otro mensaje (REG_REPLY). Al recibirlo, el FA incluye en su lista de visitantes al MN.
Tunelaje	Los paquetes enviados a la <i>home address</i> del MN son interceptados por su HA, que a su vez los tunelea a la <i>care-of address</i> , donde son recibidos al otro lado del túnel por un FA. Si la dirección destino del paquete IP desencapsulado coincide con alguna de las que están en su lista de visitantes, reenvía el paquete al MN correspondiente.
	Para tunelear los paquetes, el HA encapsula el paquete IP dirigido a la <i>home address</i> agregándole una nueva cabecera IP dirigida a la <i>care-of address</i> del MN, de tal forma que la cabecera anterior pasa a ser parte de la carga del paquete.
	Los paquetes enviados por el MN son entregados a su destino por medio de los mecanismos de enrutamiento estándar de IP.

Fast Mobile IP

Por los problemas de MIP el IETF se vio obligado a estandarizar en el RFC 4068 a un sustituto que redujera ó eliminara las latencias introducidas por los procedimientos de configuración de dirección y por su detección de movimiento, al que llamó FMIP. En esta sección se va a describir brevemente cómo opera FMIP sobre una red WiMAX. En la figura 3-5 se muestra el intercambio de mensajes cuando FMIP opera en modo predictivo y reactivo.

Cada vez que la MS ejecuta el proceso de escaneo de las BSs vecinas, selecciona a la BS que de acuerdo a algún criterio, como su CINR, sería la BS objetivo durante un HO. Después de la selección, le envía a su AR servidor un mensaje *Router Solicitation for Proxy* (RtSolPr) en donde incluye el BSID de la BS seleccionada. El AR servidor le responde enviando un mensaje *Proxy Router Advertisement* (PrRtAdv) en donde le indica el prefijo de red de la BS seleccionada. Al recibir el mensaje la MS determina si el HO implicaría un cambio de AR, si lo requiere elige la que sería su nueva *care-of address*, sino el HO no requiere cambios en capa de red y no requiere la acción del protocolo.

Cuando la MS recibe la indicación de un HO inminente envía un mensaje *Fast Binding Update* (FBU) a su AR servidor para notificarle que hay una unión entre la *care-of address* en la subred actual y la nueva *care-of address* en la subred objetivo. La indicación del HO puede provenir de la capa IP o de las capas inferiores. Si la decisión se basa únicamente en indicaciones de la capa de red se tiene un caso muy similar al de MIP, y se obtienen latencias significativamente mayores que cuando la indicación proviene de las capas inferiores. El momento en el que se envía el FBU es crucial para que el protocolo FMIP le permita a la MS comenzar a recibir paquetes inmediatamente después de que completó el HO de capa de enlace.

Cuando el AR servidor recibe el FBU envía un mensaje *Handover Initiation* (HI) al AR objetivo. Al recibir el mensaje, el AR objetivo verifica que la *care-of address* esté disponible y responde enviando un mensaje *Handover Acknowledge* (HAck) al AR servidor; si la *care-of address* ya está en uso, el mensaje debe contener una nueva *care-of address* válida. Cuando el AR servidor lo recibe, envía a la MS y al AR objetivo un mensaje *Fast-Binding Acknowledgement* (FBAck). A partir de este instante el AR servidor intercepta y tunelea todos los paquetes dirigidos a la MS, el AR objetivo recibe los paquetes y los almacena hasta que reciba el mensaje *Fast Neighbor Advertisement* (FNA) de la MS.

Desde que la MS envía el FBU no hace otra cosa más que esperar el envío del mensaje FBAck por parte del AR servidor. Si durante ese intervalo la MS se ve forzada a ejecutar el HO no va a recibir el FBAck y deberá reenviar el FBU a la nueva ASN servidora cuando se haya completado el reingreso a la red. Si recibe el FBAck antes de ejecutar el HO, la MS debe enviar el mensaje FNA al nuevo ASN servidor en cuanto haya completado el reingreso a la red para que comience a recibir los paquetes del túnel. Al primer modo de operación se le llama reactivo y al segundo predictivo. Para que el HO opere en modo predictivo el intervalo entre el envío del FBU y la ejecución del HO debe ser suficiente para que el AR servidor y objetivo lleven a cabo su intercambio de mensajes.

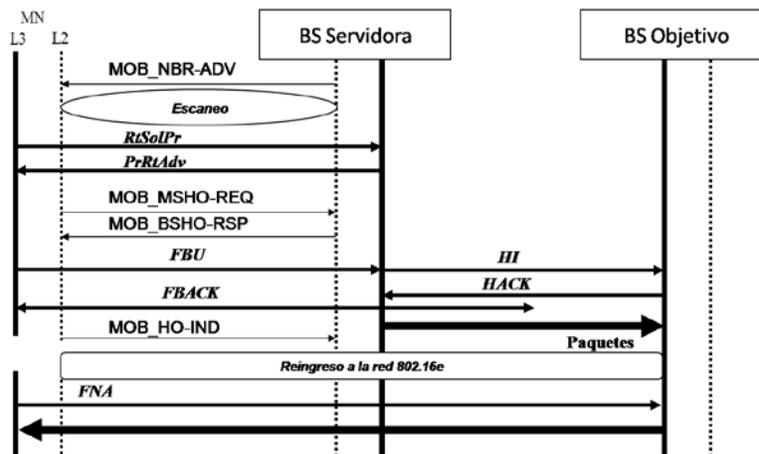


Figura 3-5A. FMIP en modo predictivo [15]

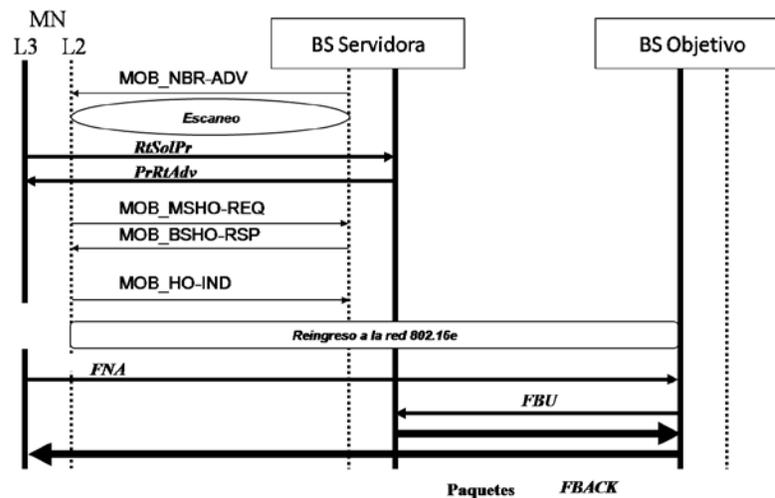


Figura 3-5B. FMIP en modo reactivo [15]

3.3 Conclusiones

En este capítulo se presentaron los principios de la movilidad en WiMAX. Primero se habló de la arquitectura de red de WiMAX, que está completamente basada en IP y que por la forma en que está definida permite la interoperabilidad entre dispositivos de diferentes vendedores y la creación de economías de escala.

Se presentó el concepto de HO, los retos que presenta, y las distintas formas que se han diseñado para atacar el problema. Para aplicaciones en tiempo real se requiere una latencia del HO menor o igual a 150ms. El estándar 802.16e define el proceso de HO duro en capa dos, del HO suave sólo describe los tipos y le deja a los vendedores su definición e implementación. Para llevar a cabo el HO de capa de red el foro WiMAX eligió al protocolo MIP que cumple el propósito pero no es adecuado para aplicaciones en

tiempo real por sus problemas de detección de movilidad, enrutamiento triangular y configuración de direcciones. La alternativa a él es FMIP que se desempeña mucho mejor en ambientes con tráfico en tiempo real, sobre todo cuando es apoyado por la capa de enlace.

OPNET y su modelo WiMAX

El modelado de redes de comunicaciones es un método muy utilizado para conocer, hasta cierto punto, el comportamiento de una red sin necesidad de tenerla físicamente. Mientras más características de la red se tomen en cuenta para el modelado, se tendrán resultados más cercanos a la realidad, y mayor complejidad.

Básicamente existen dos formas de modelar a una red: a través de un modelo analítico y a través de un modelo en computadora. El primero representa a la red a través de un conjunto de ecuaciones y el segundo representa a la red a través de una herramienta de simulación basada en eventos discretos. El modelado analítico es simple y nos puede dar una idea general del comportamiento de la red, sin embargo, la simplicidad hace que sus resultados no sean muy cercanos a la realidad, además de que no puede considerar la naturaleza dinámica de una red. El modelado en computadora es mucho más complejo pero su comportamiento es mucho más aproximado a la realidad [23].

Los simuladores basados en eventos discretos se llaman así, porque tienen una lista en la que se almacenan eventos, que son procesados en orden, y que pueden desatar eventos futuros. Uno de los eventos más comunes es la llegada de un paquete.

Dado que en este estudio se busca conocer el comportamiento de una red WiMAX móvil bajo un ambiente de movilidad, es necesario utilizar el modelado por computadora.

En este capítulo se da una explicación del software que se está utilizando para hacer las simulaciones. Primero se da una breve descripción de OPNET Modeler, que es la plataforma base sobre la que está desarrollado el modelo WiMAX. Después se presentan las características principales del modelo, junto con una descripción de su estructura y su operación. Se explica con más detalle la forma en que está implementado el L2-HO y el L3-HO en él. Para terminar se dan las conclusiones.

4.1 OPNET Modeler

OPNET *Modeler*, cuyas siglas significan “Herramienta Optimizada para la Ingeniería de Redes”, es una herramienta comercial de modelado y simulación de redes de comunicaciones. Su desarrollo inició en 1987 en el *Massachusetts Institute of Technology* (MIT) y actualmente está a cargo de la empresa OPNET Technologies. Es utilizada por grandes empresas de telecomunicaciones, universidades y centros de investigación para diseñar redes, productos, tecnologías y protocolos de forma flexible y escalable. Entre sus principales características están [25]:

- Estructura jerárquica en la que cada nivel describe diferentes aspectos del modelo completo que está siendo simulado.
- Soporte para más de 400 protocolos y dispositivos de comunicaciones comerciales.
- El código fuente de los modelos es modificable y los modelos construidos pueden ser compilados en códigos ejecutables.
- Cuenta con una extensa gama de herramientas que le permiten a los desarrolladores modelar con gran detalle, identificar los elementos de interés, ejecutar la simulación y analizar los datos generados.

OPNET Modeler tiene tres herramientas, llamadas editores, para desarrollar la representación del sistema que está siendo modelado. Están organizados en una estructura jerárquica que se asemeja a la estructura de las redes reales: primero está la topología de la red, después están los dispositivos que forman a la red, y por último están los protocolos que definen la operación de cada dispositivo. En la tabla 4-1 se presentan los nombres de los editores junto con una breve descripción de cada uno.

Tabla 4-1. Descripción de los editores de OPNET Modeler [24][23].

Editor	Descripción
Proyecto	Sirve para representar gráficamente la topología física de la red de comunicaciones. Incluyendo la posición geográfica de los elementos y la forma en la que están interconectados.
Nodo	Se usa para modelar la arquitectura interna de un dispositivo o sistema a través de una estructura de flujos de datos entre elementos funcionales, llamados módulos. Los módulos son procesos que pueden generar, enviar, y recibir paquetes de otros módulos. Pueden representar protocolos de red (como WiMAX MAC, IP, TCP, etc...), aplicaciones (voz, video, consultas de bases de datos, etc...) o recursos físicos (buffer, puerto, etc...). La forma en la que un modulo lleva a cabo sus funciones está definida por un modelo de proceso.
Proceso	Se utiliza para describir la funcionalidad y el comportamiento de los módulos a través de <i>Finite State Machines</i> (FSM). El comportamiento de cada FSM se define con código Proto-C y la comunicación entre ellas se hace a través de interrupciones. Proto-C es una combinación del lenguaje de programación C/C++ y el API de los procedimientos del Kernel de OPNET. Es común que un proceso invoque a otros procesos para que hagan ciertas funciones secundarias, el proceso que invoca es el padre y los invocados son los hijos.

4.2 Descripción del modelo WiMAX

A finales del 2005 OPNET *Technologies* anunció la creación de un consorcio para el desarrollo de un modelo WiMAX para OPNET (de aquí en adelante, el modelo). El consorcio estaba y sigue estando

integrado por fabricantes de equipos de telecomunicaciones, proveedores de servicio, universidades y organizaciones de defensa. El desarrollo del modelo ha sido gradual, en un principio sólo soportaba las características más importantes de la versión fija y poco a poco se ha ido actualizando de forma que cada vez soporta más características del estándar 802.16e. Al final se pretende que tenga un soporte completo del estándar IEEE 802.16 en su versión móvil y de las características de WiMAX definidas por el foro WiMAX. Actualmente la Facultad de Ingeniería de la UNAM forma parte del consorcio internacional, y puede acceder al modelo para verificar su funcionalidad y agregar nuevas características. Esto es desde noviembre de 2006 y es un reconocimiento a la experiencia de la Facultad en el modelado de redes WiMAX: Diseño de Técnicas de Mejoramiento de Capacidad en Redes Inalámbricas de Banda Ancha Tipo Mesh, Técnicas de Mejoramiento de la Capacidad de Transmisión en Redes Inalámbricas de Banda Ancha.

Tabla 4-2. Características principales del modelo WiMAX para OPNET Modeler.

Capa	Característica
Enlace	Solicitud y asignación de ancho de banda Programador en la BS para el canal de subida y el canal de bajada Servicios de programación de transmisión ascendente para UGS, ertPs, nrtPS y BE Empaquetamiento y fragmentación MSDU Creación de tramas Consolidación de <i>grants</i> por CID básico Rectángulo de ráfagas Generación de mapas Subcapa de convergencia IP Configuración de los flujos de servicio y mapeado de tráfico a flujos de servicio ARQ Entrega de SDU's en orden ACKs acumulativos Fragmentación y empaquetamiento <i>Ranging</i> (Inicial y periódico) Selección de BS basada en escaneo HO duro
Física	TDD OFDMA, SOFDMA Valores predeterminados para OFDMA (FFT 128, 512, 1024, 2048) Interferencia co-canal Mapeado de subportadoras a subcanales Tablas precalculadas para la superposición de subportadoras Permutación de subportadoras Desvanecimientos por multirayectorias (Peatonal A, Peatonal B, Vehicular A y Vehicular B) Modelos de canal de estado finito de Markov Modelado de las pérdidas de propagación (Peatonal, Vehicular y Erceg)

Para el desarrollo de este estudio se está utilizando la versión 14 de *OPNET Modeler* y la versión del modelo liberada en febrero de 2008. De acuerdo al consorcio, esta versión soporta las características mostradas en la tabla 4-2. En el futuro está planeado que tenga soporte para modulación adaptativa, control de potencia y ARQ híbrido.

El modelo del consorcio fue diseñado bajo una arquitectura modular en la que se separan las funciones de la subcapa MAC CPS en dos planos: uno de control y otro de datos. El plano de datos es común para las estaciones base y las estaciones móviles, mientras que el plano de control es único en ambas. La estructura interna de las estaciones base y de las estaciones móviles se muestra en las figuras 4-1 y 4-2. Cada figura está dividida en cuatro secciones identificadas por una letra:

- A contiene la representación gráfica de la estación (base o móvil) en el editor de proyecto.
- B contiene el modelo de nodo, que está compuesto por una serie de módulos interconectados, que en conjunto forman a la estación. Cada uno de ellos representa a un protocolo (IP, BGP, ARP, ATM, PPP, etc.), aplicación (voz, video, Internet, etc.) o recurso (puerto transmisor, puerto receptor, CPU, etc.).
- C contiene al modelo de proceso del módulo WiMAX que describe el funcionamiento del plano de datos.
- D describe el modelo de proceso que describe el funcionamiento del plano de control.

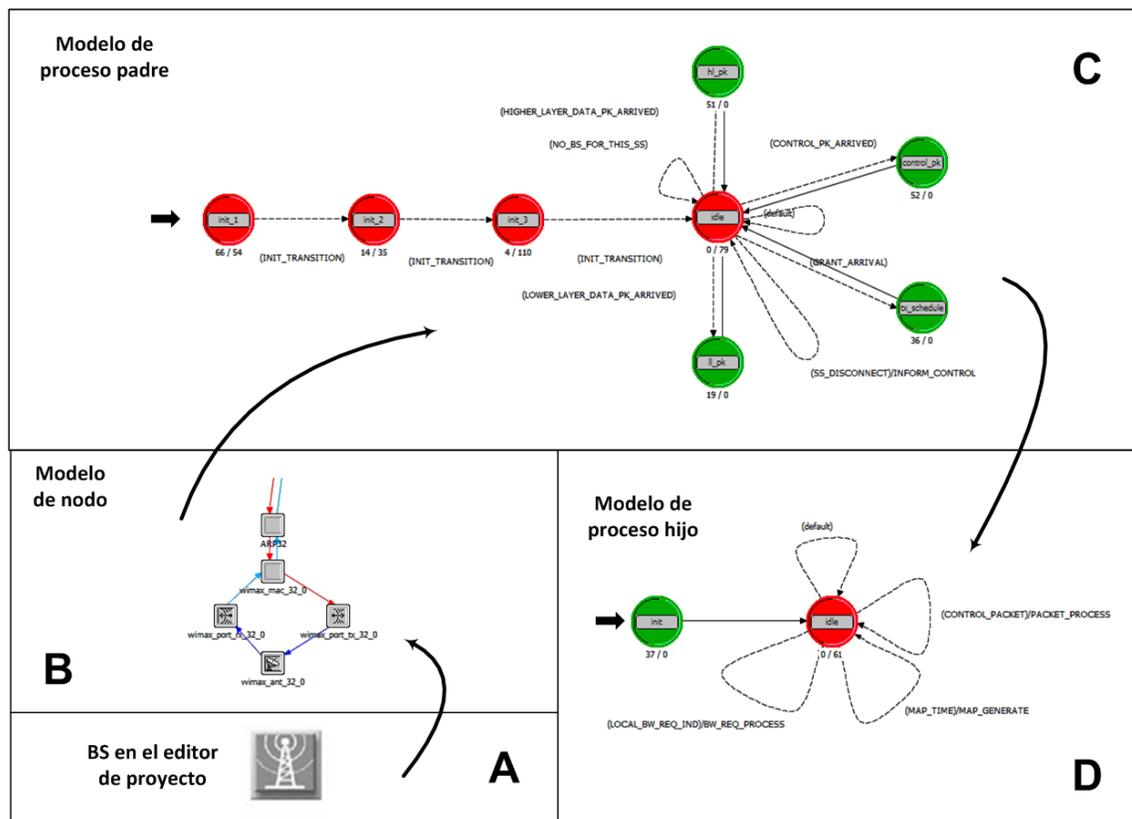


Figura 4-1. Estructura de una BS en el modelo.

