



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

POSGRADO EN CIENCIA E INGENIERÍA DE LA COMPUTACIÓN

“ANÁLISIS Y DISEÑO DE MECANISMOS DE HANDOFF
EN REDES INALÁMBRICAS DE BANDA ANCHA
IEEE 802.16e”

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

**MAESTRO EN INGENIERÍA
(COMPUTACIÓN)**

P R E S E N T A:

VÍCTOR TOLEDO PÉREZ

DIRECTOR DE TESIS:

DR. VÍCTOR RANGEL

MÉXICO, D.F.

2009



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Dedicatorias

A mi mamá Margarita Pérez Beltrán por su apoyo

A mi papá y hermanos que siempre me han apoyado

Y en general a toda mi familia que siempre me apoyo, en especial a mis abuelitas

Agradecimientos

Al Dr. Víctor Rangel Licea por su apoyo y paciencia para la realización de este trabajo, sin los cuales no habría sido posible la culminación del mismo.

A la DGAPA-UNAM por el apoyo recibido para la realización de este trabajo de tesis a través de los proyectos PAPIIT 104907 y PAPIME 103807.

Al Posgrado en Ciencia en Ingeniería de la Computación por el apoyo recibido para realizar mis estudios de maestría. Así como por la adquisición de licencias.

A la Universidad Nacional Autónoma de México por las facilidades brindadas en la realización de mis estudios profesionales.

A los sinodales: Dr. Gerardo Vega Hernández, Dr. Javier Gómez Castellanos, Dr. Miguel López Guerrero y Dr. Raúl Santos Aquino, por el tiempo dedicado a la revisión de esta tesis.

A mis compañeros y amigos del posgrado por el aliento que me dieron y el apoyo que me brindaron y sobre todo por que creyeron en mí.

ÍNDICE DE CONTENIDO

Resumen	vii
Capítulo 1	1
1.1 Introducción.....	2
1.2 Definición del problema	3
1.3 Objetivos.....	5
1.4 Metodología.....	5
1.5 Contribución y relevancia.....	6
1.6 Estudios relacionados	6
1.7 Estructura de la tesis	8
Capítulo 2	9
2.1 Antecedentes.....	10
2.2 Tecnologías de Banda Ancha	13
2.3 Tecnologías Inalámbricas	14
2.4 Redes inalámbricas de banda ancha	16
2.5 Handover (Handoff)	20
2.6 Conclusiones.....	21
Capítulo 3	23
3.1 Estandarización.....	24
3.2 El estándar IEEE 802.16.....	24
3.3 Arquitecturas WiMAX	27
3.4 Capa Física (PHY).....	29
3.5 Capa de Control de Acceso al Medio (MAC)	34
3.6 Control de admisión	36
3.7 El estándar 802.16e y WiMAX Móvil	41
3.8 Mobile IP	51
3.9 VoIP: Voz sobre IP.....	53
3.10 Conclusiones.....	56
Capítulo 4	57
4.1 Introducción.....	58
4.2 Modelo de simulación	58
4.3 Modelo de procesos WiMAX.....	61
4.4 Modelo inicial de pruebas	64
4.5 Análisis del SNR (Signal to noise ratio).....	66
4.6 Análisis del tráfico de mensajes	67
4.7 Proceso de transmisión de un paquete de datos.....	69
4.8 Retardos en la transmisión de mensajes	72
4.9 Proceso de Handover	73
4.10 Conclusiones.....	76

Capítulo 5	77
5.1 Introducción.....	78
5.2 Retardos en la transmisión de mensajes	78
5.3 Activación del mecanismo	80
5.4 Proceso de escaneo	81
5.5 Modelo de propagación	83
5.6 Análisis de la implementación del mecanismo de handover	86
5.7 Mobile IP	91
5.8 Conclusiones.....	95
Capítulo 6	97
6.1 Conclusiones.....	98
6.2 Trabajos futuros.....	99
6.3 Nota final	100
Apéndice A.....	101
A.1 Modelo de propagación para un canal inalámbrico móvil	101
A.2 Modelo de propagación vehicular	102
A.3 Modelo de propagación pedestre.....	102
Apéndice B.....	103
B.1 Código en collect_measurement dentro del plano de control.....	104
B.2 Código en el módulo de movilidad	105
Glosario de Acrónimos.....	109
Bibliografía.....	113

ÍNDICE DE FIGURAS

Capítulo 1

Figura 1.1 Cobertura de una Estación Base.....	3
Figura 1.2 Estructura lógica de una red celular.....	3
Figura 1.3. Ejemplo ilustrativo de handover	4

Capítulo 2

Figura 2.1. Cobertura de tecnologías inalámbricas	15
Figura 2.2. Alternativas	16
Figura 2.3. Alcance de WiMAX.....	19
Figura 2.4. Handover por cambio de BS	21

Capítulo 3

Figura 3.1. Estructura de capas 802.16.....	26
Figura 3.2. Arquitecturas WiMAX.....	27
Figura 3.3. Estructura de la trama FDD	30
Figura 3.4. Formato TDD compartiendo la misma frecuencia.....	30
Figura 3.5. Formato TDD, frecuencias diferentes para UL y DL	31
Figura 3.6. Estructura de símbolo OFDM y OFDMA.....	32
Figura 3.7. Símbolo OFDM.....	32
Figura 3.8. Subchannels OFDM.....	33
Figura 3.9. Descripción de la estructura OFDMA.....	33
Figura 3.10. Estructura de un Mapa	34
Figura 3.11. Proceso de inicialización.....	37
Figura 3.12. Diagrama de intercambio de mensajes para Ranging	38
Figura 3.13. Proceso de Handover	47
Figura 3.14. Pasos para realizar un handover.....	48
Figura 3.15. Procedimiento de HO en capa MAC.....	49
Figura 3.16. Representación de Mobile IP	53
Figura 3.17. Trayectoria de un paquete de voz.....	54

Capítulo 4

Figura 4.1. Elementos de OPNET Modeler.....	60
Figura 4.2. Capa MAC WiMAX	61
Figura 4.3. Plano de control en la capa MAC de una MS	62
Figura 4.4. Plano de control en la capa MAC de una BS	63
Figura 4.5. Modelo inicial de pruebas	65
Figura 4.6. SNR con flujos de voz	67
Figura 4.7. Formato de un paquete	69
Figura 4.8. Transmisión de un paquete de datos en el UL	70
Figura 4.9. Tiempos de transmisión	72
Figura 4.10. Procedimiento que sigue el mecanismo de HO.....	74

Capítulo 5

Figura 5.1. Delay BE	79
Figura 5.2. Señal recibida de las 3 BS	80
Figura 5.3. Mecanismo de HO propuesto.....	81
Figura 5.4. Antenna Gain = -1	85
Figura 5.5. Modelo de antena = 14dBi	85
Figura 5.6. Escaneo	86
Figura 5.7. Análisis de los parámetros de escaneo	86
Figura 5.8. Comparativa delay de handover	87
Figura 5.9. Inicio del proceso de Ranging durante el handover	88
Figura 5.10. Tráfico enviado y recibido	88
Figura 5.11. Paquetes perdidos.....	89
Figura 5.12. Escenario para escaneos y desempeño del mecanismo de handoff.....	89
Figura 5.13. Comparativa efecto del mecanismo sobre tráfico de voz.....	90
Figura 5.14. Comparativa efecto del mecanismo sobre tráfico continuo	91
Figura 5.15. Tráfico y Movilidad con Mobile IP	92
Figura 5.16. Tráfico enviado por Túneles de Mobile IP	93
Figura 5.17. Mobile IP con tráfico continuo	94
Figura 5.18. Pérdida de paquetes con tráfico continuo con Mobile IP y mecanismo de HO activado.....	95
Figura 5.19. Pérdida de paquetes con tráfico continuo considerando el mecanismo de HO propuesto	95