Tabla 4-3. Planos de datos y de control.

Plano	Tipo de estación	Función	Estado/Sección
Datos	MS/BS	Clasifica y envía a la cola los paquetes provenientes de la capa superior	hl_pk
		Encola los paquetes provenientes de las capas inferiores	ll_pk
		Utiliza los <i>grants</i> provenientes del plano de control para transmitir paquetes	tx_schedule
		Invoca al plano de control cuando llega un paquete de este tipo	control_pk
Control	MS	Recibe los mensajes UL/DL-MAP y a partir de ellos: obtiene los <i>grants</i> destinadas a la MS, obtiene los <i>polls</i> y las oportunidades de contención que envía al plano de datos	1
		Crea y registra las conexiones a través de los mensajes DSA-REQ y DSA-RSP, respectivamente	3
		Establece y desecha las conexiones de control cuando termina el proceso de <i>ranging</i> o el de HO	3
		Asigna los <i>grants</i> de acuerdo al CID que se obtienen de la decodificación de los mapas y los envía al plano de datos	3
		<i>Handover</i>	2
		Escaneo	2
		<i>Ranging</i> inicial	1
		<i>Ranging</i> periódico	3
	BS	Genera periódicamente los mapas que envía en los mensajes UL/DL-MAP	idle
		Maneja el control de admisión de acuerdo a la capacidad disponible medida en símbolos de modulación	idle
		Programa las oportunidades de transmisión. Determina el orden de asignación de los <i>grants</i> para rtPS, nrtPS y BE; los <i>grants</i> para UGS y ertPS, y los <i>polls</i> son inyectados periódicamente sin pasar por el programador	idle
		Escaneo	idle
		<i>Ranging</i> inicial y periódico	idle
		<i>Handover</i>	idle

4.3 HO en el modelo WiMAX

Cómo se explicó en el capítulo 3, el HO puede llevarse a cabo en la capa 2 (L2-HO) y en la capa 3 (L3-HO). En la capa 2 básicamente puede ser tipo: *break-before-make* y *make-before-break*. En la capa 3 el estándar no define algún método para hacer el HO por lo que se puede utilizar cualquiera de los existentes: MIP, FMIP ó DHCP. Esta versión del modelo soporta únicamente el HO tipo *break-before-make* sin asociación en capa 2 y MIP en capa 3.

El procedimiento de L2-HO está definido en la sección 2 del plano de control de la MS. En la tabla 4-4 se presentan las principales características de la implementación de este proceso.

Tabla 4-4. Características de la implementación del HO.

Etapa	Características
Adquisición de la topología de red	Las BS's anuncian aquellas BS's que pertenezcan a su mismo vecindario y que tienen el mismo perfil físico.
	Las MS's sólo pueden hacer HO con las BS's que hayan sido anunciadas por su BS servidora.
	El escaneo puede ser iniciado por la MS o por la BS.
	Para que inicie el escaneo, la CINR de una BS vecina debe ser mayor a la de la BS servidora, y la diferencia debe ser mayor a cierto umbral.
	Las MS's sólo pueden escanear aquellas BS's que hayan sido anunciadas por su BS servidora.
	Una MS puede estar en tres estados: escaneando activamente, en el periodo de <i>interleaving</i> o no escaneando. Mientras este en el primer estado la BS servidora va a bloquear todo el tráfico dirigido a la MS, en los otros dos estados la operación es normal.
HO	El HO es iniciado por la MS cuando la CINR de una BS vecina es mayor a la de la BS servidora, y la diferencia es mayor a cierto umbral. Este umbral debe ser menor al del escaneo.
	La decisión del HO se basa únicamente en los resultados del escaneo de las BS's vecinas.
	La BS servidora retiene la conexión durante un tiempo por si el HO falla.

Una de las consecuencias de esta implementación es que sólo se pueden crear redes con un factor de reuso de 1-1-1. Más adelante se explica este parámetro y se presentan alternativas que se pueden usar para disminuir el efecto de la CCI.

Para el L3-HO se utiliza MIP, cuya operación se describe en el capítulo 4. La implementación de este protocolo no forma parte del modelo WiMAX sino que es parte de *OPNET Modeler*. El protocolo está implementado en cuatro modelos de proceso, de los cuales, tres se muestran en la figura 4-3. En la parte inferior se encuentra el modelo de proceso del nodo IP. Uno de sus procesos hijos es el administrador de MIP, que se ubica en la parte central izquierda. Es invocado al principio de la simulación cuando el nodo está configurado para usar MIP y se encarga básicamente de clasificar los paquetes IP. Ya que los clasifico invoca a un modelo de proceso hijo para manejarlo. Tiene dos procesos hijos: uno para el agente FA/HA, ubicado en la parte central derecha y el otro para el MN, que está en la parte superior. El modelo de proceso que no se incluye a la figura define el comportamiento del módulo "mobile_ip". Es el encargado de enviar y recibir los paquetes de MIP hacia/desde el administrador MIP.

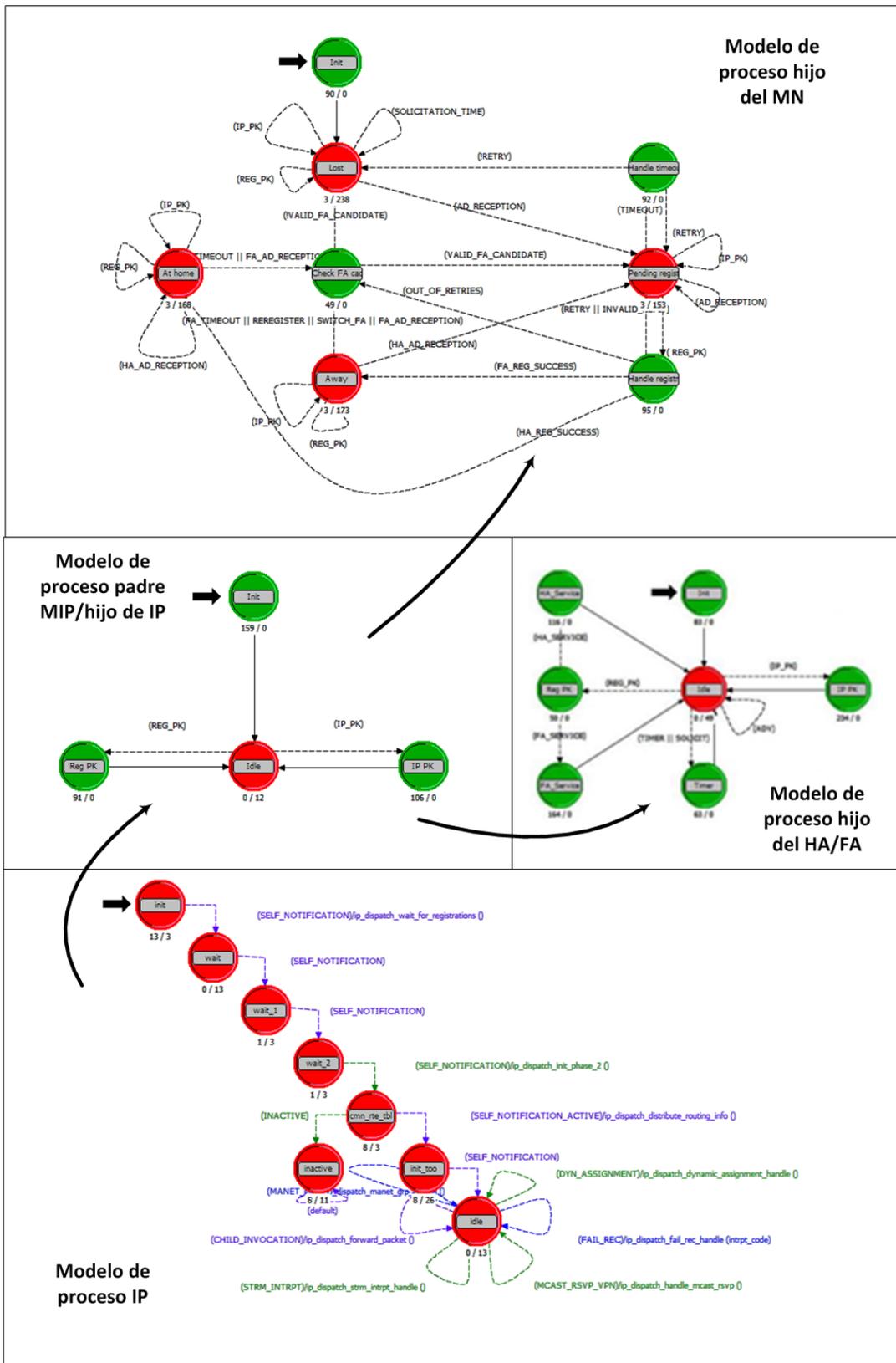


Figura 4-3. Implementación de MIP en el modelo.

La implementación de MIP en OPNET tiene ciertos problemas que no permiten que una BS pueda actuar como HA y FA a la vez. A continuación se describen las modificaciones hechas para corregir el problema junto con su justificación:

- Cuando llega un paquete IP a un agente configurado como HA/FA, es necesario determinar si el agente debe actuar como HA o como FA. En la implementación del protocolo en OPNET no lo hace, por lo que nunca se crean los túneles. Por ello la modificación consiste en hacer que el agente verifique si la dirección IP destino pertenece a su misma subred, si es así actúa como HA, sino actúa como FA.
- Cuando un MN se registra con un FA, éste le asigna como *care-of address* la dirección IP de la interfaz a la que está conectada su interfaz aérea WiMAX. De esta forma cuando el HA recibe un paquete destinado al MN lo reenvía a esa interfaz. Ésta lo recibe y sustituye la dirección IP destino por la de *broadcast* de su subred. Esto resulta en un desperdicio de recursos porque todas las MS's asociadas a esa BS van a recibir y desechar paquetes que originalmente no estaban destinados hacia ellas. La modificación consiste en sustituir la dirección IP destino por la dirección IP *home address* de la MS visitante en lugar de la de *broadcast*.
- Cuando un MN está registrado a un HA o a un FA, periódicamente espera recibir mensajes IRDP que anuncien su presencia. Sólo hasta que transcurre cierto intervalo de tiempo sin que reciba un mensaje de este tipo, inicia el proceso de registro con el agente del que recibió el último anuncio. Esto va a provocar que cuando una MS haya hecho un HO, a pesar de que reciba un mensaje IRDP de su nueva BS servidora, espere hasta que expire el tiempo de llegada de paquetes de la BS servidora anterior. Este modo de operación prolonga sustancialmente la latencia del L3-HO, por lo que la modificación consiste en que en cuanto llegue un anuncio de algún otro agente inmediatamente inicie el proceso de registro.

4.4 Conclusiones

Como se vio en este capítulo, los simuladores basados en eventos discretos, como OPNET, permiten analizar con resultados bastante cercanos a la realidad el comportamiento de cualquier tipo de red de comunicaciones.

Existe un consorcio encargado de desarrollar un modelo WiMAX móvil para OPNET. Con el paso del tiempo han ido mejorándolo agregándole más características que forman parte de WiMAX. Actualmente soporta muchas características como el uso de SOFDMA, modelado de CCI, modelado de multitraectorias, ARQ, generación de mapas, servicio de programación, creación de tramas, *ranging*, HO duro sin asociación, entre otras tantas.

Las principales limitantes del modelo para los estudios que se quieren realizar son la falta de soporte al HO duro con asociación, al HO suave, y a FMIP. También falta la comunicación entre BSs y que soporte planeación de frecuencias ó reuso fraccional de frecuencias.

Análisis del Comportamiento Dinámico

En éste capítulo se explica en qué consisten las simulaciones y que se espera obtener con ellas. Se presenta una descripción de los parámetros principales de cada escenario y se explica el procedimiento y los criterios utilizados para elegirlos. Se describen los parámetros utilizados para medir el efecto del HO en el desempeño de la red. Se presentan y analizan los resultados de las simulaciones. Se lleva a cabo un análisis detallado de la implementación del HO en el modelo. Y se formulan conclusiones.

5.1 Descripción de las simulaciones

El propósito de este estudio es conocer el comportamiento de una red WiMAX en un ambiente de movilidad. Específicamente se busca conocer el impacto del proceso de HO en el desempeño de la red bajo diferentes condiciones. Para hacerlo se hacen una serie de simulaciones basadas en dos escenarios, uno simple y uno “realista”. En todas las simulaciones se transmite tráfico de voz porque es el más sensible a los efectos del HO. Para cada escenario se hace una simulación con QoS BE y otra con UGS.

En el escenario simple una MS se desplaza del rango de cobertura de una BS al de otra. Sirve para conocer detalladamente cómo se lleva a cabo el proceso HO en el modelo, para tener una idea clara de cómo afecta a la comunicación y cómo se puede medir su impacto. En el escenario “realista” hay siete BSs, en cuyas áreas de cobertura hay cinco MSs con libertad de movimiento. Sirve para conocer los efectos del HO en el desempeño general de la red, con él no se busca estudiar los efectos sobre la comunicación de alguna MS en particular, sino el efecto global.

5.2 Descripción de los escenarios

El escenario simple se muestra en la figura 5-1. Está formado por dos BSs representadas por una torre irradiando dentro de un cuadro gris (BS_blue y BS_red), una MS representada por una computadora portátil (MS_red), un servidor multipropósito representado por un gabinete (Server) y una nube por la que circula tráfico IP (IP_cloud). Las estaciones base están conectadas a la nube de tráfico IP a través de un enlace DS3 (44.7Mbps) utilizando el protocolo PPP, la nube de tráfico IP está conectada al servidor a través de un enlace del mismo tipo. A lo largo de la simulación la MS se va desplazando en una trayectoria recta una distancia de 1.1km a una velocidad constante de 90 km/h. Cada BS está en una subred diferente. En algún momento va a ocurrir un L2-HO y un L3-HO.

El escenario “realista” se muestra en la figura 5-2. Está formado por siete BSs conectadas a un *backbone* a través de un enlace DS3 utilizando el protocolo PPP. A su vez, el *backbone* está conectado a una nube de tráfico IP a través de un enlace OC12 (594.43Mbps) utilizando también PPP. La nube está conectada a un servidor de voz a través de un enlace DS3 con el mismo protocolo. Cada BS está en una subred distinta y tiene cinco MSs en su rango de cobertura. Desde el segundo 50 las MSs se pueden desplazar en trayectorias aleatorias con una rapidez constante de 40 km/h. Los límites del movimiento están marcados por el rectángulo que contiene casi toda el área de cobertura de las BSs. El motivo por el que las MSs no se mueven desde el inicio de la simulación es que se necesita cierto tiempo para que se formen las tablas de ruteo.

Ambos escenarios tienen una configuración de red similar a la de la figura 3-2B. Cada BS tiene un *Acces Router* integrado. La diferencia es que el *Home Agent* no se encuentra del otro lado de la nube IP, en la *Connectivity Service Network*, sino que es la BS con la que la MS se asocia al principio de la simulación. Por esta razón todas las BSs deberán actuar como HA y FA de forma simultánea.

El propósito del servidor en ambos escenarios es recibir todo el tráfico de voz y enviar tráfico del mismo tipo en la misma proporción, es decir, el tráfico que envíe una MS hacia el servidor será el tráfico que el servidor le enviara de regreso.

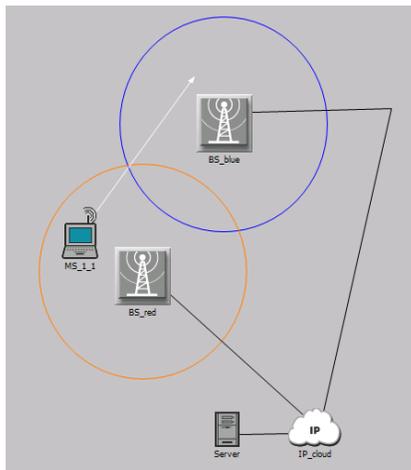


Figura 5-1. Escenario de simulación simple para el análisis del proceso de HO.

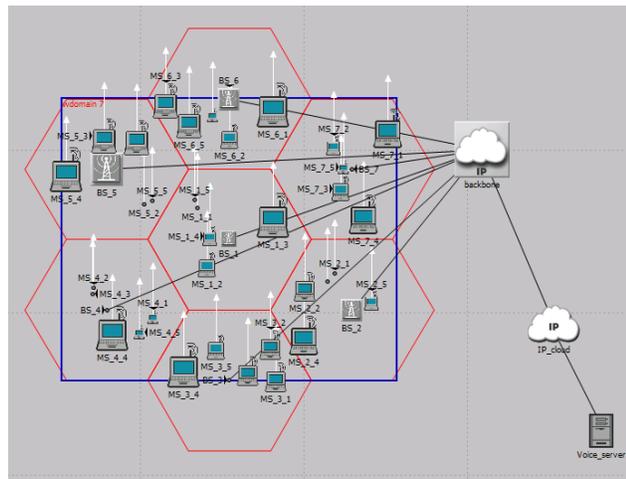


Figura 5-2. Escenario de simulación realista para el análisis del proceso de HO.

A continuación se describen los criterios y procedimientos utilizados para elegir la configuración de ambos escenarios, un resumen con los parámetros escogidos se muestra en la tabla 5-1.

Las redes celulares están formadas por celdas que pueden ser agrupadas en clústeres de acuerdo a la banda de frecuencias en la que operan. A su vez, cada celda puede ser dividida en sectores y cada sector puede operar en una banda de frecuencias distinta. El factor de reuso de frecuencias se expresa a través de

la terna N-S-K, donde N es el número de celdas por clúster, S es el número de sectores por celda y K es el número de bandas de frecuencia por celda [12].

El factor de reuso se utiliza para minimizar la interferencia co-canal (CCI) provocada por celdas que operan en la misma banda de frecuencias. Mientras más grande sea el número de celdas en un clúster, habrá mayor separación espacial entre las celdas que operen en la misma banda de frecuencias y la CCI será menor.

Tabla 5-1. Parámetros principales del escenario.

Parámetro	Escenario simple	Escenario “realista”
Factor de reuso de frecuencias	1-1-1	1-1-1
Radio de las celdas	0.65 km	0.4 km
Ancho de banda por canal	10 MHz	10 MHz
Banda de frecuencias	2.4 GHz	2.4 GHz
Modelo de pérdidas de propagación	Vehicular	Vehicular
Modelo de pérdidas por multitrayectoria	Vehicular - A	Vehicular - A
Potencia radiada BS	2W (33 dBm)	1.5W (31.76 dBm)
Potencia máxima radiada SS	0.5W (27 dBm)	0.5W (27 dBm)
Antena BS	15 dBi, 40m sobre el suelo SISO (1x1)	15 dBi, 40m sobre el suelo SISO (1x1)
Antena MS	-1 dBi, 1m sobre el suelo SISO (1x1)	-1 dBi, 1m sobre el suelo SISO (1x1)
σ fluctuaciones lentas	8 dB	8 dB
Modulación y tasa de codificación de canal	QPSK 3/4	QPSK 1/2
N_{FFT}	1024	1024
Duración de símbolos OFDM	102.9 μ s ($n=28/25$, $\Delta f = 10.94$ kHz, $T_g = T_b/8$)	102.9 μ s ($n=28/25$, $\Delta f = 10.94$ kHz, $T_g = T_b/8$)
Duplexaje	TDD	TDD
Duración tramas	5 ms	5 ms

En los sistemas celulares convencionales se pueden encontrar factores de reuso de frecuencias de hasta siete celdas por clúster (en AMPS). Sin embargo, la tendencia en los nuevos sistemas celulares, incluyendo WiMAX, es que haya pocas celdas por clúster. La razón de esto es económica, un factor de reuso de N requiere N veces más espectro que uno unitario, y el espectro es un recurso escaso y caro.

Para ambos escenarios se utiliza un factor de reuso de frecuencias de 1-1-1, es decir, sólo hay un clúster (todas las celdas operan en la misma banda de frecuencias), y cada celda tiene sólo un sector que opera a una banda de frecuencias. Normalmente en los sistemas que no utilizan espectro disperso, esta configuración conlleva una *Co-Channel Interference* (CCI) muy grande que provoca en los usuarios que se encuentre en los bordes de las celdas una degradación en la calidad de su conexión. Sin embargo, WiMAX móvil puede operar con esta configuración gracias a que los usuarios utilizan sub-canales, que

sólo ocupan una fracción del ancho de banda total, y que pueden ser asignados de tal forma que resuelva el problema de la interferencia en los bordes de las celdas, a través del reuso fraccional de frecuencias. Más específicamente, los usuarios que están cerca de la BSs ocupan todos los sub-canales, y los que están en el borde de cada celda ocupan una parte de los sub-canales disponibles; a cada celda se le asigna dinámicamente el grupo de sub-canales que va a tener disponible en su borde.

Desgraciadamente esta versión del modelo de WiMAX sólo puede operar con un factor de reuso de 1-1 y no tiene soporte para el reuso fraccional de frecuencias. Lo primero se debe a que las MSs sólo pueden operar en una banda de frecuencias, y aunque pudieran cambiarla no podrían hacer HO con una BS que operara en otra banda debido a que una BS sólo anuncia aquellas BSs vecinas que operan en su misma banda, y una MS sólo puede escanear y hacer HO con una BS vecina que haya sido anunciada por su BS servidora. Para que soportara un factor de reuso distinto, habría que modificar el contenido de los NBR-ADV para que incluyeran aquellas BSs que operan en otras bandas y la banda en la que operan. En base a esa información, las MSs podrían modificar su frecuencia de operación para los escaneos y para el HO.

De haber incluido soporte para reuso de frecuencias, se habría elegido una configuración de 1-3-3 o de 3-1-1, sacrificando ancho de banda a cambio de CCI baja. La mejor alternativa sería incluir el soporte para el reuso fraccional de frecuencias que permitiría utilizar el factor de 1-1-1 con niveles de CCI bajos y sin sacrificar valioso espectro, sin embargo, esta modificación queda fuera del alcance de este proyecto. Para promediar el efecto de la CCI se elige una base de permutación distinta en cada BS.

Como el modelo de simulación aún no tiene soporte para la modulación adaptiva, tanto la estación móvil como las estaciones base transmiten con un esquema de modulación fijo. Anticipando los efectos de la CCI se elige QPSK porque es la modulación más robusta de WiMAX móvil, y una tasa de codificación de canal de 3/4 en el primer escenario y de 1/2 en el segundo.

El radio de las celdas se determina en función de dos factores: los requerimientos de cobertura y los requerimientos de capacidad. El primer factor depende de las pérdidas de propagación, de las fluctuaciones rápidas (multitrayectorias) y de las fluctuaciones lentas (obstáculos cuyo tamaño es igual o mayor a varias longitudes de onda); el tamaño de la celda debe ser tal que cualquier estación móvil en su interior tenga una CINR mínima. El segundo factor depende de la densidad de datos (que se expresa normalmente en Mbps por km²); el tamaño de la celda debe ser tal que la capacidad de la estación base sea mayor o igual a la demanda de datos de las estaciones móviles en su interior. Ambos escenarios son diseñados para que los requerimientos de transmisión/recepción sean menores a la capacidad de la celda por lo que el único factor que va a limitar al radio de la celda es la cobertura.

Otro factor que se debería tomar en cuenta al momento de elegir el radio es la CCI. Cuando se elige un factor con más de una celda por clúster, cuanto mayor sea el radio de la celda tanto mayor la separación espacial entre celdas que operen en la misma banda y tanto menor la CCI.

Entonces, se define la siguiente metodología basada únicamente en la propagación:

- 1) Obtener la gráfica de SNR contra distancia. Esta se puede hacer de forma teórica o se puede obtener directamente del simulador. En forma teórica, estaría dada por:

$$SNR = P_{rx} - N$$

donde SNR es la relación señal a ruido (dB), P_{rx} la potencia recibida (dBm) y N el ruido (dB).

$$P_{rx} = P_{tx} + G_{tx} + G_{rx} - PL - L_c$$

donde P_{tx} es la potencia transmitida (dBm), G_{tx} es la ganancia del transmisor (dBi), G_{rx} es la ganancia del receptor (dBi), PL son las pérdidas de propagación del modelo vehicular (dB) y L_c las pérdidas en los conectores (dB).

$$PL = 40(1 - 0.004 \cdot \Delta h_{bs}) \log_{10}(d) - 18 \log_{10}(\Delta h_{bs}) + 21 \log_{10}(f) + 80$$

donde Δh_{bs} es la diferencia entre la altura de la BS y la altura promedio de los tejados (m), f es la frecuencia central (MHz) y d es la distancia entre la MS y la BS (km).

$$N = 10 \log_{10}(T \cdot BW \cdot K_o) + NF + 30$$

donde T es la temperatura (K), BW es el ancho de banda del canal (Hz), K_o es la constante de Boltzmann (J/K) y NF es el factor de ruido del receptor (dB).

A esta expresión habría que agregar los efectos de las fluctuaciones lentas y de las multitrayectorias.

- 2) De la gráfica se elige una distancia para la cual $SNR \geq SNR_{min} + \sigma$. Donde σ es la desviación estándar de las fluctuaciones lentas, modeladas a través de una variable aleatoria con una distribución normal de media cero. SNR_{min} depende del tipo de modulación y de la tasa de codificación de canal, y está marcada en la tabla 266 del estándar que se incluye en la tabla 5-2.

Tabla 5-2. Suposiciones de SNR [1].

Modulación	Tasa de codificación	SNR _{min} (dB)
BPSK	1/2	3.0
QPSK	1/2	6.0
	3/4	8.5
16-QAM	1/2	11.5
	3/4	15.0
64-QAM	2/3	19.0
	3/4	21.0

A continuación se ilustra el procedimiento seguido para el primer escenario. La gráfica de SNR contra distancia obtenida a través del simulador se muestra en la figura 5-3, la SNR debe ser mayor a 16.5dB (8.5dB es la SNR_{min} para QPSK 3/4 y σ de las fluctuaciones lentas es 8dB). De ella se observa que la SNR es mucho mayor a la mínima requerida a distancias mayores a 1km, pero para reducir la duración de las simulaciones se elige un radio de 0.65km.

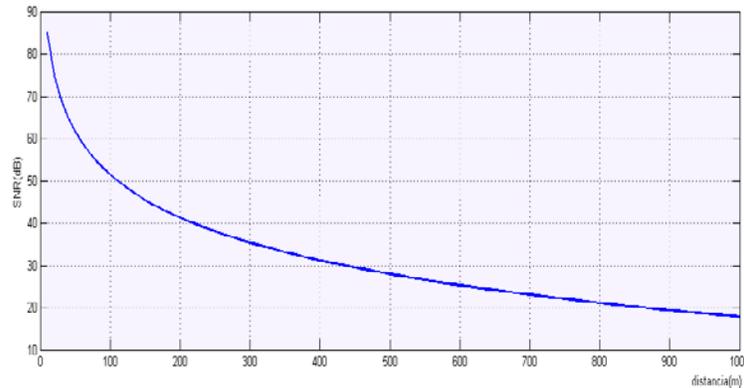


Figura 5-3. SNR contra distancia para el modelo de propagación Vehicular en el primer escenario.

Para el segundo escenario lo único que cambia es que la potencia de transmisión de las BSs es menor. Como se elige una tasa de codificación de canal mayor también es posible tener radios mayores a 1km, pero se elige un radio de 0.4km.

En un escenario real habría convenido utilizar el radio más grande posible con el fin de utilizar el menor número de BSs posibles. Además en la elección de este factor no se consideró la CCI porque se está utilizando un factor de reuso de 1-1-1, si se tuviera uno de 3-1-1 sería conveniente hacer el radio lo más grande posible, para lograr una mejor separación espacial entre celdas que operan en la misma banda de frecuencias. Para optimizar la elección habría de considerarse la CINR en lugar de la SNR.

Para la elección de la potencia de transmisión y la ganancia de las antenas, se utilizaron los valores recomendados en [12]. En una situación real habría que tomar en cuenta que el PIRE máximo establecido por la COFETEL es de 1 Watt para la banda escogida.

Para el rango de frecuencias de operación se elige un perfil aprobado por el foro WiMAX que opera en la banda de 2.4GHz, ancho de banda por canal de 10MHz, duración de tramas de 5ms, 1024 subportadoras, factor de muestreo de 28/25, prefijo cíclico de 1/8, y esquema de duplexaje TDD [11]. Con estas características se obtiene una duración de los símbolos OFDM de 102.9 μ s, a través de [19]

$$T_s = \left(\frac{1}{BW \cdot n} \right) \cdot N_{FFT} \cdot (1 + T_g)$$

donde T_s representa la duración de un símbolo OFDM, BW el Ancho de banda del canal, n el factor de muestreo, N_{FFT} el número de subportadoras, y T_g el prefijo cíclico

5.3 Descripción del tráfico

En el escenario simple MS_1_1 genera tráfico de voz utilizando el CODEC G.711. En él, la señal de voz es muestreada cada 125 μ s y cuantificada en palabras de 8 bits, generando así una tasa de transmisión de 64 kbps[4]. Como se muestra en la tabla 5-3, cada 10ms se genera un mensaje de voz que es enviado a las capas inferiores, en cada mensaje se agrupan 80 muestras de 8 bits que hacen que el tamaño del paquete generado sea de 640 bits (80 bytes).

Tabla 5-3. Características principales del tráfico del escenario simple.

Tipo de tráfico	Intervalo entre llegada de mensajes de voz	Tamaño del mensaje de voz	Tasa
VoIP G.711	10ms	640bits	64kbps
VoIP GSM-FR	20ms	264bits	13.2kbps

En el escenario “realista” las MSs generan tráfico de voz utilizando el CODEC *Global System for Mobile communication Full Rate* (GSM-FR). Utiliza el principio de codificación *Regular Pulse Excitation - Long Term Prediction* (RPE-LTP) para comprimir una señal de voz *Pulse Code Modulation* (PCM). Cada 20ms genera un mensaje de voz que es enviado a las capas inferiores, en cada mensaje se agrupan 160 muestras comprimidas que hacen que el tamaño del paquete generado sea de 264 bits (33 bytes). Sus características principales se presentan también en la tabla 5-3.

En ambos casos, el mensaje es enviado a la capa de transporte, en donde el protocolo *User Datagram Protocol* (UDP) le agrega un encabezado de 20 bytes. El segmento formado es enviado a la capa de red, en donde el protocolo IP le agrega un encabezado de 20 bytes y le asigna un tipo de servicio de voz interactiva. El paquete formado es enviado a la capa de acceso a la red, en donde el protocolo WiMAX le agrega un encabezado MAC de 6 bytes. Finalmente en el escenario simple a la capa física va a llegar una trama de 126bytes cada 10ms y en el “realista” una trama de 79 bytes cada 20ms. Esto se traduce en una tasa de 100.8kbps para el primero y 31.6 para el segundo. El proceso completo de encapsulamiento para G.711 se muestra en la figura 5-4 y para GSM-FR en la 5-5.

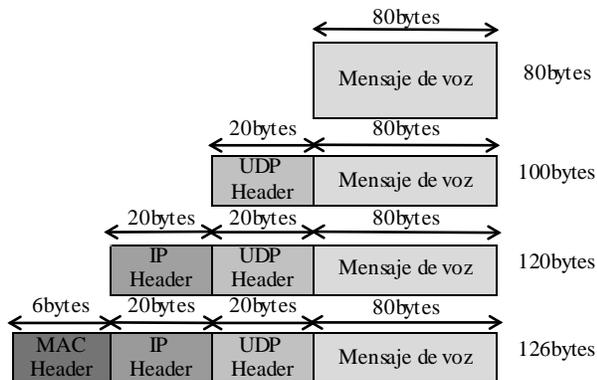


Figura 5-4. Encapsulamiento del mensaje de voz para el escenario simple.

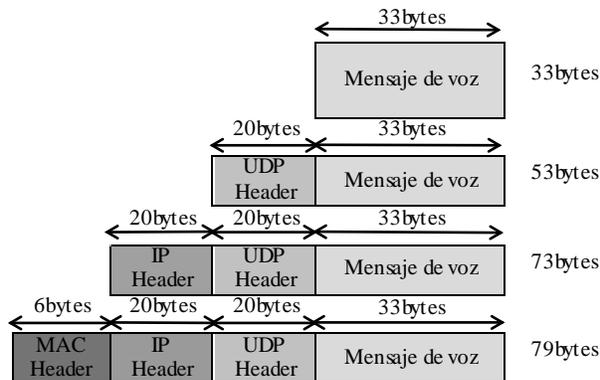


Figura 5-5. Encapsulamiento del mensaje de voz para el escenario "realista".

5.4 Descripción de los parámetros de medición

Antes de presentar los resultados de las pruebas se presenta en la tabla 5-4 el significado de los indicadores de operación de la red utilizados en ellas. Como las gráficas contienen los nombres en inglés se presentan los nombres tanto en español como en inglés.

Tabla 5-4. Indicadores de la operación de la red.

Indicador	Significado
Retraso extremo a extremo / Latencia (<i>ETE delay</i>)	Tiempo que transcurre desde que un paquete es recibido por la capa WiMAX MAC del nodo WiMAX fuente, hasta su recepción en la capa WiMAX MAC del nodo WiMAX destino. En este escenario el nodo fuente es la MS y el destino es alguna de las BS. Dado que la latencia por atravesar la nube IP fue configurada para ser cero, la latencia desde la MS hasta el servidor sería la misma
Carga de tráfico (<i>Traffic Load</i>)	Tráfico de datos exitosamente enviado por la capa WiMAX MAC hacia la capa física
Throughput	Tráfico de datos total exitosamente recibido y reenviado a la capa superior por la capa MAC de WiMAX
Estado del modo de escaneo (<i>Scanning Interval Activity</i>)	Indica el estado actual del modo de escaneo para una MS. Puede tomar tres valores: el -1 representa que el modo de escaneo está desactivado, el 0 que está en el periodo de <i>interleaving</i> (operación normal mientras el modo de escaneo está activado) y el +1 que la MS está escaneando
Tamaño de la cola (<i>Queue size</i>)	Indica el tamaño de la cola que almacena todos los paquetes de datos recibidos de la capa superior hasta que son transmitidos
Tráfico desechado (<i>Traffic Dropped</i>)	Tráfico de capas superiores desechado por la capa WiMAX MAC debido a sobreflujo en el buffer de datos
Latencia del Handover (<i>Handover delay</i>)	Tiempo que transcurre desde que la MS envía un mensaje MOB_MSHO-REQ hasta que el ranging inicial con la nueva BS servidora es completado exitosamente

A continuación se presentan los resultados de dos simulaciones que utilizan el escenario que se acaba de describir. En base a la simulación del escenario simple, se hace un análisis detallado de la forma en que está implementado el modelo.

5.5 Resultados del escenario simple

UGS es un tipo de servicio de programación de transmisión ascendente que tiene una tasa de transmisión fija, asegurada a través de oportunidades de transmisión emitidas en ciertos intervalos periódicos. En la simulación cada 10ms se genera un *grant* de 126 bytes para esta conexión.

En la figura 5-6 se observa el tráfico enviado por MS_1_1 a su capa física, el recibido por la capa WiMAX MAC de la BS_red y el recibido por la capa WiMAX MAC de la BS_blue. MS_red envía tráfico a una tasa prácticamente constante de 100pps (paquetes por segundo) hasta el segundo 120. Después hay una ligera variación entre el tráfico enviado y el recibido hasta el segundo 134. A partir de ese instante, el tráfico recibido cae de forma lineal hasta que se vuelve cero en el segundo 138. Desde el segundo 134, BS_blue empieza a recibir tráfico de MS_1_1 y va aumentando en forma lineal hasta que en el segundo 138 se estabiliza alrededor de los 100pps.

En la figura 5-7 se presenta el tráfico que recibe MS_1_1 de su capa física, el que envía la capa MAC de BS_red y el que envía BS_blue. Hasta el segundo 120, BS_red envía tráfico a una tasa constante de 100pps y MS_1_1 recibe tráfico a la misma tasa. Después el tráfico recibido es ligeramente menor al tráfico enviado, hasta que en el segundo 134 empieza a disminuir. En el segundo 138 el tráfico enviado por BS_red y el recibido por MS_1_1 llega a ser nulo. Desde ese instante y hasta el 142 ningún nodo envía ni recibe tráfico. A partir del segundo 142, BS_blue envía tráfico a MS_1_1. Aumenta hasta el segundo 146 en el que se estabiliza en 100pps.