Apéndice B

Figura B.1. Modificaciones al Plano de control	104
--	-----

ÍNDICE DE TABLAS

Capítulo 2

Tabla 2.1. Tecnologías alámbricas e inalámbricas	14
Tabla 2.2. Tecnologías inalámbricas de acuerdo a su cobertura	16

Capítulo 3

Tabla 3.1. Parámetros relevantes, capa MAC y PHY [2].....	25
Tabla 3.2. Evolución del estándar 802.16	25
Tabla 3.3. Etapas de un handover.....	43
Tabla 3.4. Especificaciones para Mobile IP	52
Tabla 3.5. RFCs relacionados con Mobile IP.....	52
Tabla 3.6. Elementos de Mobile IP	52
Tabla 3.7. Protocolos para VoIP.....	54
Tabla 3.8. Codificadores de Voz	55
Tabla 3.9. Encapsulamiento para G.711.....	55

Capítulo 4

Tabla 4.1. Funciones de procesos de control y movilidad.....	68
Tabla 4.2. Mensajes de administración de movilidad	69
Tabla 4.3. Tiempos de transmisión.....	72

Capítulo 5

Tabla 5.1. Estructura para una BS	82
Tabla 5.2. Estructura general de escaneo	82
Tabla 5.3. Parámetros de escaneo.....	82
Tabla 5.4. Valores usados para escaneo	83
Tabla 5.5. Modelos de pathloss	84
Tabla 5.6. Modelos multipath.....	84

Resumen

La movilidad en redes de datos hoy en día se hace imprescindible con dispositivos cada vez más pequeños que cumplen las funciones de una computadora personal. En el desarrollo actual de ésta y otras tecnologías lo que se busca es la compatibilidad entre dispositivos, aún cuando estos sean diseñados por distintos fabricantes.

Es por eso que el Foro WiMAX se encarga de regular los desarrollos, certificando los productos diseñados para esta tecnología basándose en los estándares 802.16-2004 y 802.16e-2005.

Uno de los elementos más importantes para el éxito de ésta tecnología en servicios de movilidad es el handover, que es un procedimiento que permite a un nodo móvil cambiar su conexión de una estación base a otra. Y uno de los objetivos del estándar es ofrecer calidad de servicio (QoS) mientras los dispositivos mantienen una conexión a través de una estación base WiMAX, esto representa un gran reto para el desarrollo de esta tecnología.

En el presente trabajo se realizó un estudio del procedimiento de handover para redes WiMAX para dar soporte a usuarios móviles. Para esto se usó el simulador de redes OPNET *Modeler*, analizando en primer lugar los elementos de WiMAX integrados en éste como son soporte en capa física y MAC. Se realizaron algunas modificaciones para mejorar el mecanismo, reduciendo la pérdida de paquetes durante el proceso de cambio de estación base para las estaciones móviles, esto al reducir el tiempo en que se completa este proceso. Adicionalmente, para la capa de red se realizó un estudio sobre el funcionamiento de *Mobile IP*.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

Preámbulo

Desde la creación de inventos como el telégrafo y el teléfono que causaron un gran cambio en la forma en que las personas se comunicaban a grandes distancias, hasta las actuales redes de datos con capacidades de transmisión inalámbrica (como lo son las redes de telefonía celular) ha crecido considerablemente la necesidad de estar comunicados en todo momento y en cualquier lugar.

Dadas las prestaciones de las redes actuales con nuevas tecnologías, las comunicaciones ya no se limitan sólo a conversaciones a distancia; sino que ahora, es posible el envío de todo tipo de información; por lo que se ha formado así una cultura basada en el intercambio de información, imágenes, video en tiempo real, entre otros, esto a través del uso de dispositivos tecnológicos cada vez más pequeños.

Sin embargo estas tecnologías son independientes entre sí por lo que una tecnología que ofrece servicios de voz o no cubre servicios de datos o su alcance es limitado, por lo que es necesario el desarrollo de una tecnología que sea capaz de integrar todas las existentes en este ámbito; Reuniendo las altas tasas de transmisión por un lado y la movilidad por el otro.

1.1 Introducción

Debido a la incesante necesidad de estar comunicado en todo momento y en todo lugar y al gran despliegue de las redes de computadoras en especial las redes inalámbricas, la tecnología ha ido evolucionando rápidamente para ajustarse a tales necesidades.

Hoy en día, las redes celulares permiten la comunicación continua ofreciendo cobertura sobre grandes áreas, dando a los usuarios la facilidad de desplazarse mientras mantienen una conversación. No obstante la demanda de nuevos servicios que requieren de mayores anchos de banda ha llevado al desarrollo de nuevas y mejores tecnologías, por lo que en poco tiempo las redes basadas en el protocolo IP superaran la limitante que ahora tienen, ofreciendo anchos de banda mejores a los ofrecidos por las redes celulares y mayores áreas de cobertura.

Actualmente disponemos de conexiones inalámbricas como las establecidas en el estándar IEEE 802.11 (WiFi), que pese a su innegable funcionalidad y éxito tienen varias limitantes, como puede ser un alcance limitado al aire libre que varía dependiendo de la versión [1]. Un panorama que promete cambiar con la inminente aparición de la tecnología WiMAX (*World Interoperability for Microwave Access*) basada en el estándar IEEE 802.16 [2], capaz de ofrecer conexiones de banda ancha alcanzando distancias de hasta 50km [3] con mejores tasas de transmisión, de bajo costo, fácil de implementar y que supone la rampa de lanzamiento ideal para otras tecnologías en plena expansión como la transmisión de video en tiempo real o telefonía mediante el uso de Internet (VoIP) para lo cual es útil que esta tecnología cuente con un buen soporte de movilidad y calidad de servicio (QoS).

El impulso de esta tecnología está a cargo de el Foro WiMAX [23] que es un Consorcio, a nivel internacional, de empresas dedicadas a estudiar y diseñar los parámetros y estándares de esta tecnología, además de analizar y probar los desarrollos implementados basados en el estándar. El desarrollo de esta tecnología enfocado a usuarios fijos tiene ya un gran avance; sin embargo, en lo que se refiere al modelo para usuarios móviles los procedimientos que han sido desarrollados aunque cumplen con el estándar todavía tienen muchas carencias.

1.2 Definición del problema

Los sistemas de comunicación inalámbrica, basan la transmisión de información a través de señales de radiofrecuencia. Donde una antena recibe y transmite señales desde y hacia los usuarios, sin embargo, las señales emitidas por una estación base (BS: *Base Station*) tienen un alcance limitado que cubre un área específica como se muestra en la figura 1.1. Una estación base no es más que un sistema de antenas complementado con un sistema que gestiona su funcionamiento.

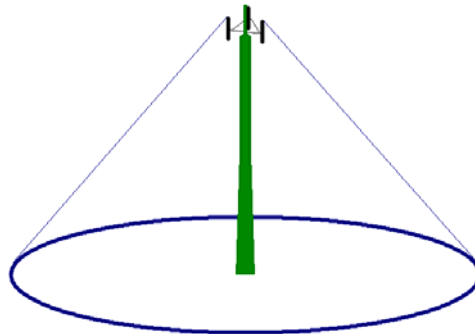


Figura 1.1 Cobertura de una Estación Base

Para ampliar la cobertura y así proveer servicio sobre un área mayor, se crea una red celular, que no es más que un arreglo de estaciones base (BS) que están distribuidas y organizadas a modo de cubrir la mayor área posible sin que interfieran entre ellas, tal como se muestra en la figura 1.2.