De las figuras se hacen las siguientes observaciones:

- 1) Entre el segundo 134 y el 138 ocurre un HO, extrañamente no hay un instante en el que la BS servidora deje de recibir tráfico y otro en el que la BS objetivo empiece a recibir, como debe ocurrir en un HO tipo *break-before-make*.
- 2) El envío de tráfico en el canal UL es prácticamente ininterrumpido, en cambio, el envío de tráfico en el DL se interrumpe durante casi 4 segundos.
- 3) En ambas figuras, un poco antes de que caiga el tráfico hay una variación entre el tráfico enviado y el recibido.

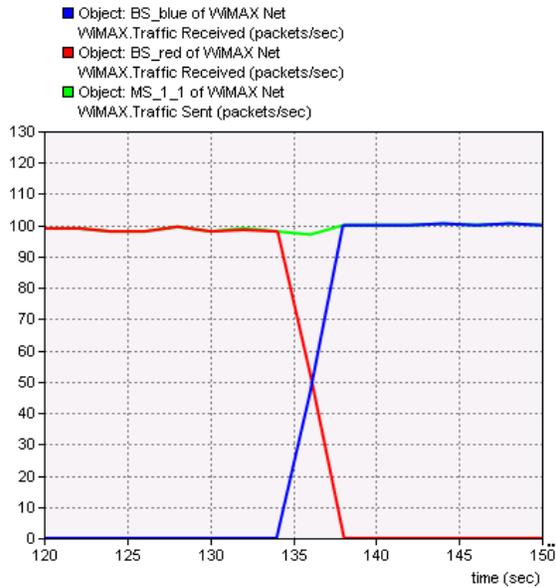


Figura 5-6. Tráfico que envía MS_1_1 (claro), que recibe BS_red(oscuro) y que recibe BS_blue (muy oscuro) en el escenario simple bajo UGS.

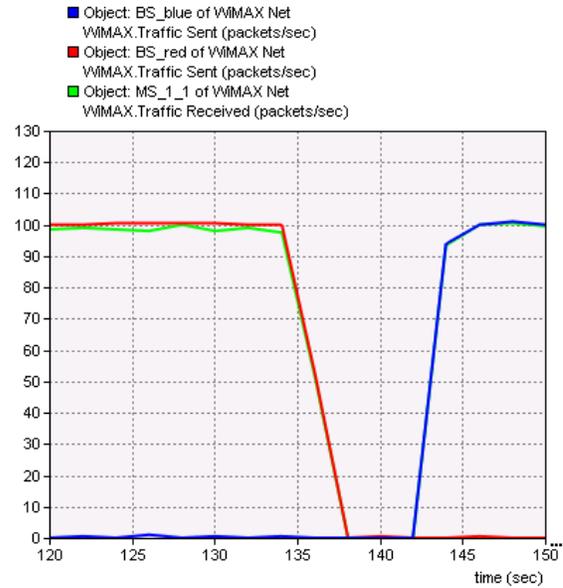


Figura 5-7. Tráfico que recibe MS_1_1 (claro), que envía BS_red (oscuro) y que envía BS_blue (muy oscuro) en el escenario simple bajo UGS.

Para aclarar el segundo y el tercer punto es necesario examinar más parámetros y hacer un análisis detallado de la forma en que ocurrió el proceso de HO. En cuanto al primer punto, el hecho de que no haya una clara interrupción de la comunicación durante el HO se debe a la forma en la que el simulador integra las estadísticas. Cada 400 muestras (2 segundos en este caso) el simulador obtiene, registra el promedio y forma la gráfica interpolando las muestras. Considerando que el HO ocurre en el segundo 137, y que tomó muestras en los segundos 136, 138 y 140 es posible entender el resultado: en el intervalo que va del segundo 136 al 138 el tráfico recibido por BS_red es 100pps y por BS_blue 0; en el que va del segundo 138 al 140 el recibido por BS_red y por BS_blue es similar porque aproximadamente a la mitad del intervalo ocurre el HO; en el intervalo que va del segundo 140 al segundo 142 el recibido por BS_red es 0pps y por BS_blue de 100pps. Haciendo la interpolación de las muestras se obtiene la Figura 5-6. Entonces, para observar claramente el efecto *break-before-make* en el HO, sólo hay que disminuir el periodo de muestreo.

En la figura 5-8 se presenta el estado del modo de escaneo. La MS escanea a las BSs vecinas para determinar si alguna podría ser adecuada para ser la BS objetivo en caso de que se necesitara hacer un HO. Este intervalo se caracteriza por tres parámetros, definidos en la configuración del escenario y enviados en el mensaje MOB_SCN-RSP: duración del escaneo (en la simulación 5 tramas), duración del intervalo de *interleaving* (en la simulación 240 tramas) e iteraciones de escaneo. Durante el escaneo la MS no puede enviar ni recibir paquetes de datos por lo que los paquetes destinados a ella deben ser

encolados en la BS servidora y los paquetes que requiera enviar deben ser almacenados en su propia cola. En el intervalo de *interleaving* la transmisión es normal, es decir, la MS puede enviar y recibir paquetes de datos incluyendo los que estén en la cola, si es que hay algunos.

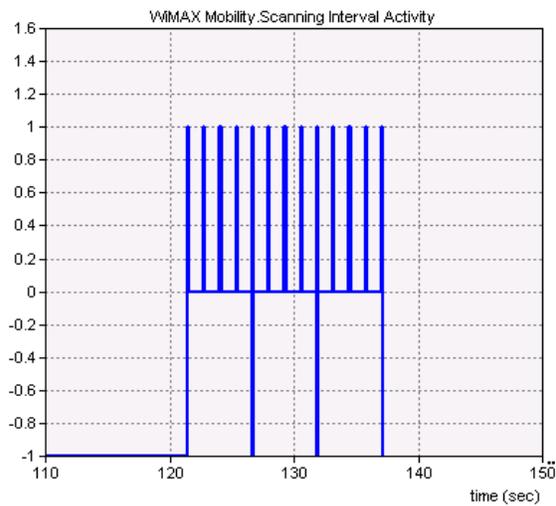


Figura 5-8. Modo de escaneo de MS_1_1 en el escenario simple bajo UGS.

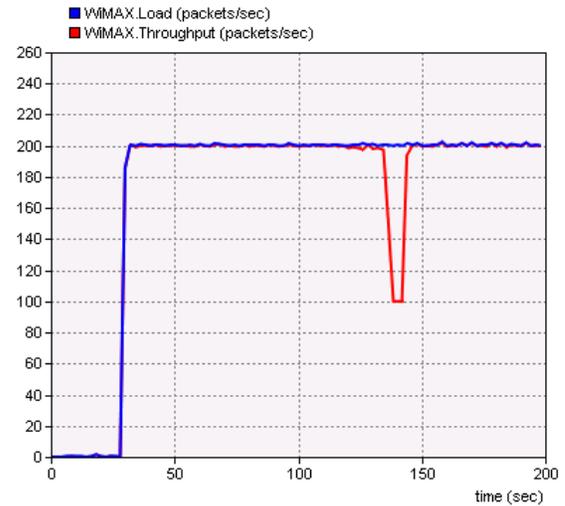


Figura 5-9. Tráfico total enviado (oscuro) y recibido (claro) por las capas WiMAX MAC en el escenario simple bajo UGS.

En toda la simulación, el modo de escaneo se activa en tres ocasiones consecutivas. La primera desde el segundo 121 hasta el 126, la segunda desde el 126 hasta el 132, y la tercera desde el 132 hasta el 137. Durante cada intervalo MS_1_1 escanea 5 veces a BS_blue.

En la figura 5-9 se observa una gráfica global que muestra la carga total que recibieron de las capas superiores las capas WiMAX en todos los nodos WiMAX de la red. La carga es de 200pps a partir del segundo 28, y en ella se tiene el tráfico de voz que MS_1_1 envía al servidor y por el que este le responde y envía a través de las BSs. También se tiene el *throughput* global, que es el tráfico total que las capas WiMAX MAC en todos los nodos WiMAX enviaron a sus capas superiores. El *throughput* global es igual a la carga global hasta el segundo 138, en el que se reduce a la mitad. Hasta el segundo 142 se mantiene en 100, después aumenta hasta el segundo 146, en el que se estabiliza nuevamente en 200pps.

El escaneo provoca que haya una pequeña variación entre el tráfico enviado y recibido. Volviendo a la figura 5-9 se puede observar que aproximadamente desde el segundo 121, el mismo en el que inicia el escaneo, hasta el segundo 134 se produce la variación entre el tráfico enviado y el recibido de 1pps. Esto se debe a que en este intervalo MS_1_1 escanea activamente durante ciertos periodos en los que deja de recibir/enviar paquetes de/hacia BS_red. Como los periodos de escaneo activo duran 5 tramas (25ms) solo se va a perder un paquete (dado que se genera uno cada 20ms) cada 240 tramas (1.2segundos). Con lo que se esclarece el tercer punto de las observaciones.

En la figura 5-9 se presenta lo mismo que las figuras 5-6 y 5-7, pero combinado. MS_1_1 envía 100pps de forma prácticamente ininterrumpida, en cambio, el tráfico enviado por las BSs se interrumpe del segundo 138 al 142 lo que reduce el *throughput* global de 200pps a 100 durante ese intervalo.

En la figura 5-10 se presenta el tráfico desechado por la capa WiMAX MAC de BS_red, desde el segundo 137.8 hasta 141.6 que es de 100pps. El tráfico desechado por BS_blue no se incluye porque es nulo durante toda la simulación.

En la figura 5-11 se observa la latencia de los paquetes de voz. Durante casi toda la simulación es de 68ms, excepto en el intervalo en el que ocurre el HO en el que llega a valer 68.6ms. En cualquier instante la latencia es menor a 150ms [18] por lo que sería posible transmitir voz sin los problemas derivados de altas latencias.

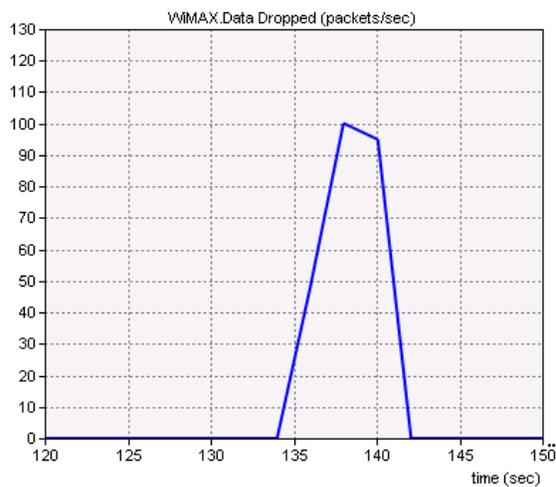


Figura 5-10. Tráfico desechado por BS_red en el escenario simple bajo UGS.

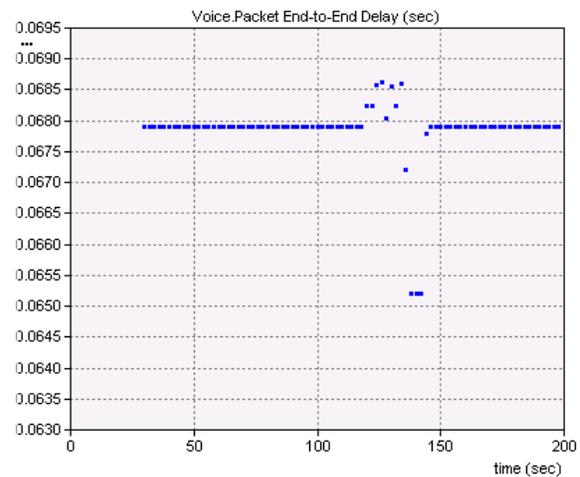


Figura 5-11. Latencia de los paquetes de voz en el escenario simple bajo UGS.

Con la información presentada hasta el momento es posible tener una idea clara de por qué el HO afecta de forma distinta al UL que al DL.

La comunicación en el DL se interrumpe desde segundo 138 al 142 y los paquetes que deberían haber llegado a MS_1_1 en ese intervalo son desechados por BS_red. Ello sugiere que en el segundo 137 MS_1_1 hace un L2-HO. El algoritmo MIP detecta el cambio de agente hasta alrededor del segundo 141.6, y solicita la creación del túnel. Mientras tanto los paquetes enviados por el servidor siguen llegando a BS_red, y como ésta ya no está conectada con MS_1_1 desecha los paquetes. En cuanto BS_blue le envía la solicitud de registro, crea el túnel y empieza a reenviar los paquetes a BS_blue.

En el UL, en cuanto se establece la comunicación en capa 2, BS_blue acepta los paquetes de MS_1_1 a pesar de que la dirección IP origen no está en su misma subred. Por lo tanto, la interrupción en la comunicación debido al HO debe ser únicamente la que se produce en la capa 2.

A continuación se presentan los resultados para la simulación del escenario simple con BE. Es un tipo de servicio de programación de transmisión ascendente en el que la MS debe contender por las oportunidades de transmisión. En el UL-MAP existe una región en la que cualquier MS que necesitara una oportunidad de transmisión podría colocar una solicitud de ancho de banda. El problema con este método es que si dos MSs deciden colocar una solicitud de ancho de banda en el mismo símbolo se va a producir una colisión. Mientras más pequeña sea la región, en relación con el número de MSs tratando de conseguir una oportunidad de transmisión, tanto mayor será la probabilidad de colisión. En esta simulación sólo hay una MS transmitiendo, por lo tanto se esperaría que en cuanto ésta tuviera algo que transmitir colocara inmediatamente una solicitud de ancho de banda (sin riesgo de colisiones) y que se le concediera una oportunidad de transmisión en el siguiente mapa.

En la figura 5-12 se observa que la latencia de los paquetes de voz va aumentando desde el segundo 30 hasta el 50, en el que se estabiliza alrededor de 3.5 segundos. En el segundo 138 disminuye hasta 0.8 segundos y a partir de ese instante aumenta linealmente hasta que en el segundo 160 llega a valer 9.6. Después vuelve a disminuir hasta que en el segundo 168 se estabiliza nuevamente en alrededor de 3.5 segundos.

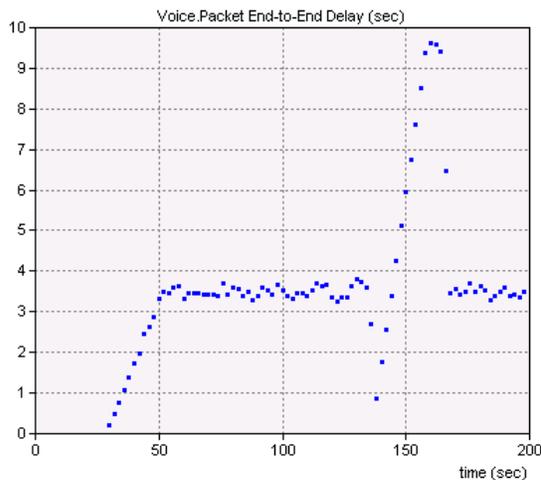


Figura 5-12. Latencia de los paquetes de voz en el escenario simple bajo BE con colisiones.

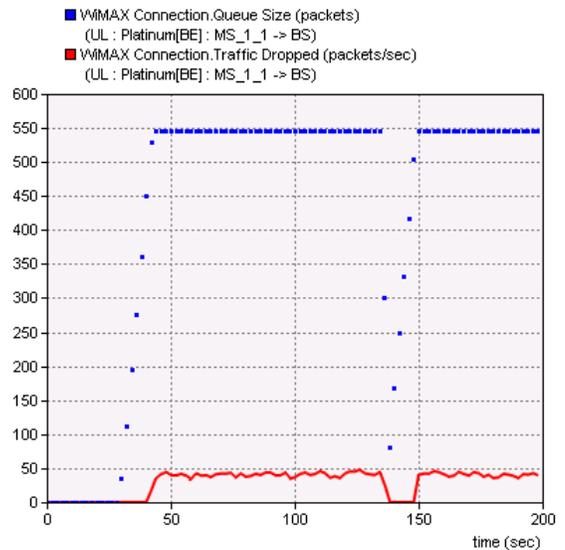


Figura 5-13. Tamaño promedio de la cola de MS_1_1 (oscuro) y tráfico desechado por la capa WiMAX MAC de MS_1_1 (claro) en el escenario simple bajo BE con colisiones.

En la figura 5-13 se presenta el tamaño promedio de la cola en MS_1_1 y el tráfico que desecha la capa WiMAX MAC. Éste va aumentando de forma lineal hasta el segundo 44 en el que alcanza el punto de

saturación con 545 paquetes. Siguen llegando nuevos paquetes y como la cola ya está saturada va a tener que desecharlos a una tasa de aproximadamente 44pps. En el segundo 134 deja de recibir nuevos paquetes y sigue desechar los paquetes que estaban encolados hasta que se vacía la cola. Una vez que MS_1_1 reingresa a la red, su cola vuelve a crecer hasta que se satura y vuelve a desechar paquetes en el segundo 150.

La información presentada hasta el momento basta para saber que se están presentando colisiones. Al revisar el código fuente del modelo se puede encontrar que en esta versión no hay un modelado explícito del proceso de contención. En lugar de ello, el retardo debido a este proceso queda definido a través de una distribución de probabilidad uniforme. Para esta simulación se utilizó el dominio predeterminado que va de 0 a 5. El mayor problema derivado de esta implementación es que el retardo de contención no está directamente en función del número de MSs en contención, aunque indirectamente se puede tomar en cuenta al modificar el dominio de la distribución.

El estándar define el algoritmo de *backoff* exponencial truncado como el mecanismo de resolución de colisiones. Como referencia se incluye la gráfica de número de colisiones contra retardo acumulado medido en oportunidades de transmisión de la región de contención en la figura 5-14.

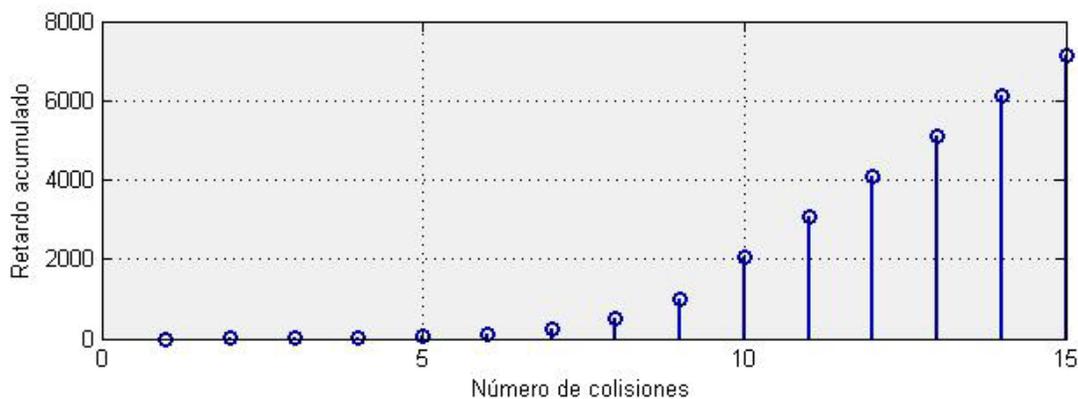


Figura 5-14. Retardo acumulado medido en oportunidades de transmisión de la región de contención del algoritmo *backoff* exponencial con un máximo de 16 colisiones, truncamiento a las 10 colisiones y considerando el retardo medio en cada intervalo.

A continuación se presentan los resultados de una simulación con las mismas características que la última, excepto que el dominio de la distribución de probabilidad que modela el retardo de contención va de cero a cero, es decir, no hay colisiones.

Para comparar estos resultados con los de la simulación en la que hubo colisiones, primero se presenta la latencia de los paquetes de voz y el tamaño promedio de la cola para el canal ascendente en las figuras 5-15 y 5-16, respectivamente. La latencia se mantiene prácticamente constante en 68ms, excepto en el

intervalo que se produce el HO en el que llega a valer 70ms. El tamaño promedio de la cola es de 0.55 paquetes durante casi toda la simulación, y durante el HO llega a ser de 0.58.

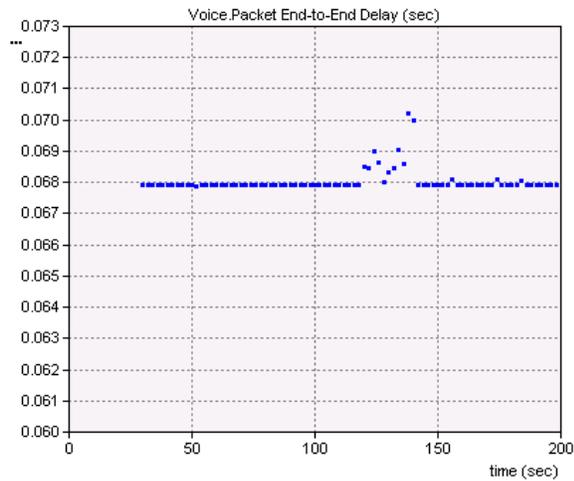


Figura 5-15. Latencia de los paquetes de voz en el escenario simple bajo BE sin colisiones.

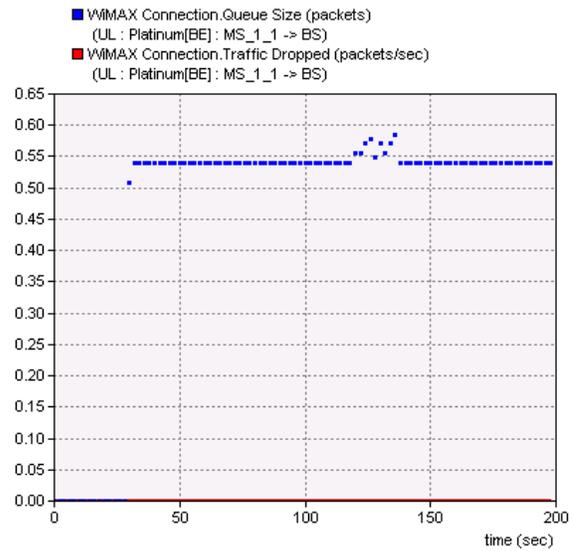


Figura 5-16. Tamaño promedio de la cola de MS_1_1 en el escenario simple bajo BE sin colisiones.

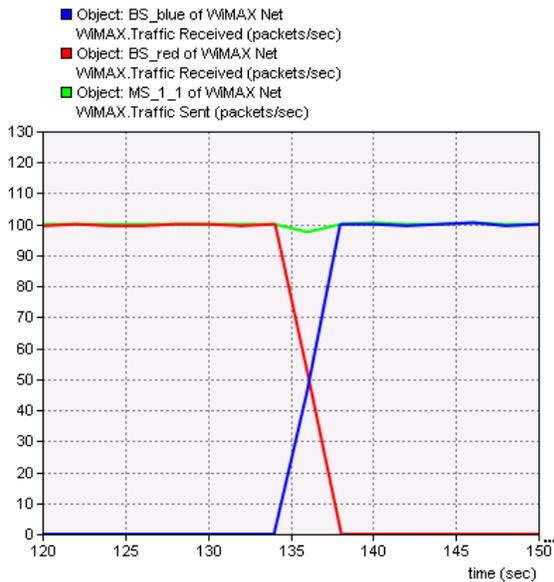


Figura 5-17. Tráfico que envía MS_1_1 (claro), que recibe BS_red (oscuro) y BS_blue (muy oscuro) en el escenario bajo BE simple sin colisiones.

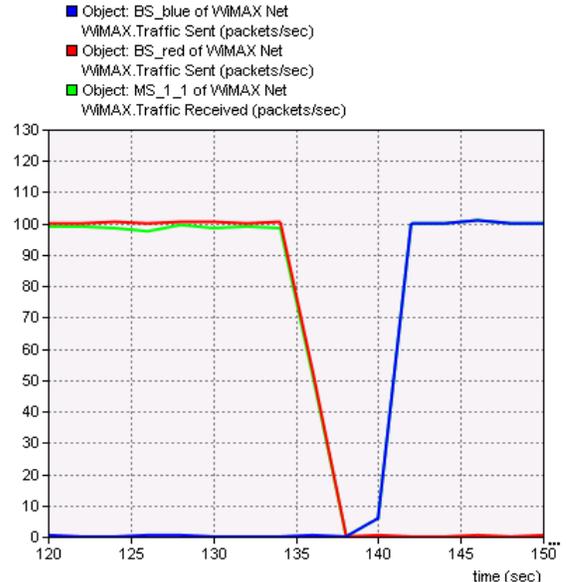


Figura 5-18. Tráfico que recibe MS_1_1 (claro), que envía BS_red (oscuro) y que envía BS_blue (muy oscuro) en el escenario simple bajo BE sin colisiones.

En la figura 5-17 se presenta el tráfico enviado por MS_1_1 y el recibido por las BSs, que es prácticamente igual al que se obtuvo con UGS. En la figura 5-18 se muestra el tráfico que MS_1_1 recibe y el que las BSs envían. Es similar a la que se obtuvo con UGS, aunque en esta ocasión el intervalo en el

que ningún nodo envía ni recibe tráfico es menor y va del segundo 138 al 140. Esto se debe a que la MS se da cuenta que está fuera de la cobertura de su HA en cuanto recibe un anuncio de un FA. Como los agentes emiten anuncios de forma aleatoria en un intervalo entre 3 y 10 segundos, en esta simulación la MS recibió el anuncio de BS_blue entre el segundo 138 y el 140, en lugar de entre el segundo 140 y el 142.

Entonces cuando sólo hay una MS, los resultados obtenidos con UGS y con BE son muy similares. A continuación se hace un análisis detallado de la forma en que se llevó a cabo el proceso de HO.

5.6 Comparación entre el modelo de simulación y el estándar IEEE 802.16e

En esta sección se lleva a cabo un análisis detallado sobre la forma en la que el proceso de HO está implementado en el modelo de WiMAX para OPNET, para esto se utiliza el escenario simple con UGS. Primero se presenta un diagrama de intercambio de mensajes para el L2-HO y el L3-HO para la simulación con UGS. Después se hace una comparación entre el funcionamiento del HO en el modelo de simulación y el proceso que marca el estándar. A partir de la comparación se obtiene una nueva latencia del L2-HO más apegada a la realidad.

En la figura 5-19 se presenta el intercambio de mensajes que se da durante el proceso de HO, para facilitar la explicación de la figura se colocaron en ella números que corresponden a los que están a la izquierda de cada párrafo del texto que se presenta a continuación.

- (1) En el segundo 137.04 MS_1_1 transmite un MOB_MSHO-REQ a BS_red iniciando así el proceso de HO.
- (2) BS_red confirma inmediatamente la recepción del mensaje transmitiendo un MOB_BSHO-RSP.
- (3) Al recibirlo, MS_1_1 envía un MOB_HO-IND en el que indica que libera la conexión con BS_red identificada por el CID 1.
- (4) Después, en el segundo 137.045 MS_1_1 envía el código CDMA 7 en el slot/frame 27409 iniciando así el proceso de *ranging*. Antes de eso, en el segundo 137.040, a través del algoritmo *backoff* exponencial, MS_1_1 determinó que debía esperar un slot para transmitir el código.
- (5) BS_blue recibe el mensaje en el segundo 137.045. Como la densidad de potencia recibida - 89.27dBm/sub-canal está dentro del rango de -60 a -100dBm/sub-canal envía un CDMA *Alloc IE* en el segundo 137.045. En él solicita una corrección en la potencia radiada de 9.27dB.
- (6) MS_1_1 recibe el mensaje en el segundo 137.050 y envía nuevamente un RNG-REQ a BS_blue, ella lo recibe en el segundo 137.050.

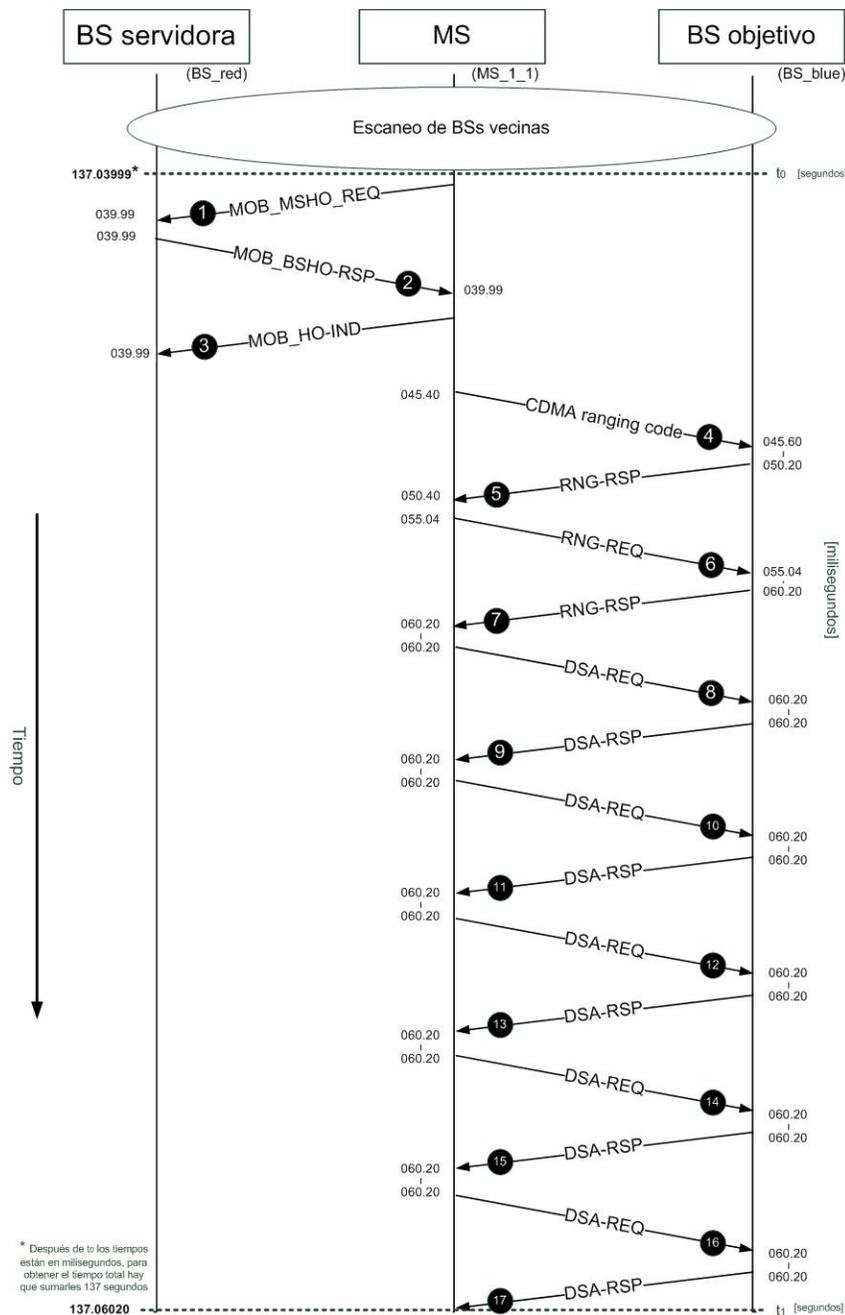


Figura 5-19. Intercambio de mensajes durante el L2-HO en el escenario simple.

- (7) En el segundo 137.055 BS_blue contesta el mensaje a través de un RNG-RSP en donde le asigna a la MS el CID básico 1. Esta conexión tiene asociada una QoS de BE pero una vez que un paquete clasificado a esta conexión llega a la BS_blue se le da prioridad estricta sobre cualquier QoS.
- (8) MS_1_1 recibe el RNG-RSP en el segundo 137.060 y busca crear flujos de servicio en los

- canales UL y DL. Primero solicita la creación de un flujo *System Default* para UL a través del mensaje DSA-REQ. A este flujo serán enviados todos los paquetes que no se puedan clasificar.
- (9) MS_1_1 recibe la respuesta de BS_blue a través del mensaje DSA-RSP, en donde admite el flujo y le indica que el CID asignado es el 101 con una QoS de BE.
 - (10) MS_1_1 solicita la creación de un flujo *Broadcast* para UL, a este flujo serán enviados aquellos paquetes que estén destinados a todas las MSs asociadas a la BS_blue.
 - (11) MS_1_1 recibe la respuesta en donde BS_blue admite el flujo y le asigna el CID 102 con una QoS de BE.
 - (12) MS_1_1 solicita la creación de un flujo *Platinum* para UL.
 - (13) MS_1_1 recibe la respuesta en donde BS_blue admite el flujo y le asigna el CID 103 con una QoS de UGS, a este flujo serán enviados aquellos paquetes IP, cuyo tipo de servicio sea *Interactive Voice*. Los tipos de servicio son aquellos definidos en el campo ToS de la cabecera IP.
 - (14) MS_1_1 solicita la creación de un flujo *System Default* para DL.
 - (15) MS_1_1 recibe la respuesta en donde BS_blue admite el flujo y le asigna el CID 104 con una QoS de BE.
 - (16) MS_1_1 solicita la creación de un flujo *Platinum* para DL.
 - (17) MS_1_1 recibe la respuesta en donde BS_blue admite el flujo y le asigna el CID 105 con una QoS de UGS. Con este mensaje concluye, en el segundo 137.060, el reingreso a la red y da paso a la transmisión normal.

A los flujos de servicio *System Default* y *Broadcast* se les asigna una QoS de BE para asegurar que sean aceptados sin importar que tan congestionada esté la BS objetivo.

De la figura 5-19 se puede observar que el tiempo durante el cual se interrumpió la transmisión de paquetes de datos debido al HO es de 20ms. Con una latencia de esta magnitud es posible transmitir sin ningún inconveniente aplicaciones sensibles a los retrasos como VoIP, videoconferencias y juegos interactivos multijugador, que de acuerdo a [12], requieren una latencia máxima de 150ms. Sin embargo, observando detalladamente los tiempos en la figura 5-19 saltan a la vista varios problemas.

Los mensajes 1, 2 y 3, que corresponden a la etapa de decisión e inicio del HO se transmiten instantáneamente. Esto no puede ser así porque cuando menos se necesita un mapa para transmitir el mensaje MOB_MSHO-REQ y otro mapa para transmitir los mensajes MOB_BSHO-RSP y MOB_HO-IND. Ocurre así porque en el simulador estos mensajes se transmiten de forma instantánea, es decir, no son enviados a través de las capas inferiores, sino directamente a su destino y sin ningún retraso en la comunicación.

En la última etapa, del establecimiento de las conexiones a través de la creación de los flujos de servicio, que comienza con el mensaje 8 y termina con el mensaje 17, nuevamente observamos que el intercambio de mensajes es instantáneo. Este comportamiento no está apegado a la realidad y se debe a que esta versión del simulador no soporta el envío de este tipo de mensajes a través de las capas inferiores. En un ambiente real el envío de los mensajes DSA-REQ y DSA-RSP requeriría de al menos una trama por mensaje.

En la figura 5-20 se presenta el intercambio de mensajes durante el HO de capa 3 para la simulación con UGS. Los diagramas de intercambio de mensajes de capa 2 y capa 3 se presentan por separado porque MIP es un algoritmo en el que la decisión para hacer un HO se basa únicamente en las indicaciones de la capa IP y es completamente independiente de la capa 1 y 2. Para facilitar la explicación de la figura se colocaron en ella números que corresponden a los que están a la izquierda de cada párrafo del texto que se presenta a continuación.

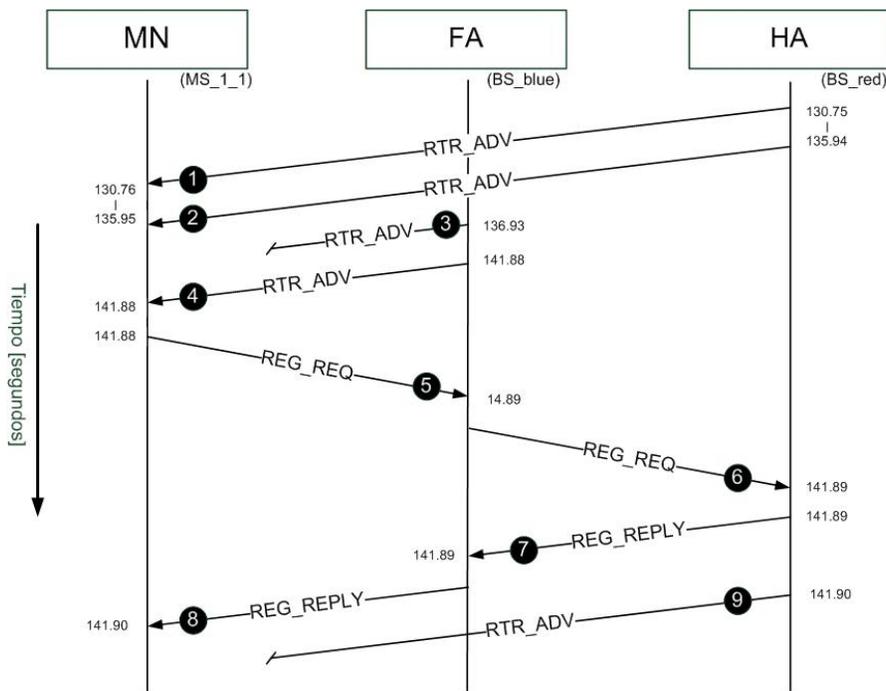


Figura 5-20. Intercambio de mensajes durante el L3-HO en el escenario simple.