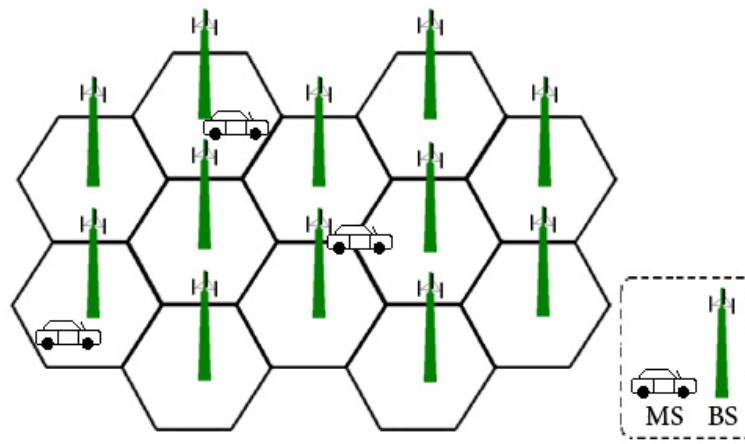


Figura 1.2 Estructura lógica de una red celular

Para que un equipo inalámbrico pueda intercambiar información con otro equipo en Internet, es necesario que se encuentre conectado a través de una estación base (BS), a

la cual se debe asociar y permanecer conectado durante todo el tiempo que dure el intercambio de información.

En cualquier sistema inalámbrico, para poder ofrecer servicios de movilidad es necesario definir un mecanismo que permita al dispositivo móvil (MSS: *Mobile Subscriber Station*) mantener el intercambio ininterrumpido de información mientras se transfiere la conexión de una estación base (BS) a otra.

Al mecanismo que permite que esto sea posible se le denomina *handover* (también conocido como *handoff*, HO). Un ejemplo ilustrativo se muestra en la figura 1.3. Así, el *handoff* (HO) tiene como objetivo brindar conectividad entre diferentes estaciones base (BS), es decir, transferir el servicio de una estación base (BS) a otra mientras el usuario móvil (MSS) se desplaza.

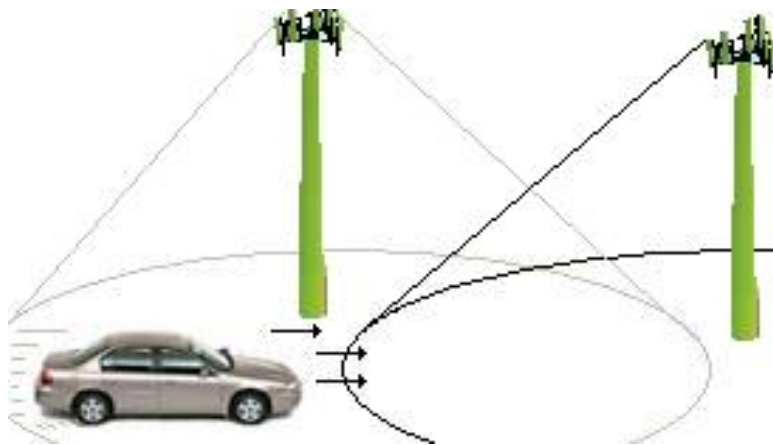


Figura 1.3. Ejemplo ilustrativo de handover

Uno de los problemas principales que presenta el desarrollo de un mecanismo de *handoff* (HO) especialmente para las redes WiMAX es reducir el tiempo que dura transferir la conexión de una estación base (BS) a otra y lograr que esta transferencia sea lo más estable posible.

Por otro lado, ya que una de las características fundamentales de WiMAX es su capacidad de ofrecer una calidad de servicio (QoS) que permita soportar servicios tales como, Voz sobre IP (VoIP) y video conferencias en tiempo real, entre los más susceptibles a retardos. Es por eso que se busca reducir el tiempo en el que se lleva a cabo el *handover* (HO).

1.3 Objetivos

Lo que se propone en el presente proyecto es realizar un estudio que involucra el procedimiento de *handover* (HO) establecido en el estándar [4] para lograr diseñar un algoritmo que optimice el desarrollo de este proceso y permita reducir los tiempos de retardo durante el cambio de BS.

El planteamiento involucra mantener el nivel de calidad de servicio (QoS) requerido por cada usuario fijo y móvil, durante la ejecución del mecanismo de *handoff* (HO). Esto mediante la selección adecuada de los parámetros y eliminando las redundancias innecesarias con el fin de brindar una buena plataforma, en especial para dar soporte a tecnologías prometedoras como puede ser VoIP.

Algunos de los puntos a tomar en cuenta son la optimización del tiempo de inicio del HO, los procesos de selección de BS destino, la rápida sincronización y asociación entre otros. Para esto, se analizará, definirá y probará un algoritmo de *handoff* (HO) que cumpla con el estándar y sea capaz de reducir los tiempos en que éste se lleva a cabo para ofrecer el nivel de QoS que se establece en éste. Actualmente existen algunas propuestas que veremos más adelante.

1.4 Metodología

Se realizará un análisis amplio de los estudios previos que se han hecho con referencia al mecanismo de HO y que han sido publicados para el estándar IEEE 802.16e [4] con el objetivo de analizar sus características y poder definir los problemas presentes.

De acuerdo a los estudios previos, se identificarán los parámetros clave que involucra el proceso y en base a éstos se definirá un algoritmo que permita hacer un mecanismo de HO eficiente que cumpla con los requerimientos establecidos en el estándar.

Se implementará el algoritmo diseñado realizando las pruebas necesarias mediante simulaciones con las características del estándar de acuerdo con el Consorcio Internacional, Foro WiMAX [23], con el fin de obtener los datos que muestren la eficiencia del algoritmo.

Para esto se hará uso de la herramienta de simulación de redes OPNET *Modeler* [24] que incluye un modelo de simulación de WiMAX basado en el estándar. Una vez implementado, se harán los ajustes necesarios al algoritmo de acuerdo con los resultados obtenidos con el objetivo de hacerlo más óptimo y eficiente.

Para la implementación del algoritmo en OPNET *Modeler* se requiere de licencias de uso tanto para el *Modeler* como para el modelo *Wireless* y el modelo WiMAX; mismas que han sido provistas por el Posgrado en Ciencia e Ingeniería de la Computación.

1.5 Contribución y relevancia

Se pretende que el método a desarrollar se pueda implementar conforme al modelo establecido por el Consorcio Internacional encargado del desarrollo de WiMAX y que cumpla con los lineamientos del estándar IEEE 802.16e [4].

Logrando así optimizar el proceso de *handoff* (HO) y mejorar los tiempos entre el cambio de estaciones base (BS) para que este sea transparente al usuario y a su vez permita mantener la calidad de servicio (QoS) para brindar soporte a las aplicaciones susceptibles a retardos como VoIP, video en tiempo real, entre otros. Y con esto, cumplir con los requerimientos de los servicios que cada vez son más demandados por usuarios móviles que requieren estar comunicados en todo momento.

1.6 Estudios relacionados

Algunos trabajos relacionados con el mecanismo de *handoff* para WiMAX existentes a la fecha sugieren nuevos algoritmos que atacan distintos problemas que presenta el propio mecanismo de HO.

En uno de ellos [5], se propone un mecanismo de HO en el que se lleva a cabo la asociación con la BS destino durante la etapa de *ranging* y hay un pre-registro con las BS vecinas con el fin de garantizar un HO transparente. El proceso de HO inicia una vez que la calidad de la señal cae por debajo de un umbral previamente definido. En este artículo se demuestra, que el estándar cuenta con los elementos necesarios para mantener la QoS durante el proceso de handover.

Por otra parte, en [6] se plantea reducir el retardo del proceso de HO. Mostrando los parámetros involucrados que producen algún retardo y se puede apreciar que de los diferentes parámetros es posible mejorar los tiempos de manera considerable. Sin embargo en este estudio por simplicidad se toman valores fijos para algunos de estos tiempos.

En [7] se demuestra que es posible implementar un mecanismo de handover que permita mantener la QoS incluso para aplicaciones que demandan gran cantidad de recursos. Además se hace un análisis del desempeño para mejorar los procedimientos de handover.

En [8] se indican los distintos niveles de asociación de HO, Nivel 0 (L0) escaneo y asociación sin coordinación, Nivel 1 (L1) asociación con coordinación y Nivel 2 (L2) asociación de red asistida y se menciona el tiempo de HO mínimo requerido (DT: *disruption time*) por cada una 280ms para L0, 230ms para L1 y 60ms para L2. También se menciona que un DT de 50ms es suficiente para transmisiones multimedia y que un tiempo de interrupción de 200ms generalmente es aceptable.

Estos artículos fueron estudiados con la finalidad de conocer y entender mejor el comportamiento del proceso de handover y demás procedimientos involucrados, al mismo tiempo que se identificaron los aspectos fundamentales, necesarios para su funcionamiento. Y sirvieron como punto de partida para identificar los puntos que habrían de estudiarse para la elaboración de los estudios y de este documento.

1.7 Estructura de la tesis

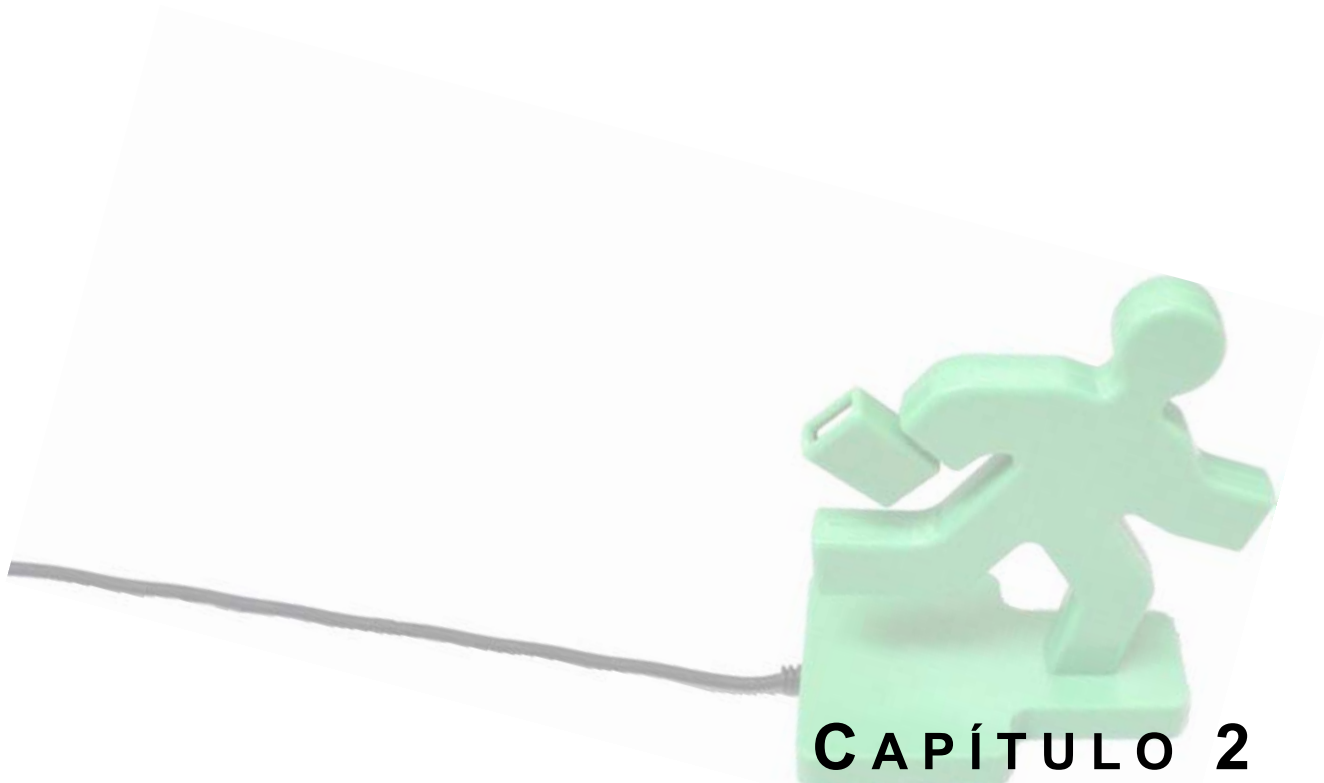
En el capítulo 2, se presentan los antecedentes mencionando algunas tecnologías inalámbricas y se da una introducción a las redes WiMAX y handover.

En el capítulo 3, se da una introducción al estándar IEEE 802.16 dando una descripción general de los elementos más relevantes de este, describiendo la capa Física y MAC, el control de admisión y puntualizando en la versión 'e' (IEEE 802.16e), que trata los aspectos de movilidad como SOFDMA, proceso de escaneo, tipos de handover, *Mobile IP* y VoIP.

El capítulo 4, muestra una descripción de los elementos del simulador para redes OPNET *Modeler*, se describen las partes del modelo WiMAX implementado en este y algunos escenarios que serán utilizados para realizar los experimentos.

En el capítulo 5, Se describen otros escenarios, el modelo de propagación y se muestran los resultados obtenidos en las simulaciones, para los procesos de escaneo, rendimiento del mecanismo de handover y *Mobile IP*.

En el capítulo 6, se presentan las conclusiones finales, haciendo un análisis de los resultados más sobresalientes, también se sugieren algunos trabajos futuros que pueden realizarse entorno a handover y finalmente se hace una referencia al estándar 802.21.



CAPÍTULO 2

TECNOLOGÍAS INALÁMBRICAS

Algunas ventajas de las redes cableadas son su alta tasa de transmisión y que son poco vulnerables a las interferencias, sin embargo, hoy en día vivimos en un mundo en constante evolución donde estar comunicado a toda hora y en todo lugar es fundamental. Es por eso que surgen las redes inalámbricas, en un principio ofreciendo servicios como el de la telefonía celular.

Las redes celulares han tenido un gran crecimiento en el número de servicios que brindan (voz, sms, mms, etc.) lo que ha hecho que los recursos que estas ofrecen se vean superados para cumplir con las nuevas demandas que van surgiendo. Esto lleva a la necesidad de crear redes de mayor capacidad y que tengan una mayor cobertura.

Así, abriendo camino a las redes de 4G surge WiMAX como una red de acceso inalámbrico de banda ancha para áreas metropolitanas.

2.1 Antecedentes

Los aspectos de movilidad en un principio no fueron de gran interés debido a que los equipos de comunicación eran grandes y pesados. Sin embargo hoy en día con la creciente aparición de equipos cada vez más pequeños (Celulares, PDA's, *laptops*, etc.) que ofrecen diversas aplicaciones multimedia y comunicación continua; crece la demanda de movilidad y mayor cobertura en sistemas de red inalámbricos de banda ancha.