- (1) En el segundo 130.75 BS_red, el HA, envía un mensaje IRDP anunciando su presencia. MS_1_1, el MN, lo recibe,
- (2) En el segundo 135.94 el HA envía otro mensaje IRDP anunciando su presencia. El MN lo recibe.
- (3) En el segundo 136.93 BS_blue, el FA, envía un mensaje IRDP anunciando su presencia. El MN no lo recibe porque está en el rango de cobertura del HA.

- (4) En el segundo 141.88 el FA envía otro mensaje IRDP anunciando su presencia. MN lo recibe, porque ya está en el rango de cobertura del FA y ya hizo el HO de capa 2.
- (5) Al detectar que se encuentra en una red foránea. En el segundo 141.88 envía un mensaje de registro a su HA, en él envía la dirección IP de la interfaz conectada a WiMAX del FA como su CoA.
- (6) El FA recibe el paquete de registro en el segundo 141.89 y lo reenvía al HA.
- (7) En el segundo 141.89, el HA recibe el paquete de registro. Forma un túnel con el FA y a través de él envía un paquete de reply al MN.
- (8) El FA recibe el mensaje en el segundo 141.89 y lo entrega al MN.
- (9) En el segundo 141.90, el HA envía un mensaje IRDP anunciando su presencia. El MN no lo recibe.

Habiendo hecho este análisis se confirma que MIP es la causa de la gran interrupción en la comunicación que sufre el canal UL durante el HO. El L2-HO ocurre en el segundo 137, y hasta el segundo 141, MS_1_1 se da cuenta de que ya no está en el rango de cobertura de su HA e inicia la creación del túnel.

Para finalizar el análisis de los resultados del escenario simple, se hace un pequeño estudio de la mínima latencia que se podría obtener al incluir todas las etapas del reingreso a la red que aún no están implementadas en el modelo, considerando que no hay comunicación entre BSs. Para empezar, en la Tabla 5-5 se presentan las etapas del reingreso a la red y se marcan las que actualmente soporta.

Tabla 5-5. Etapas de reingreso a la red.

Número	Etapas	Soportada por el modelo
1	Obtener parámetros <i>downlink</i> y <i>uplink</i>	No
2	<i>Ranging</i>	Sí
3	Negociar capacidades básicas	No
4	Autorización e intercambio de llaves	No
5	Registro	No
6	Establecer conectividad IP (opcional)	Sí
7	Establecer hora del día (opcional)	No
8	Transferir parámetros operacionales (opcional)	No
9	Establecer conexiones	Sí

En el modelo, el intercambio de mensajes de descripción del canal no se lleva a cabo. En lugar de ello los parámetros que estos mensajes deberían contener son almacenados en una estructura cuyo apuntador es anunciado a otros procesos a través del *model-wide registry*. Como se indicó anteriormente, la sincronización consiste en que la MS hace un escaneo para encontrar la frecuencia a la que está operando la BS objetivo hasta que encuentra el preámbulo de una trama; una vez que se ha sincronizado con el

canal, debe escuchar los mensajes descriptores de canal. La duración de esta etapa puede reducirse significativamente cuando los mensajes MOB_NBR-ADV incluyen el BSID de la BS objetivo, su frecuencia de operación, y una parte de los mensajes DCD y UCD. En el modelo los mensajes MOB_NBR-ADV sólo contienen el BSID de las BSs vecinas, aunque fácilmente se podría incluir la información necesaria para que esta etapa durara sólo dos tramas [14]. Es importante mencionar que la duración de esta etapa es independiente del número de MSs conectadas a la BS.

Los procedimientos de *ranging* inician con el envío del mensaje 4 y concluyen con la recepción del mensaje 7, referidos a la figura 5-19. El intervalo entre cada mensaje es de 5ms, la duración de una trama, entonces cada mensaje es enviado en tramas distintas pero consecutivas, y como era de esperarse no hubo colisiones. Estos mensajes son los únicos en el reingreso a la red que son enviados a través del canal, de hecho, se puede observar que el intervalo entre cada uno es de aproximadamente 5ms lo que indica que fueron transmitidos en tramas distintas y consecutivas.

Esta etapa ha sido implementada en el modelo de acuerdo a lo que indica el estándar 802.16e, e incluye el uso de CDMA. La latencia total debida al HO está dada básicamente por la duración de esta etapa. Es susceptible a colisiones por lo que es altamente aleatoria, aunque gracias al uso de CDMA la probabilidad de colisión puede mantenerse en niveles bajos. Los principales factores que determinan su duración son el CINR y la carga en la celda [14].

Las etapas 3, 4, 5, 7 y 8 no están implementadas en el simulador. Si fueran a ser implementadas, los mensajes de cada una de estas etapas tendrían que ser enviados a través de una conexión con CID básico las primeras dos y con CID secundario las restantes. La primera conexión es dada de alta al final de la etapa de *ranging* y la segunda al final de la etapa de autorización e intercambio de llaves. Ambas conexiones tienen una QoS asociada de BE, lo que provoca que su duración sea aleatoria, y que dependa del CINR y de la carga de la celda. Como lo que se pretende es obtener el tiempo mínimo que habría que adicionar a la latencia obtenida, se va a considerar el mejor caso en el que no hay colisiones.

Dado que este estudio no abarca las cuestiones de seguridad del protocolo 802.16e, para la etapa 3 se considerará que el mensaje RNG-REQ incluye la tupla HMAC/CMAC por lo que puede ser y será omitida.

El estándar indica que la etapa que corresponde a la transferencia de parámetros operacionales puede ser pospuesta hasta después de que la BS haya ingresado a la red, es por esto que su intercambio de mensajes no forma parte de la latencia.

La etapa 6, en la que se establece la conexión IP es necesaria únicamente cuando cambia el punto de anclaje a la CSN. Como en este caso se tiene una topología como la de la figura 3-2B, cada cambio de BS va a implicar un L3-HO. Para llevarlo a cabo se utiliza el protocolo MIP porque es el único soportado por

esta versión de OPNET. Por lo mencionado en el capítulo 3, la latencia de esta etapa es independiente del L2-HO por lo que no hace falta incluirla en este análisis.

Las etapas 7 y 8 son necesarias cuando se establece la conectividad IP por medio de DHCP y cuando se utilizan ciertos algoritmos de encriptado, como esto no ocurre en la simulación ambas etapas son omitidas para el análisis.

La última etapa referente al establecimiento de flujos de servicio sí esta soportada por el modelo, aunque como en el de la decisión e inicio del HO los mensajes son enviados de forma instantánea, el tiempo que tardan en establecerse los flujos será agregado al resultado del simulador.

En la figura 5-21 se presenta cómo debería de llevarse a cabo el proceso de reingreso a la red en el simulador. En ella se indica el retardo que cada mensaje produce considerando como unidad de tiempo la duración de un mapa. Las regiones sombreadas corresponden a la región de DL y las regiones en blanco a la de UL. Los números encerrados en círculos indican el fin de las etapas de la tabla 5-5.

La etapa 4 no está incluida en la figura porque este estudio no abarca las cuestiones de seguridad y sobre todo porque es opcional. La 6 no se incluye porque de ella se encarga MIP que es independiente de la capa 2. La etapa 7 tampoco está incluida debido a que puede llevarse a cabo una vez que la MS ha reingresado a la red. Los detalles de la etapa 2 no se incluyen porque el simulador la modela de acuerdo al estándar.

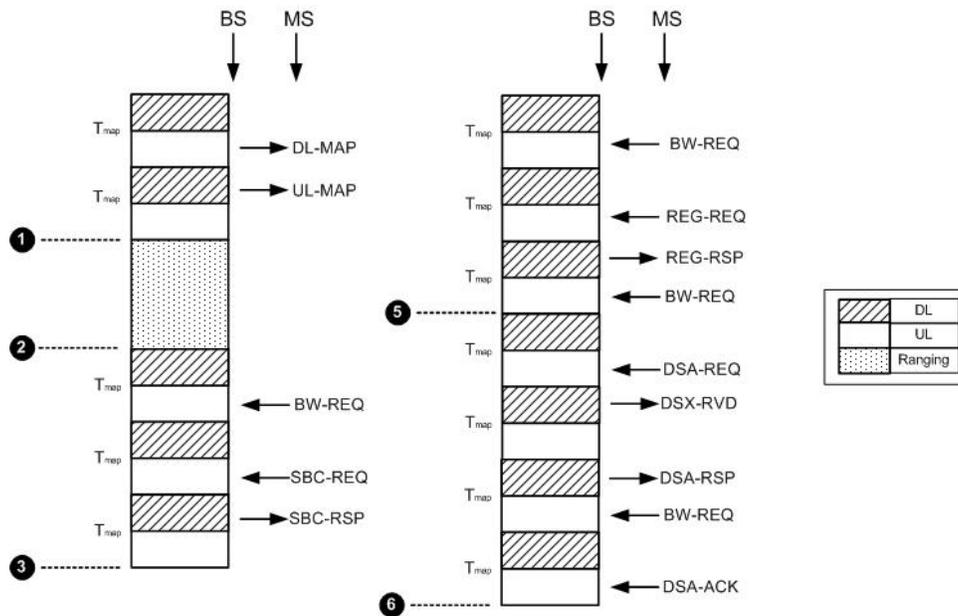


Figura 5-21. Proceso de reingreso a la red que debería hacer el modelo.

De la figura se obtiene una ecuación que permite obtener el tiempo, en mapas, que debería de durar la latencia debida al L2-HO es: $T_i = T_1 + T_2 + T_3 + T_5 + T_8$. Donde: T_i es la latencia total, $T_1 = 2T_{map}$ es el

tiempo de obtención de parámetros UL y DL, T_2 es el tiempo de ranging, $T_3 = 3T_{map}$ es el tiempo de negociación de capacidades básicas, $T_5 = 3T_{map}$ es el tiempo de registro, y $T_8 = 4T_{map}$ es el tiempo de establecimiento de conexiones. Sustituyendo: $T_i = 12T_{map} + T_2$. Finalmente la latencia total T_i , considerando que $T_{map} = 5ms$ y que $T_2 = 20ms$ es de 80ms.

5.7 Resultados del escenario “realista”

Primero se van a presentar los resultados para la simulación con BE. El dominio de la variable aleatoria que modela el tiempo de contención se define de 0 a 5 slots.

En la figura 5-22 se muestran dos gráficas: el tráfico desechado en la capa física de todos los nodos WiMAX para UL y DL, y el tráfico desechado por la capa WiMAX MAC de todos los nodos WiMAX. La suma de ambas se muestra en la figura 5-23 junto con el *throughput* de todos los nodos WiMAX.

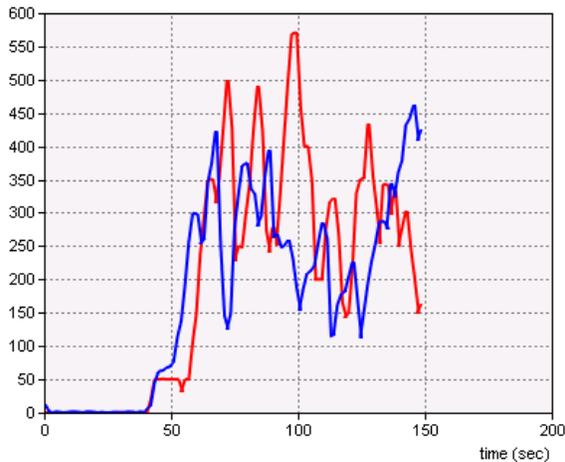


Figura 5-22. Tráfico desechado por la capa física para UL y DL (oscuro), tráfico desechado por la capa MAC (claro) bajo BE en el escenario realista con 8 códigos CDMA y un slot.

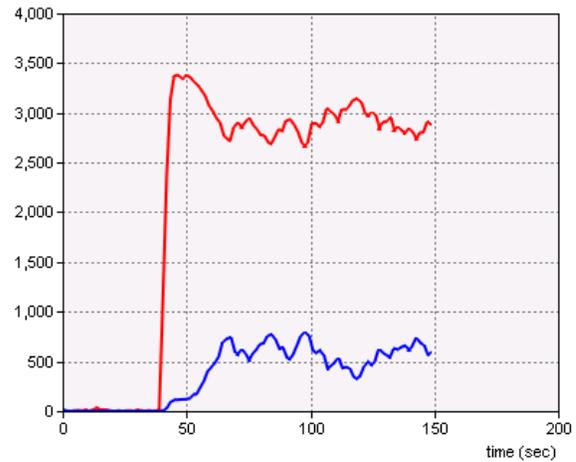


Figura 5-23. Tráfico total desechado (oscuro), throughput global de nodos WiMAX (claro) bajo BE en el escenario realista, con 8 códigos CDMA y un slot.

El desecho de paquetes en la capa WiMAX se debe a los problemas que tiene MIP con la detección de movilidad. En el escenario simple ocurrió lo mismo, la capa IP de MS_1_1 detectó que estaba fuera del alcance de su HA varios segundos después de haber hecho el L2-HO, mientras que el servidor siguió enviando paquetes al HA y la capa WiMAX MAC del HA, al no tener un CID a donde enviarlos, los desechó.

En la capa física se desechan paquetes cuando su CINR está debajo de un umbral. La CINR va a depender de tres factores: la potencia de la señal transmitida, la CCI y el ruido. La potencia y el ruido no

son el problema porque el radio de las celdas se eligió considerando el peor caso de la SNR. Por lo que el problema debe ser la CCI dado que se eligió un factor de reuso de 1-1-1 sin utilizar alguna técnica para combatir la interferencia. Esto se confirma examinando el desecho de paquetes en la capa física para cada MS. El desecho de paquetes comienza siempre un poco antes de que se lleve a cabo un L2-HO, es decir, en el borde de las celdas.

En promedio se están perdiendo el 15% de todos los paquetes. De la figura 5-23 se observa que si no se desecharan paquetes, el *throughput* global sería constante en aproximadamente 3,500pps.

En la figura 5-24 se muestra la latencia para los paquetes de voz y para las tramas WiMAX. Antes del segundo 40 no se transmite tráfico de voz por lo que la latencia es cero para voz y alrededor de 5ms para WiMAX. Después, en la capa WiMAX la latencia está alrededor de 25ms y para los paquetes de voz está alrededor de 105ms. Como la latencia máxima es menor a 150ms en todo momento, es posible transmitir tráfico de voz sin los problemas derivados de altas latencias.

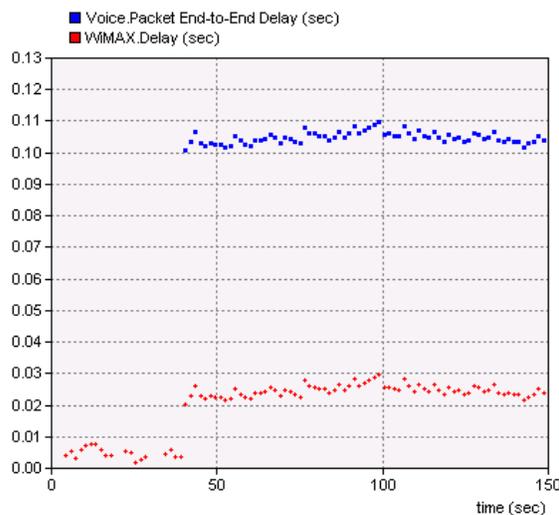


Figura 5-24. Latencia de los paquetes de voz (oscuro) y de las tramas WiMAX (claro) bajo BE en el escenario realista, con 8 códigos CDMA y 1 slot.

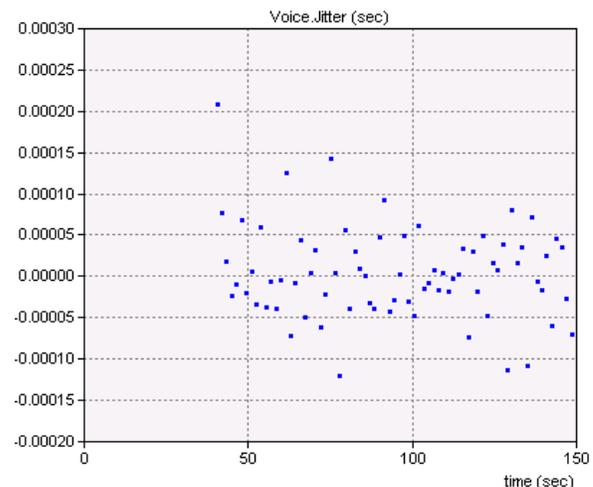


Figura 5-25. Jitter de los paquetes de voz bajo BE en el escenario realista, con 8 códigos CDMA y 1 slot.

En la figura 5-25 se presenta el *jitter* de los paquetes de voz. Su valor promedio es aproximadamente cero y prácticamente todas las muestras se encuentran entre -0.2 y +0.2ms. Como los mensajes de voz se generan cada 20ms los paquetes van a llegar en el orden en que fueron enviados.

En la figura 5-26 se presentan las latencias de todos los L2-HO's que se ejecutaron en la simulación. En promedio es de 75ms y tiene una desviación estándar de 100ms. En el escenario simple la latencia del HO fue de 20ms, es decir, casi cuatro veces menor al valor medio para esta simulación.

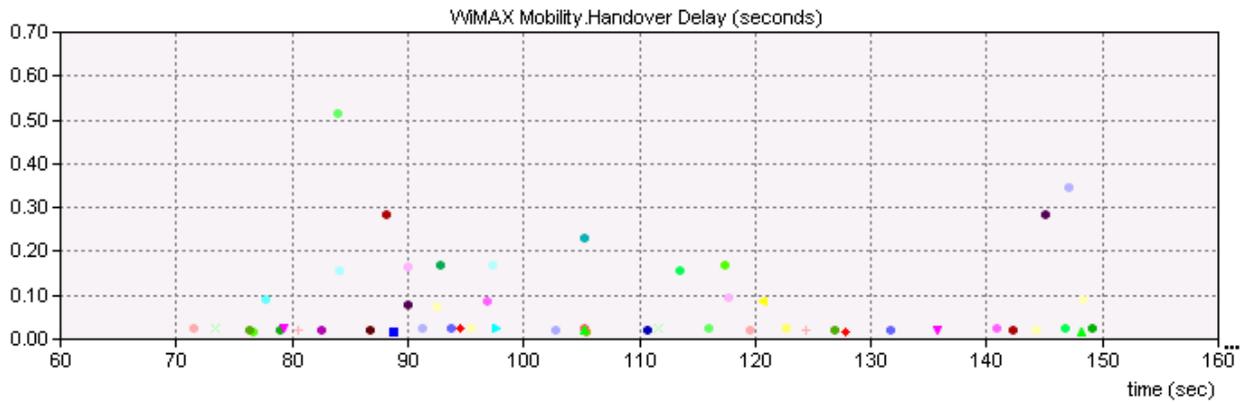


Figura 5-26. Latencia de todos los L2-HO bajo BE en el escenario realista, con 8 códigos CDMA y un slot.