La historia de las comunicaciones se remonta a los orígenes del ser humano quien desde sus inicios ha buscado diversas formas para comunicarse con sus semejantes. Logrando cada vez formas más eficientes de comunicación de las cuales, sin duda, el teléfono fue lo que revolucionó las comunicaciones a distancia, aunque la televisión también tuvo un papel muy importante para el desarrollo de estos sistemas.

Gracias al uso de estas tecnologías, que permitieron la transmisión de señales de voz e imágenes a grandes distancias prácticamente de manera instantánea, las comunicaciones a distancia (telecomunicaciones) tuvieron un gran éxito.

Posteriormente, el desarrollo de las computadoras y la aparición de Internet permitieron la transmisión ya no solo de imágenes y voz si no que incluso de datos e información, que sin embargo para lograr esto, aún hoy en día, se vale del uso de cables.

2.1.1 Comunicación inalámbrica

En la comunicación inalámbrica no se utiliza el cable como medio de propagación físico, en su lugar se usa el aire, esto la hace un sistema de comunicación muy útil para muchas aplicaciones. Los primeros sistemas fueron logrados gracias al descubrimiento de las ondas de radio; básicamente las comunicaciones de radio consisten en el envío de mensajes a través de señales moduladas, lo que dio pie a la creación de distintos sistemas inalámbricos como el telégrafo, la radio y la televisión.

Las constantes investigaciones realizadas respecto a estas tecnologías han sido muy importantes para el desarrollo de los actuales sistemas que consisten en la transmisión de datos mediante ondas de radio de baja potencia en distintas bandas para intercambiar

información entre dispositivos. Esto permite una gran libertad en su uso, en consecuencia el número de equipos usados que emplean estas tecnologías ha crecido notablemente y entre estos podemos encontrar a los teléfonos celulares, computadoras portátiles, dispositivos *bluetooth*, *palm*s, etc, lo que ha impulsado el desarrollo de la telefonía celular y las redes inalámbricas.

2.1.2 Telefonía celular

En sus comienzos la telefonía celular se difundió como una alternativa a la telefonía convencional inalámbrica. La telefonía celular se caracteriza por su estructura sectorizada que optimiza su funcionamiento en grandes territorios al dividirlos en sectores más pequeños llamados celdas (o células) para así poder usar un mismo conjunto de frecuencias en celdas separadas (reutilización de frecuencias) aumentando la capacidad del sistema. Desde los inicios de la telefonía celular, se ha buscado mejorar los sistemas y se han desarrollado nuevas tecnologías para mejorar las capacidades y rendimiento de estos. Por eso, para distinguir entre los servicios y mejoras realizadas se han clasificado en generaciones.

Así, las generaciones definidas en la telefonía celular indican un cambio o mejora de las tecnologías empleadas.

Primera Generación celular (1G)

La primera generación surgió a principios de 1980 y se caracterizó por ser analógica estaba dedicada principalmente a la transmisión de voz. Basaba en tecnologías tales como *Advanced Mobile Phone System* (AMPS), *Narrowband AMPS* (N-AMPS), *Nordic Mobile Telephone* (NMT) y *Total Access Communication System* (TACS). Los dispositivos portátiles eran relativamente grandes y la calidad de los enlaces era muy baja, la velocidad de transmisión era de 2.4kbps. El cambio entre celdas estaba basado en *Frequency Division Multiple Access* (FDMA) y era muy impreciso además de que la seguridad era prácticamente nula. Esta tecnología comenzó a desaparecer después del surgimiento de las tecnologías digitales y se volvió obsoleta [9].

Segunda Generación celular (2G)

La transición de los sistemas analógicos a digitales dio lugar a la segunda generación que con el objeto de dar cabida a más usuarios lograron el desarrollo de tecnologías como *Global System for Mobile communication (GSM)*, *Code Division Multiple Access (CDMA)*, *Personal Communications System (PCS)*; mismas que debido a la digitalización de la voz consiguieron una mejora en la calidad del sistema y permitieron aumentar la capacidad de las redes logrando velocidades de transmisión de hasta 9.6kbps [25]; con un beneficio considerable en cuanto a la reducción de costos consiguiendo un mayor crecimiento. Y la creación de nuevos servicios auxiliares como Fax y *Short Message Service (SMS)* [9].

Generación 2.5

Mejoras realizadas a la tecnología GSM con el fin de aumentar su rendimiento y lograr la transmisión de datos, permitieron el paso a la 2.5G con la adición de los servicios como *General Packet Radio Service (GPRS)*, basado en conmutación de paquetes que permite lograr tasas de transmisión de datos mayores a 150kbps y establecer conexiones a Internet. Del mismo modo la evolución de CDMA logro alcanzar velocidades de similares en CDMA-2000 mejorando el servicio, facilitando el salto a la 3G. Así la generación 2.5 fue una plataforma que sirvió para dar paso a las redes 3G [9].

CDMA permite el multiplexado, con lo que se logra dar servicio a varios usuarios en un mismo canal al mismo tiempo, ofreciendo también control de acceso al medio utilizando un esquema especial de codificación.

Tercera Generación celular (3G)

Además de transmitir voz, permite la transmisión de información. La 3G se caracteriza por realizar una convergencia entre los servicios de voz y datos y el acceso inalámbrico a Internet para el intercambio de archivos; en otras palabras, es apta para aplicaciones multimedia y ofrece relativamente altas tasas de transmisión de datos.

Los protocolos empleados en los sistemas 3G están enfocados para ofrecer servicios como acceso rápido a Internet, intercambio de video, video llamadas e incluso servicio de TV y son compatibles con las redes 2G.

El estándar 3G más importante es el *Universal Mobile Telecommunications System* (UMTS) y emplea codificación *Wideband* CDMA (W-CDMA). La tecnología UMTS usa bandas de 5MHz para transferir voz y datos [9,10].

Generación 3.5

Usa UMTS/HSDPA, *High-Speed Downlink Packet Access* (HSDPA) es un servicio de datos en W-CDMA con transmisiones de datos hacia el cliente con velocidades de transmisión de hasta 14Mbps y es apodado 3.5G [9].

3GPP Long Term Evolution

A pesar de que las tecnologías 3G ofrecen mayores tasas de transmisión aún hay grandes posibilidades de mejorar los servicios hacia los usuarios para satisfacer la demanda. Para eso se creó *Third Generation Partnership Project* (3GPP) [10], una asociación colaborativa que reúne un grupo de especialistas en definición de estándares entre ellos ARIB, CCSA, ETSI, ATIS, TTA y TTC [9]. Cuyo objetivo se basa en el desarrollo de la tecnología CDMA-2000 con el fin de lograr servicios similares a los ofrecidos por redes inalámbricas como WiFi, con la ventaja de la movilidad.

La solución a esto es el desarrollo de *Long Term Evolution* (LTE), la próxima generación posterior a 3G, que en suma habilita la migración de enlaces fijos a móviles para aplicaciones sobre Internet.

Aunque la telefonía celular fue concebida inicialmente solo para la voz, las tecnologías celulares hoy en día son capaces de brindar otro tipo de servicios haciendo posible el uso de aplicaciones para el intercambio de datos, audio y video aunque con ciertas limitaciones principalmente en cuanto a costos.

2.2 Tecnologías de Banda Ancha

El término *Banda Ancha* se usa para definir altas tasas de transmisión generalmente en tecnologías de acceso a redes de datos este tipo de tecnologías generalmente son

utilizadas para acceso a Internet. Las tecnologías de acceso a redes pueden ser alámbricas e inalámbricas y se muestran en la tabla 2.1.

Alámbricas
Redes de Acceso por par de Cobre (xDSL, Modems)
Redes de Acceso por Cable
Redes híbridas de fibra y cable (HFC)
Acceso Fijo por Red eléctrica (PLC)
Redes de Acceso por Fibra óptica (FTTx, PON, EFM, otros)
Inalámbricas
Bucle inalámbrico (WiLL o <i>Wireless Local Loop</i> , LMDS, MMDS)
Redes MAN/LAN inalámbricas (WLAN, Wi-Fi, WiMAX, HiperLAN2)
Comunicaciones móviles de segunda y tercera generación (CDMA, GSM, UMTS, 3G)
Óptica por Aire (HAPs, FSO)
Redes de acceso por satélite
Televisión digital terrestre (TDT)

Tabla 2.1. Tecnologías alámbricas e inalámbricas

Actualmente las redes con mayor extensión y difusión son las alámbricas, aunque estas ofrecen mejor ancho de banda, las redes inalámbricas están teniendo gran auge como la tecnología celular 3G, WiFi y últimamente incursionando al mercado WiMAX.

2.3 Tecnologías Inalámbricas

Recientemente, el uso de la computadora se ha hecho muy popular, esto debido a que es una herramienta muy útil y versátil para realizar un gran número de tareas.

Por otra parte, Internet se ha convertido en el sistema de comunicaciones más usado y difundido en todo el mundo que mediante el uso de cables consigue mantener la conexión entre las distintas redes que la conforman. Sin embargo, el difícil acceso a ciertos lugares así como la necesidad de trabajar en sitios aislados y/o de difícil acceso, donde es muy complicada y costosa la instalación de una red cableada, ha llevado a la búsqueda de alternativas más eficientes y accesibles, no dependientes de cables; existen distintas opciones como la luz infrarroja [1], ondas de radio de baja potencia, microondas, satélite, etc. La principal ventaja de las tecnologías inalámbricas es que se evita el uso de cables, entre las tecnologías “líderes” en este ámbito podemos encontrar a las siguientes:

IrDA, tecnología inalámbrica de enlace directo punto a punto para cortas distancias (<2metros) y con ángulo de visión limitado, por lo que debe existir línea de vista directa entre los dispositivos involucrados. Usa un espectro de radio frecuencia (RF) basado en

luz infrarroja, es decir, por debajo de la luz visible. Entra en la categoría de WPAN (*Wireles PAN*).

ZigBee Alliance, basada en el estándar 802.15.4 una de sus principales características es que sus dispositivos son de baja potencia por lo que el consumo de energía es bajo, haciéndolos muy útiles para control y monitoreo, con los dispositivos basados en esta tecnología es posible formar redes *mesh* para crear clusters que son empleados con propósitos generales, como colección de datos, sensores para monitoreo, control de dispositivos, automatización de edificios entre muchas otras aplicaciones; Categoría WPAN.

Bluetooth, tecnología de bajo costo para el intercambio de datos de corto alcance con transmisiones punto a multipunto omnidireccional basada en el estándar 802.15.1, del tipo WPAN usa ondas RF de alta frecuencia pudiendo transmitir a través de objetos sólidos; opera en la banda de 2.4GHz. Tiene un alcance que oscila los 10m, aunque puede ser extendida si se aumenta la potencia de transmisión.

Aunque estas no tienen mucho alcance tienen características que las hacen muy útiles, en la próxima sección se verán tecnologías inalámbricas que ofrecen una mayor capacidad y alcance. La opción más viable sin duda ha sido el uso de ondas de radio, que hasta hace relativamente poco tiempo no había sido posible su implementación debido en gran medida a que la evolución de la tecnología no lograba superar las limitantes inherentes al medio de transmisión, tales como tolerancia al ruido, desvanecimientos, etc.

En la figura 2.1 se muestran las tecnologías inalámbricas y estándares de acuerdo a su cobertura.

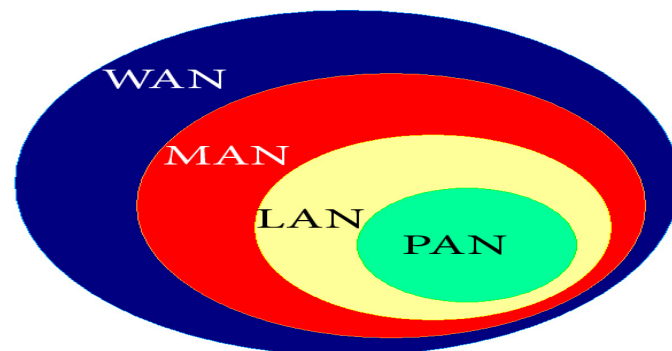


Figura 2.1. Cobertura de tecnologías inalámbricas

En la tabla 2.2 se muestran distintas tecnologías de acuerdo con su cobertura.

Cobertura	Tecnologías
PAN	IrDA, ZigBee, Bluetooth
LAN	WiFi, HiperLAN
MAN	WiMAX Fijo, WiBro, HiperMAN
WAN	Internet, WiMAX Móvil[10], IEEE 802.20[10]

Tabla 2.2. Tecnologías inalámbricas de acuerdo a su cobertura

2.4 Redes inalámbricas de banda ancha

Las redes inalámbricas de más éxito actualmente son las de telefonía celular. Sin embargo, las ventajas logradas por las redes de telefonía celular, como 3G que consiguieron ofrecer servicios de banda ancha, las necesidades de los usuarios van en aumento y las capacidades de transmisión que estas redes ofrecen, además de costosas, se ven cada vez más limitadas para cubrir las necesidades demandadas. Es por esto que las redes de datos toman especial importancia y en poco tiempo las redes basadas en IP superaran su principal desventaja frente a estas tecnologías, la movilidad. Ofreciendo anchos de banda mejores a los ofrecidos por las redes celulares.

Se espera que las redes inalámbricas de banda ancha (BWA: *Broadband Wireless Access*) sean una alternativa a las redes cableadas, como las DSL y Cable Modem. Ya que tienen la capacidad de transmitir señales con información en grandes áreas sin necesidad de usar infraestructura costosa para llegar a cada usuario. Esto permite lograr un rápido despliegue a un bajo costo, siendo además una opción eficiente y factible. En la figura 2.2 se muestra el modo en que se distribuyen los servicios para las distintas opciones de servicios de conexión.

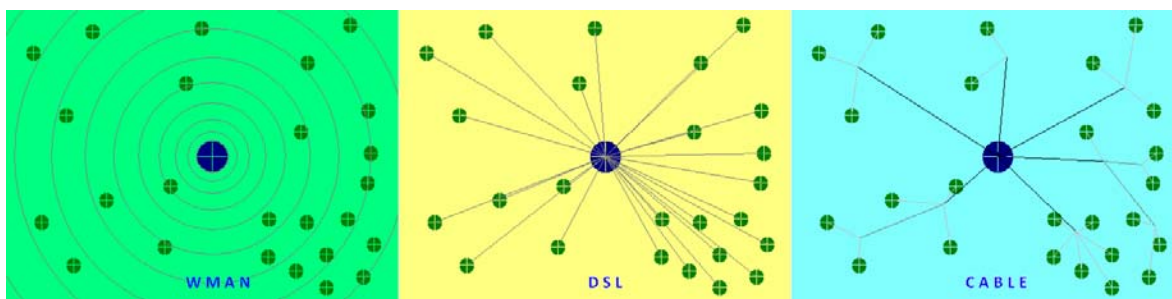


Figura 2.2. Alternativas

Para una conexión DSL existe una conexión dedicada para cada usuario; con Cable Modem se distribuye a través de una línea a una zona específica y de ahí se reparte el servicio a cada usuario, compartiendo el ancho de banda asignado a esa área. Mientras que para WMAN la señal se distribuye obteniendo cobertura radial.