El incremento en la latencia se puede deber al aumento en el tiempo de contención en la etapa de *ranging* porque hay más usuarios. El área de contención inicial es de 2 símbolos por 6 sub-canales. A este espacio se le llama *slot* y es el mínimo requerido para colocar un código CDMA. Hay 8 códigos destinados al *ranging* de HO. La probabilidad de colisión es función del número de códigos, el número de usuarios y el número de slots:

$$P = 1 - \frac{(k-1)!}{k^{n-1}(k-n)!},$$

donde n es el número de usuarios y k es el producto del número de códigos con el número de slots. En la figura 5-27 se muestran la gráfica de la probabilidad de colisión para k = 8, 16, 24, 32 y de 1 a 8 usuarios.

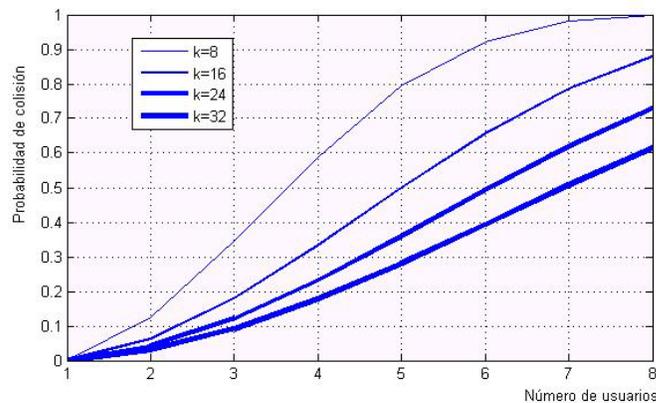


Figura 5-27. Probabilidad de colisión en función del número de usuarios.

En la simulación que se acaba de realizar k vale 8, y el número de usuarios por celda que hay al principio de la simulación es 5. Conforme se van moviendo las MSs en algunas celdas habrá más y en

otras menos, pero a excepción de la celda central es difícil que haya más de 8 MSs en una celda. Para la configuración inicial la probabilidad de colisión es de 0.8 con $k=8$. Si duplicamos el valor de k , la probabilidad de colisión disminuye casi en un 40%. Entonces asignando 2 slots a la región de *ranging* inicial, se debería observar un decremento significativo en la latencia del HO.

Ejecutando nuevamente la simulación con el doble de slots se obtiene una latencia media en el L2-HO de 23.3ms con una desviación estándar de 37.7ms.

Otros beneficios del incremento en el tamaño de la región de contención para el *ranging* inicial son: una disminución en la latencia promedio de los paquetes de voz de 0.1ms y una disminución en la desviación estándar del *jitter*. El tráfico desechado sigue siendo alrededor del 15% del tráfico total por los problemas con MIP y de interferencia.

Los resultados de la simulación con UGS se muestran a continuación. Se obtienen utilizando una región de contención para el *ranging* inicial de 1 slot.

En la figura 5-28 se presenta el tráfico desechado en la capa WiMAX MAC y en la capa física por todos los nodos WiMAX. En la figura 5-29 se muestra el total del tráfico desechado junto con el tráfico que recibieron las capas superiores de la capa WiMAX MAC en todos los nodos WiMAX. A partir de ellas se puede observar que la pérdida de paquetes es ligeramente menor que con BE, sobre todo alrededor del segundo 90, en el que en BE se presentó un pico.

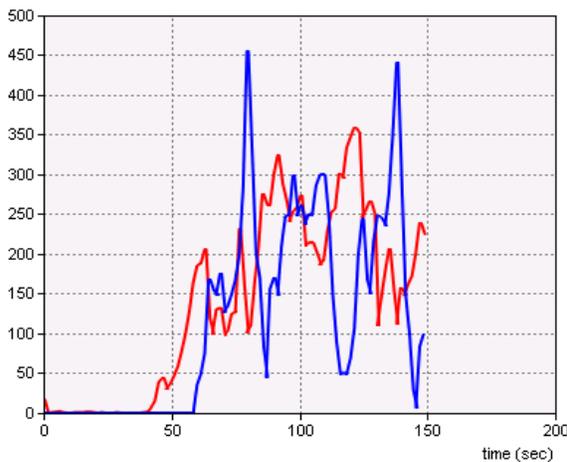


Figura 5-28. Tráfico desechado por la capa física para UL y DL (oscuro), tráfico desechado por la capa MAC (claro) bajo UGS en el escenario realista.

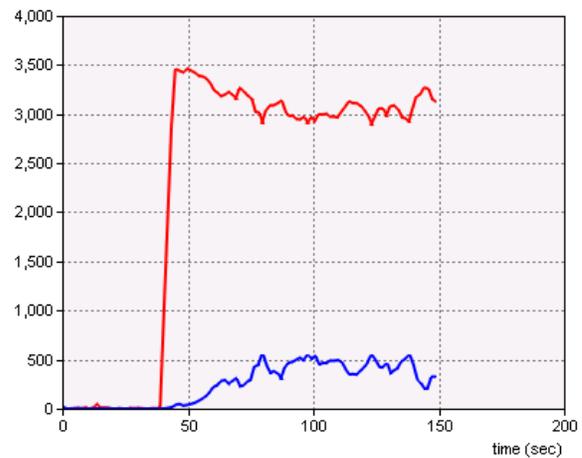


Figura 5-29. Tráfico total desechado (oscuro), throughput global de nodos WiMAX (claro) bajo UGS en el escenario realista.

En la figura 5-30 se presentan la latencia para los paquetes de voz y para las tramas WiMAX. Los valores de ambas son prácticamente los mismos que en la simulación anterior por lo que es posible transmitir tráfico sensible a la demora. En la figura 5-31 se presenta el *jitter* de los paquetes de voz. La máxima variación entre la llegada de paquetes es de 0.12ms, el resto están entre +0.6 y -0.6ms.

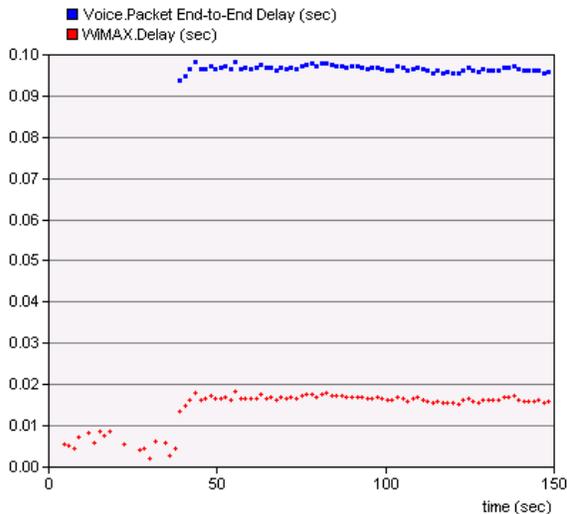


Figura 5-30. Latencia de los paquetes de voz (oscuro) y de las tramas WiMAX (claro) bajo UGS en el escenario realista.

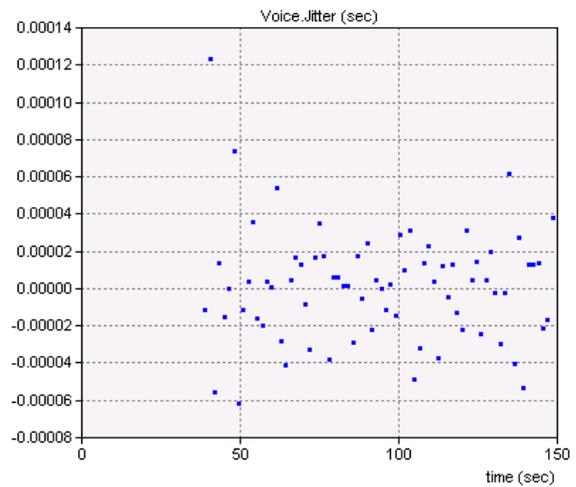


Figura 5-31. Jitter de los paquetes de voz bajo UGS en el escenario realista.,

Para terminar, en la figura 5-32 se presentan, una vez más, las latencias de todos los L2-HO's que se ejecutaron en la simulación. En promedio es de 113ms y tiene una desviación estándar de 144ms. Nuevamente la latencia es grande porque la probabilidad de colisión en la etapa de *ranging* es de 0.8, para disminuir la latencia habrá que aumentar ya sea el número de códigos CDMA disponibles para el *ranging* o el número de slots disponibles para el mismo.

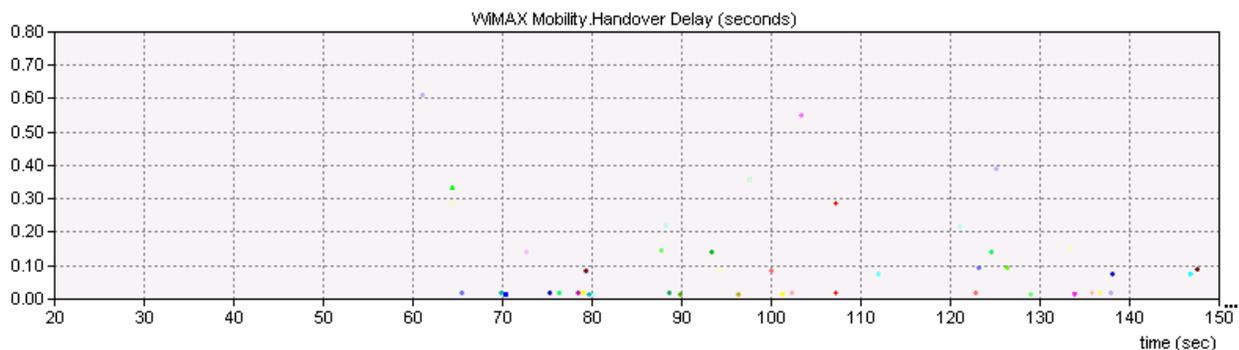


Figura 5-32. Latencia de todos los L2-HO en la simulación bajo UGS en el escenario realista.

5.8 Conclusiones

En este capítulo se presentaron la configuración y los resultados de las simulaciones llevadas a cabo para analizar a WiMAX móvil en un ambiente dinámico. Las latencias obtenidas para el L2-HO fueron de aproximadamente 20ms para el escenario simple, que sería un excelente resultado si incluyera la latencia

derivada de todas las etapas del reingreso a la red, y de 23.3 ms para el escenario “realista” cuando la probabilidad de colisión es baja.

Para tener una mejor idea de cuál habría sido el resultado, se hizo un análisis teórico de la latencia mínima que presentarían todas las etapas del reingreso a la red no implementadas en el simulador y se obtuvo una latencia total de 80ms. El análisis considera que las etapas opcionales son omitidas, que la sincronización con los canales de UL y DL se hace en el primer intento, y que los mensajes enviados en conexiones básicas, primarias y secundarias no sufren colisiones. Para disminuir la duración de la etapa de *ranging* se puede aumentar el número de slots disponible para este propósito, el número de códigos, ó se puede utilizar el *Fast Ranging*.

La etapa de obtención de conectividad IP se lleva a cabo de forma completamente independiente a través del protocolo MIP. Debido a problemas con la detección de movimiento se obtiene una latencia de alrededor de 4 segundos. Esto pone en evidencia que este algoritmo no es adecuado para tráfico sensible a los retrasos, como la voz. Para mejorar este resultado se puede utilizar FMIP, y para obtener aún mejores resultados se puede implementar un diseño con comunicación entre capas.

En el escenario “realista” se tuvo una pérdida de paquetes de alrededor de 15%, una latencia promedio para los paquetes de voz de 105ms y, en el mejor caso, una latencia promedio del L2-HO de 23.3ms. La pérdida de paquetes se debió a dos factores: se tuvo que elegir un factor de reuso de frecuencias de 1-1-1 porque el simulador no soportaba otro, y se utilizó MIP para el manejo de movilidad en capa de red. Para remediar el primer problema se debe utilizar un esquema de reuso de frecuencias menos agresivo, como 1-3-3, 3-1-1, ó 3-3-3. También se pueden utilizar técnicas avanzadas como el reuso fraccional de frecuencias, que consiste en que en el centro de las celdas se utilicen todas las sub-portadoras y en los bordes sólo algunas, de forma que celdas adyacentes no utilicen las mismas sub-portadoras en su frontera. Para solucionar el segundo problema, como se recomendó para el primer escenario, se debe utilizar FMIP. Lo único que se pudo modificar para disminuir el impacto de MIP fue que en cuanto la MS recibiera el mensaje de anuncio de agente, comenzará el proceso de registro, en lugar de esperar hasta que expirara un contador como estaba implementado originalmente en el simulador.

CAPÍTULO 6

Conclusiones

Esta tesis introdujo la movilidad en WiMAX móvil. WiMAX es una tecnología de acceso inalámbrico de banda ancha basada en el estándar IEEE 802.16e, que es una enmienda al estándar 802.16-2004, y cuyas principales ventajas son el soporte para movilidad y el uso de OFDMA escalable. Los estándares 802.16 sólo contienen la definición de las primeras dos capas de WiMAX, el resto es definido por el Foro WiMAX; que está formado por entidades académicas, industriales y gubernamentales para certificar y promover el uso de los productos basados en los estándares 802.16. El uso de técnicas avanzadas en la capa física y en la capa MAC le permiten ofrecer una eficiencia espectral mayor a la de cualquier tecnología de 3G y soporte completo para QoS. Su arquitectura de red está completamente basada en IP y por la forma en que está definida permite la interoperabilidad entre dispositivos de diferentes vendedores y la creación de economías de escala.

WiMAX móvil soporta dos tipos de HO, el duro que es obligatorio y el suave que es opcional. Para gestionar el HO en capa de red el Foro WiMAX eligió al protocolo MIP que debido a problemas de detección de movilidad, enrutamiento triangular y configuración de direcciones no es adecuado para aplicaciones en tiempo real. El protocolo FMIP es una alternativa que se desempeña mucho mejor en ambientes con tráfico en tiempo real, sobre todo cuando es apoyado por la capa física.

Las simulaciones fueron llevadas a cabo en OPNET Modeler, que cuenta con un modelo de WiMAX con un soporte básico para WiMAX móvil. Es capaz de llevar a cabo HOs duros sin asociación en la capa de enlace y HO en capa de red a través de MIPv4. Sus principales limitantes, para este estudio, son la falta de comunicación entre BSs y que no soporta HO suave, ni FMIP, ni planeación de frecuencias, ni reuso fraccional de frecuencias.

Se llevaron a cabo varias simulaciones en dos escenarios. En el primero una MS se desplazó del rango de cobertura de una BS al de otra. Sirvió para saber que el modelo no lleva a cabo el proceso de reingreso a la red como debería: omite varias etapas, algunas las modela parcialmente, y el modelado de la transmisión de la mayoría de las tramas no incluye la transmisión por el medio físico. La única etapa que modela de forma completamente apegada a la realidad es la de *ranging*, ya que incluye el proceso de contención y transmite los mensajes en tramas a través del canal.

En las simulaciones en este escenario se obtuvieron latencias del L2-HO de alrededor de 20ms, que serían un muy buen resultado si el modelado estuviera completo. Haciendo un análisis teórico de la latencia mínima que se podría obtener llevando a cabo todas las etapas de reingreso a la red, sin que haya

colisiones, se obtiene una latencia de 80ms que es ampliamente inferior a la mínima requerida para transmitir aplicaciones de tiempo real. También del primer escenario se observaron los efectos negativos derivados de la detección de movimiento del algoritmo MIP, que ocasionaron una interrupción en la transmisión del canal UL de más de 4 segundos.

El segundo escenario se colocaron siete BSs, con cinco MSs en cada una capaces de desplazarse libremente. El propósito del escenario fue conocer el impacto promedio del HO en el desempeño de la red. Se obtuvo una pérdida de paquetes de alrededor de 15%, una latencia promedio para los paquetes de voz de 105ms y, en el mejor caso, una latencia promedio del L2-HO de 23.3ms. La pérdida de paquetes se debió a dos factores: se tuvo que usar un factor de reuso de frecuencias de 1-1-1 porque es una limitante del simulador, y se utilizó MIP para el manejo de movilidad en capa de red. El problema de no utilizar la planeación de frecuencias es que en el borde de las celdas la CCI es tan grande que provoca que se pierdan la mayoría de los paquetes transmitidos. Y la detección de movimiento de MIP provocó grandes pérdidas de paquetes en la capa MAC.

Es posible alcanzar un desempeño en la red adecuado para aplicaciones sensibles a las altas latencias. Para ello hace falta implementar en el simulador soporte para planeación de frecuencias o para el reuso fraccional de frecuencias, y utilizar FMIP para gestionar la movilidad en capa de red preferentemente apoyándose en la capa física.

Trabajos a seguir

Existen muchos aspectos de WiMAX móvil que pueden ser mejorados. La comunicación entre capas puede ayudar significativamente a reducir la latencia derivada del L3-HO, la idea básica es que la capa de red reciba indicaciones de la capa de enlace para llevar predecir posibles HOs y de ser necesarios llevarlos a cabo en sincronía con el L2-HO.

Otra línea de investigación que puede resultar muy interesante es el diseño y optimización de los algoritmos de HO con otras tecnologías inalámbricas, como WiFi, EVDO, UMTS y LTE. Estos algoritmos le permitirían al usuario utilizar la red de acceso que le resulta más conveniente, ya sea desde el punto de vista económico, por cuestiones de cobertura, ó mayores tasas de transmisión.

Un factor que es muy importante y no se consideró para este estudio es la seguridad. Por su naturaleza, las transmisiones inalámbricas requieren de potentes algoritmos de cifrado que garanticen la integridad, confidencialidad, disponibilidad e irrefutabilidad de la información.

Para terminar es importante destacar que este es el primer paso que da la UNAM hacia la investigación de la movilidad en WiMAX con el modelo para OPNET, y para que pueda continuar será necesario solventar las limitantes del modelo encontradas en esta investigación. Con ello podrá enfocarse en alguna

línea de investigación específica, ya sea que se base en alguna de las ideas presentadas en esta sección o alguna otra de las muchas características susceptibles a ser mejoradas de esta tecnología.