2.4.1 WiFi

WiFi es una implementación basada en el estándar 802.11 para redes *Wireless LAN* inalámbricas (WLAN); tecnología usada en pequeñas redes de computadoras. La *Wireless Ethernet Compatibility Alliance* (WECA) denominada *WiFi Alliance* es la asociación que tiene como objetivo principal desarrollar la tecnología WiFi para garantizar la compatibilidad entre equipos.

WiFi se centra básicamente en el desarrollo de las capas Física (PHY) y MAC del estándar 802.11. Es la única diferencia con las redes *Ethernet*, por lo cual compatibles, WiFi actualmente es soportada por cualquier computadora moderna, consolas de juego, impresoras, teléfonos celulares, entre otros.

El uso de esta tecnología WiFi es cada vez más difundida, alcanza velocidades de transmisión de 54Mbps y facilita el acceso a Internet, al estar disponible en restaurantes, aeropuertos, hoteles, entre otros. Es una tecnología diseñada principalmente para interiores con un alcance desde 45 y hasta casi 100 metros [12]. La versión 802.11a de WiFi opera en la banda licenciada de 5GHz, mientras que la 802.11g opera en la banda libre de 2.4GHz [1] no siendo estas las únicas versiones existentes y en operación. Actualmente no soporta movilidad, pero la mayor desventaja de esta tecnología es su vulnerabilidad en cuestión de seguridad ya que actualmente se han creado programas que logran romper la clave de acceso para redes WiFi encriptadas con *Wired Equivalent Privacy* (WEP), esto ha llevado al diseño de nuevos métodos de encriptación como *WiFi Protected Access* (WPA) y WPA2 más robustos pero todavía poco usados.

WiFi esta catalogada como tecnología inalámbrica de banda ancha, aunque es de corto alcance.

2.4.2 WiBro

Wireless Broadband (WiBro) es una tecnología de red desarrollada por la industria de telecomunicaciones de Corea, estandarizada por la Asociación Tecnológica de Telecomunicaciones (TTA) de ese país. WiBro fue pensada para ofrecer conectividad sobre la marcha, es decir en movimiento, se basa en el estándar IEEE 802.16 y opera en la banda de 2.3GHz [13]. Usa *Time Division Duplex* (TDD) y *Orthogonal Frequency Division Multiple Access* (OFDMA) ofreciendo un servicio de alta velocidad para acceso a Internet que provee completa movilidad en redes abiertas basadas en IP.

Las velocidades de transmisión de WiBro oscilan en el rango de los 30-50Mbps cubriendo un área entre 1km y 5km [13]. En cuestión de movilidad, soporta conexiones para dispositivos móviles desplazándose a velocidades de hasta 60km/h. Sin embargo una desventaja de WiBro es que al operar en una banda licenciada, que en cierto sentido resulta una ventaja relacionada a interferencias, también limita su disponibilidad a lo largo del planeta al no ser compatible con WiMAX. Por esto el foro WiMAX trabaja arduamente por lograr la compatibilidad de WiBro con la tecnología WiMAX.

2.4.3 WiMAX

Worldwide Interoperability for Microwave Access (WiMAX) es una solución para acceso inalámbrico de banda ancha que implementa calidad de servicio (QoS) para ofrecer diversos servicios. WiMAX no fue creada como sustituto de WiFi por lo que no es competencia para esta ni pretende reemplazarla, está pensada principalmente como una tecnología complementaria. Mientras WiFi sirve para crear redes inalámbricas locales (WLAN), WiMAX es para redes inalámbricas metropolitanas (WMAN) y como solución de última milla. WiMAX tiene un alcance de hasta 7km [3] para enlaces punto-multipunto sin línea de vista (NLOS: *Non-Line of Sight*) y puede alcanzar hasta 50km [3] en enlaces punto a punto con línea de vista (LOS: *Line of Sight*), es decir, sin obstáculos entre la estación suscriptora (SS: *Subscriber Station*) y la estación base (BS: *Base Station*), con una tasa de transmisión de 75Mbps [14], ver figura 2.3. Además implementa codificación y modulación adaptiva lo que permite tasas de transmisión variables de acuerdo a las calidad de la señal recibida; entre mejor señal mayor tasa de transmisión.

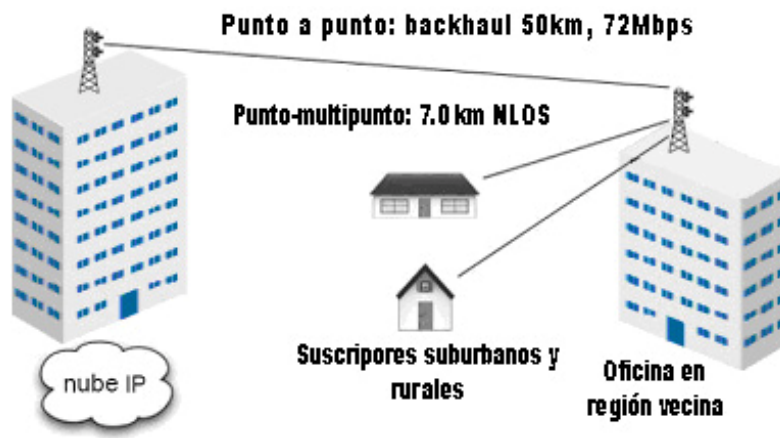


Figura 2.3. Alcance de WiMAX

La tecnología WiMAX al igual que WiBro se basa en el estándar IEEE 802.16, es una tecnología de bajo costo comparada con otras tecnologías similares actuales. Es capaz de ofrecer tasas de transmisión para conexiones de banda ancha, fácil de implementar y que supone la rampa de lanzamiento ideal para otras tecnologías en plena expansión como la transmisión de video en tiempo real o telefonía VoIP mediante el uso de Internet, para lo cual es útil que esta tecnología cuente con un buen soporte de movilidad.

En un principio no se definieron cuestiones de movilidad, pero dado que es un aspecto primordial para el éxito de estas redes se incluyeron características de movilidad en definiciones posteriores del estándar IEEE 802.16, planteando como principal objetivo mantener las tasas de transmisión adecuadas para los servicios menos tolerantes a retardos en condiciones de movilidad, en este sentido el punto crucial en este ámbito es el proceso de *handoff* (HO).

WiMAX es promovida por el foro WiMAX que tiene más de 500 miembros a nivel mundial, en su mayoría proveedoras de servicio, compañías de componentes, equipos de telecomunicaciones, entre otros y su objetivo es certificar y promover la compatibilidad e interoperabilidad de los productos basados en el estándar IEEE 802.16.

Finalmente, mediante se esta tecnología se pretende la convergencia entre las redes celulares y las redes inalámbricas de banda ancha con soporte de movilidad y cobertura converge a la integración de distintos equipos. Por lo que cabe destacar que el soporte en cuando a calidad de servicio se refiere, plantea un gran reto para mantener tasas de

transmisión aceptables en condiciones de movilidad, y un punto crucial para lograr esto es la definición de un buen mecanismo de handover también denominado *handoff* (HO).