REFERENCIAS

- [1] IEEE 802.16e-2005, “Air Interface for Fixed and Mobile Broadband Wireless Access Systems”, Febrero 2006
- [2] IEEE 802.16-2004, “Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems”, Octubre 2004
- [3] Charles E. Perkins, “Mobile IP”, IEEE Communications Magazine, Mayo 1997
- [4] ITU-T Blue Book Recommendation G.711, “Pulse Code Modulation (PCM) of Voice Frequencies”, 1993
- [5] WiMAX Forum, “Network Architecture Stage 2 Release 1.0 (Version 1.2)”, Enero 2008
- [6] WiMAX Forum, “Mobile WiMAX – Part I: A Technical Overview and Performance Evaluation”, Agosto 2006
- [7] Loutfi Nuaymi, “WiMAX: Technology for Broadband Wireless Access”, John Wiley & Sons, 2007
- [8] José E. Cota, “Diseño de Procedimientos Handoff en Redes Inalámbricas de Banda Ancha Basado en el Estándar IEEE 802.16”, UNAM, 2005
- [9] Antti Mäkeläinen, “Analysis of Handoff Performance in Mobile WiMAX Networks”, Helsinki University of Technology, 2007
- [10] Prakash Iyer et al, “All-IP Network Architecture for Mobile WiMAX”, IEEE, 2007
- [11] WiMAX Forum, “Mobile System Profile Release 1.0 (Revision 1.4.0)”, Mayo 2007
- [12] WiMAX Forum, “WiMAX System Evaluation Methodology”, Julio 2008
- [13] Sik Choi et al, “Fast Handover Scheme for Real-Time Downlink Services in IEEE 802.16e BWA System”, IEEE, 2005
- [14] Doo H. Lee et al, “Fast Handover Algorithm for IEEE 802.16e Broadband Wireless Access System”, IEEE, 2006
- [15] Jinsoo Park et al, “An Integrated Handover Scheme for Fast Mobile IPv6 over IEEE 802.16e Systems”, IEEE, 2006
- [16] Lung-Sheng Lee y Kuochen Wang, “A Network Assisted Fast Handover Scheme For IEEE 802.16E Networks”, PIMRC, 2007
- [17] Youn-Hee Han et al, “A Cross-Layering Design for IPv6 Fast Handover Support in an IEEE 802.16e Wireless MAN”, IEEE, 2007
- [18] ITU-T G.114, “One-Way transmission time”, 2003
- [19] Loutfi Nuaymi and Ziad Noun, “Simple Capacity Estimations in WiMAX/802.16 System”, PIMRC, 2006
- [20] Mustafa Ergen, “The Access Service Network in WiMAX: The Role of ASN-GW”, WiChorus, Inc.
- [21] Nokia, “Making the case for Mobile WiMAX”, 2006
- [22] Bharathi Upase et al, “Radio Network Dimensioning and Planning for WiMAX Networks”, 2007
- [23] Xinjie Chang, “Network Simulations with OPNET”, Proceedings of the 1999 Winter Simulation Conference, 1999
- [24] Dolejš Ondrej, “OPNET Modeler - Networks Simulation”, Czech Technical University
- [25] OPNET Technologies, “OPNET Modeler Brochure”, 2007
- [26] Fan Wang et al, “Mobile WiMAX Systems: Performance and Evolution”, IEEE Communications Magazine, Octubre 2008

- [27] Kamran Etemad, "Overview of Mobile WiMAX Technology and Evolution", IEEE Communications Magazine, Octobre 2008
- Zimmermann Rainer, Stuckmann Petter, "Toward Ubiquitous and Unlimited-Capacity
- [28] Communication Networks: European Research in Framework Programme 7, IEEE Communications Magazine, 2008

APÉNDICE A

Acrónimos

AAA	Authentication, Authorization and Accounting	Autenticación, autorización y contabilidad
AAS	Adaptive Antenna System, Advanced Antenna System	Sistema de antenas adaptativas, sistema de antenas avanzadas
ACK	Acknowledgement	Acuse de recibo
AES	Advanced Encryption Standard	Estándar de cifrado avanzado
AMC	Adaptive Modulation and Coding	Modulación y codificación adaptativa
AMPS	Advanced Mobile Phone System	Sistema telefónico móvil avanzado
AR	Access Router	Enrutador de acceso
ARP	Address Resolution Protocol	Protocolo de resolución de direcciones
ARQ	Automatic Repeat reQuest	Solicitud de repetición automática
ASN	Access Service Network	Red de servicio de acceso
ASN-GW	Access Service Network Gateway	Puerta de enlace a la red de servicio de acceso
ASN-M	Access Service Network Anchored Mobility	Movilidad anclada en la red de servicio de acceso
ASN-M	Connectivity Service Network Anchored Mobility	Movilidad anclada en la red de servicio de conectividad
ATM	Asynchronous Transfer Mode	Modo de transferencia asíncrona
BE	Best Effort	Mejor esfuerzo
BGP	Border Gateway Protocol	Protocolo de puerta de enlace interior
BPSK	Binary Phase Shift Keying	Llaveo en desplazamiento de fase binario
BS	Base Station	Estación base
BWA	Broadband Wireless Access	Acceso inalámbrico de banda ancha
CC	Convolutional Code	Código convolucional
CCI	Co-channel Interference	Interferencia co-canal
CCM	Counter with Cipher-block chaining Message authentication code	Código de Autenticación de Mensajes en cadena para el bloqueo de cifrado
CDMA	Code Division Multiple Access	Acceso múltiple por división de código
CID	Connection Identifier	Identificador de conexión
CINR	Carrier to Interference and Noise Ratio	Relación señal a ruido e interferencia
CMAC	CodeCipher-based Message Authentication Code	Mecanismo de autenticación de mensajes basado en el empleo de un elemento cifrador
CODEC	Compresor-Decompresor	Compresor-Decompresor
CP	Cyclic Prefix	Prefijo cíclico
CPE	Customer-premises equipment	Equipo local del cliente
CPS	Common Part Sublayer	Sub-capa parte común
CPU	Central Processing Unit	Unidad central de procesamiento
CQI	Channel Quality Indicator	Indicador de calidad del canal

CQICH	Channel Quality Indicator Channel	Canal indicador de calidad del canal
CRC	Cyclic Redundancy-Check	Chequeo de redundancia cíclica
CS	Convergence Sublayer	Sub-capa de convergencia
CSN	Connectivity Service Network	Red de servicio de conectividad
CTC	Convolutional Turbo Code	Turbo código convolucional
DCD	Downlink Channel Descriptor	Descriptor del canal descendente
DES	Data Encryption Standard	Estándar de cifrado de datos
DHCP	Dynamic Host Configuration Protocol	Protocolo de configuración dinámica
DL	Downlink	Descendente
DNS	Domain Name Server	Servidor de nombres de dominio
DSA	Dynamic Service Addition	Adición dinámica de servicio
EAP	Extensible Authentication Protocol	Protocolo de autenticación extensible
ertPS	Extended Real-Time Polling Service	Servicio de registro en tiempo real extendido
ETE	End to End	Extremo a extremo
ETSI	European Telecommunications Standards Institute	Instituto europeo de estándares de telecomunicaciones
EVDO	Evolution-Data Optimized	Evolución de datos optimizado
FA	Foreign Agent	Agente foráneo
FBAck	Fast-Binding Acknowledgement	Acuse de recibo de unión rápida
FBSS	Fast Base Station Switching	Conmutación rápida de estación base
FBU	Fast Binding Update	Actualización de unión rápida
FCH	Frame Control Header	Encabezado de control de trama
FDD	Frequency Division Duplex	Duplexado por división de frecuencia
FFT	Fast Fourier Transform	Transformada rápida de Fourier
FMIP	Fast Mobile Internet Protocol	Protocolo rápido de internet móvil
FNA	Fast Neighbor Advertisement	Anuncio rápido de vecinos
FQDN	Fully Qualified Domain Name	Nombre de dominio totalmente calificado
FSM	Finite State Machine	Máquina de estado finito
FTP	File Transfer Protocol	Protocolo de transferencia de archivos
GSM-FR	Global System for Mobile communications - Full Rate	Sistema global para comunicaciones móviles – Tasa completa
HA	Home Agent	Agente local
HAck	Handover Acknowledge	Acuse de recibo de conmutación de enlace
HARQ	Hybrid Automatic Repeat reQuest	Solicitud de repetición automática híbrida
HI	Handover Initiation	Inicio de conmutación de enlace
HMAC	Hashed Message Authentication	Autenticación de mensaje basada en resúmenes
H-NSP	Home Network Service Provider	Proveedor de servicio de red local
HO	Handover ó Handoff	Conmutación de enlace
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers	Instituto de ingenieros eléctricos y electrónicos
IETF	Internet Engineering Task Force	Grupo de trabajo en ingeniería de internet
IMS	IP Multimedia Subsystem	Subsistema multimedia IP

IP	Internet Protocol	Protocolo de internet
IRDP	Internet Control Message Protocol Router Discovery Protocol	Protocolo de descubrimiento de enrutadores basado en el protocolo de control de mensajes de internet
ISI	Inter Symbol Interference	Interferencia entre símbolos
ISM	Industrial, Scientific and Medical	Industrial, científica y médica
L2-HO	Layer 2 Handover	Conmutación de enlace capa 2
L3-HO	Layer 3 Handover	Conmutación de enlace capa 3
LDPC	Low-Density-Parity-Check	Chequeo de paridad de baja densidad
LLC	Logical Link Control	Control de enlace lógico
LOS	Line-of-Sight	Línea de vista
LTE	Long Term Evolution	Evolución a largo plazo
MAC	Media Access Control	Control de acceso al medio
MBS	Multicast and Broadcast Service	Servicio de multicast y broadcast
MDHO	Macro Diversity Handover	Conmutación de enlace por macro diversidad
MIMO	Multiple Input Multiple Output	Múltiples entradas múltiples salidas
MIP	Mobile Internet Protocol	Protocolo de internet móvil
MIT	Massachussets Institute of Technology	Instituto de tecnología de Massachussets
MN	Mobile Node	Nodo móvil
MS	Mobile Station	Estación móvil
MSDU	MAC Service Data Unit	Unidad de servicio de datos MAC
NACK	Not Acknowledge	Sin acuse de recibo
NAP	Network Access Provider	Proveedor de red de acceso
NLOS	Non Line-of-Sight	Sin línea de vista
NRM	Network Reference Model	Modelo de referencia de red
nrtPS	Non-Real-Time Polling Service	Servicio de registro no en tiempo real
NSP	Network Service Provider	Proveedor de servicio de red
NWG	Network Working Group	Grupo de trabajo de red
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing	Multiplexaje por división de frecuencia ortogonal
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access	Acceso múltiple por división de frecuencia ortogonal
OLOS	Obstructed Line-of-Sight	Línea de vista obstruida
OPNET	Optimized Network Engineering Tool	Herramienta de ingeniería de redes optimizada
OSI	Open Systems Interconnection	Interconexión de sistemas abiertos
PC	Personal Computer	Computadora personal
PCM	Pulse Code Modulation	Modulación por codificación de pulsos
PCMCIA	Personal Computer Memory Card International Association	Asociación internacional de tarjetas de memoria para computadora personal
PDA	Personal Digital Assistant	Asistente digital personal
PDU	Packet Data Unit	Unidad de paquete de datos
PHY	Physical layer	Capa física
PKM	Public Key Management	Gestión de llaves públicas

PL	Pathloss	Pérdidas de propagación
PMP	Point to multipoint	Punto-Multipunto
PPP	Point to Point Protocol	Protocolo punto a punto
PrRtAdv	Proxy Router Advertisement	Anuncio de enrutador proxy
QAM	Quadrature Amplitude Modulation	Modulación de amplitud en cuadratura
QoS	Quality of Service	Calidad de servicio
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying	Llaveo por desplazamiento de fase en cuadratura
RFC	Request For Comments	Solicitud de comentarios
RP	Reference Point	Punto de referencia
RPE-LTP	Regular Pulse Excitation - Long Term Prediction	Predicción a largo plazo de la excitación regular del pulso
RS	Reed-Solomon	Reed-Solomon
rtPS	Real-Time Polling Service	Servicio de registro en tiempo real
RtSolPr	Router Solicitation for Proxy	Solicitud del enrutador por un proxy
SFID	Serficio Flow Identifier	Identificador de flujo de servicio
SISO	Single Input Single Output	Entrada única salida única
SLA	Service Level Agreement	Acuerdo de nivel de servicio
SM	Spatial Multiplexing	Multiplexaje espacial
SNMP	Simple Network Management Protocol	Protocolo simple de gestión de red
SNR	Signal to Noise Ratio	Relación señal a ruido
SOFDMA	Scalable Orthogonal Frequency Division Multiple Access	Acceso múltiple por división de frecuencia ortogonal escalable
SS	Security Sublayer	Sub-capa de seguridad
STC	Space Time Coding	Codificación espacio tiempo
TCP	Transmission Control Protocol	Protocolo de control de transmisión
TDD	Time Division Duplex	Duplexaje por división de tiempo
TDMA	Time Division Multiple Access	Acceso múltiple por división de tiempo
TFTP	Trivial File Transfer Protocol	Protocolo de transferencia de archivos trivial
UCD	Uplink Channel Descriptor	Descriptor de canal ascendente
UDP	User Datagram Protocol	Protocolo de datagrama de usuario
UGS	Unsolicited Grant Service	Servicio de registro no solicitado
UL	Uplink	Ascendente
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System	Sistema universal de telecomunicaciones móviles
VoIP	Voice over IP	Voz sobre IP
WiFi	Wireless Fidelity	Fidelidad inalámbrica
WiMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access	Interoperabilidad mundial para acceso por microondas
PIRE	Potencia Isotrópica Radiada Efectiva	
FI	Facultad de Ingeniería	
UNAM	Universidad Nacional Autónoma de México	

Modelos de pérdidas de propagación

Los modelos de pérdidas de propagación predicen las pérdidas de potencia de la señal transmitida en función de la distancia, las características del emisor y del receptor y de parámetros generales del entorno. Existen modelos teóricos y empíricos. Los del primer grupo se obtienen a partir de la teoría electromagnética y de la óptica geométrica. Son simples, universales y sirven como base teórica para comprender modelos más complejos. Entre los más populares están el de Friis y el de dos rayos. Los ambientes actuales son demasiado complejos para que puedan ser modelados con cierta precisión. En la práctica se utilizan modelos empíricos que han sido desarrollados a partir de mediciones tomadas en varios escenarios reales. A diferencia de los teóricos solo son útiles en escenarios con ciertas características, entre las que se encuentran la frecuencia de la portadora, la distancia entre la BS y la MS, y la altura de las antenas de la BS y de la MS. Actualmente se utilizan extensivamente los modelos Erceg, Vehicular, Peatonal, Hata y su modificación COST-W, que de acuerdo a [3] es el más adecuado para las condiciones de la Ciudad de México.

Erceg

Desarrollado a partir de datos experimentales obtenidos por “AT&T Wireless Services” en 95 celdas en los Estados Unidos a 1.9Ghz. Clasifica a los terrenos en tres categorías que se presentan en la tabla B1.

Tabla B1. Categorías en el modelo Erceg

Categoría	Descripción
A	Terreno montañoso con densidad de árboles moderada-alta y altas pérdidas de propagación.
B	Terreno montañoso con densidad de árboles ligera o terreno plano con densidad de árboles moderada-alta y pérdidas de propagación intermedias.
C	La mayor parte del terreno es plano con densidad de árboles ligera y pérdidas de propagación bajas.

Para las tres categorías, las pérdidas de propagación promedio a una distancia d , mayor a d_0 , están dadas por:

$$PL = 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi d_0}{\lambda} \right) + 10\gamma \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) + s \quad d > d_0$$

Donde λ es la longitud de onda en metros, $d_0 = 100\text{m}$, s representa a las fluctuaciones lentas, γ es el exponente de pérdidas de propagación dado por:

$$\gamma = a - bh_b + d / h_b$$

h_b es la altura de la BS en metros, y, a , b , c , son constantes que dependen del tipo de terreno.

Para utilizarlo en frecuencias altas (alrededor de 2.5 GHz) se le deben sumar factores de corrección X_f y X_h , dados por:

$$X_f = 6 \log_{10}(f / 2000)$$

$$X_h = -K \log_{10}(h / 2)$$

Donde k es -10.8 para terrenos tipo a y b, y k es -20 para terrenos tipo c.

Peatonal

Está definido en la recomendación M.1225 de la UIT-R. Se utiliza para entornos caracterizados por células pequeñas y con baja potencia de transmisión. Las BSs tienen antenas de poca altura localizadas en exteriores; las MSs están en las calles o en interiores de residencias o edificios.

De forma general las pérdidas de propagación totales, en dB, se expresan como la suma de las pérdidas del espacio libre, las pérdidas de difracción entre el tejado y la calle, y la reducción debida a la difracción de pantalla múltiple tras las filas de edificio:

$$L = L_{fs} + L_{rts} + L_{msd}$$

El desarrollo de cada término no se incluye aquí y puede ser consultado en [M.1225]. En entornos urbanos y suburbanos la expresión se puede reducir a:

$$L = 40 \log_{10} d + 30 \log_{10} f + 49$$

Donde d es la distancia en km entre la BS y la MS, y f es la frecuencia de la portadora en MHz. Esta expresión es válida para casos sin línea de vista (NLOS) y con fluctuaciones lentas tipo log-normal con una desviación estándar de 10dB para usuarios de exteriores y de 12dB para usuarios de interiores. Es el peor caso posible

Vehicular

Está definido en la recomendación M.1225 de la UIT-R. Se utiliza para entornos caracterizados por células grandes y con alta potencia de transmisión.

De forma general las pérdidas de propagación totales, en dB, se expresan como la suma de las pérdidas del espacio libre, las pérdidas de difracción entre el tejado y la calle, y la reducción debida a la difracción de pantalla múltiple tras las filas de edificio:

$$L = L_{fs} + L_{rts} + L_{msd}$$

El desarrollo de cada término no se incluye aquí y puede ser consultado en [M.1225]. En entornos urbanos y suburbanos la expresión se puede reducir a:

$$L = 40(1 - 4 \times 10^{-3} \Delta h_b) \log_{10} d - 18 \log_{10} \Delta h_b + 21 \log_{10} f + 80$$

Donde d es la distancia en km entre la BS y la MS, f es la frecuencia de la portadora en MHz, y Δh_b es la altura en metros de la antena de la BS, medida a partir del nivel promedio de los tejados. Esta expresión es válida para cuando hay fluctuaciones lentas tipo log-normal con una desviación estándar de 10dB, y cuando Δh_b va de 0 a 50m.