2.5 Handover (*Handoff*)

La movilidad es una característica muy importante en sistemas de comunicación de acceso inalámbrico. Esta puede ser definida como el conjunto de funcionalidades necesarias que brindan una comunicación de datos ininterrumpida en condiciones de desplazamiento con dispositivos móviles del usuario (CPE: *Customer Premises Equipment*). Las interrupciones en la comunicación sólo son aceptables cuando el desempeño de las aplicaciones no se ve afectado significativamente por el retraso en el envío-recepción de los datos.

Para soportar la continuidad en la comunicación en condiciones de movilidad, un mecanismo de *handoff* (HO) se encarga de transferir la conexión de una BS a otra, esto se logra cambiando los parámetros de la interfaz inalámbrica de la conexión.

La versión móvil soporta esquemas de HO optimizados con latencias menores a 50ms [15] para asegurar que el rendimiento de aplicaciones en tiempo real no se vea afectado.

Un procedimiento de HO es iniciado principalmente al cruzar los límites de una celda, a causa de deterioro en la calidad de la señal, otra BS puede ofrecer mejor QoS o el consumo de recursos de la BS está saturado. Los *handoff* se dividen en dos categorías *soft handoff* y *hard handoff* (HHO).

2.5.1 Tipos de handoff

Para WiMAX se definen dos variantes de HO, *break-before-make* HO y *make-before-break* HO. Para la variante *make-before-break* el servicio con la BS destino comienza antes de finalizar la conexión con la BS servidora, por lo que, la MS se encuentra conectada a dos BS durante el tiempo que dura el handover. El comportamiento del HO *break-before-make* es que el servicio con la BS destino inicia después de que la conexión con la BS servidora fue cerrada. Es decir, antes del proceso la MS está conectada con su BS servidora, durante el proceso se desconecta de ésta, para finalizar con la reconexión a

la red a través de la BS destino elegida; la MS nunca se encuentra conectada a más de una BS en cualquier momento, de este modo la MS permanece desconectada por un instante de tiempo. Mientras que HHO es esencialmente *break-before-make*, *soft handoff* básicamente representa un *make-before-break*. Por otro lado, *soft handoff* se divide a su vez en *Fast Base Station Switching* (FBSS) y *Macro Diversity Handover* (MDHO).

El proceso de handover puede ser iniciado tanto por la BS como por la MS. El proceso de handover consiste de varias fases, iniciando con la selección de la BS seguida por la decisión de hacer el handover hasta completar el proceso de inicialización y registro con la nueva BS. Como ejemplo de handover podemos observar en la figura 2.4, en el que por desplazamiento el *handoff* sucede por una disminución en la calidad de la señal.

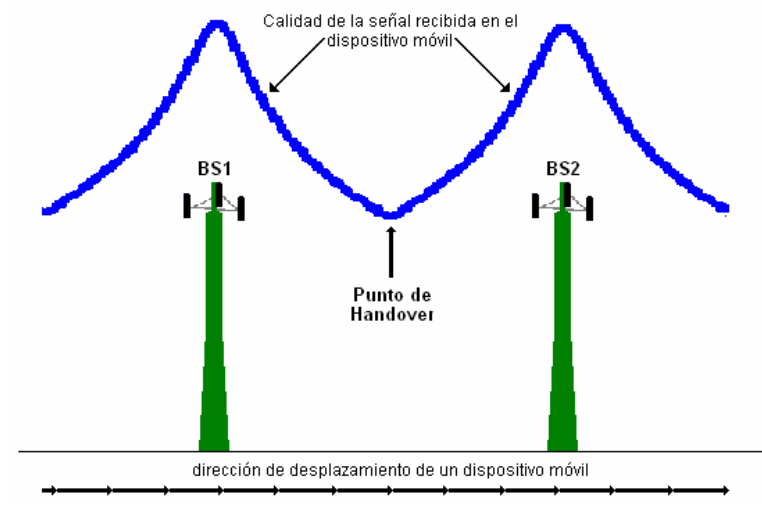


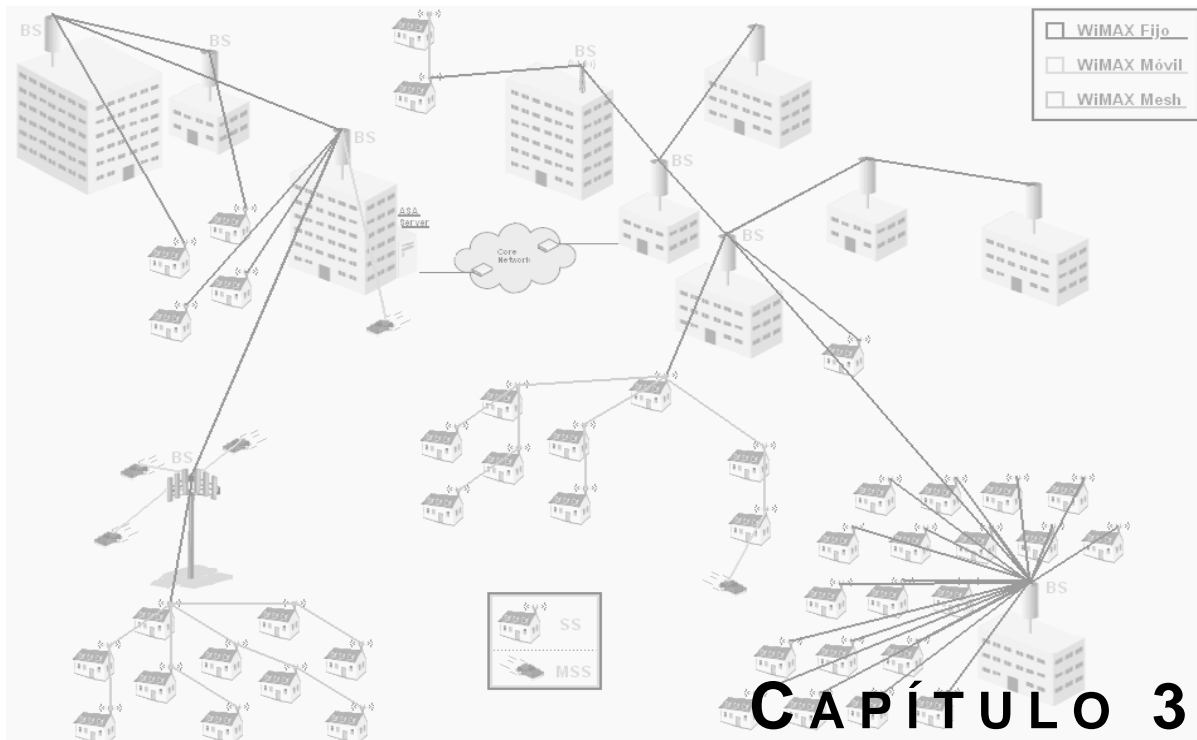
Figura 2.4. Handover por cambio de BS

2.6 Conclusiones

Convergencia entre redes inalámbricas y celulares (4G)

En telefonía celular cada generación define el uso de diversos protocolos desarrollados por diferentes entidades por lo que no son compatibles entre si, esto limita su uso en cuanto a cobertura. Por otro lado las redes inalámbricas no corresponden a ninguna de las generaciones celulares pues han sido desarrolladas con propósitos diferentes, pese a eso y debido a la integración de los dispositivos móviles y diversidad de servicios con creciente demanda, las redes celulares cada vez necesitan más recursos, recursos que pueden ser provistos por redes basadas en IP.

Esta integración pretende lograr la convergencia entre los dos sistemas proveyéndolos de altas tasas de transmisión, mayores capacidades de la red, menos costo por bit, lo que además permitiría una mayor expansión para estas redes y compatibilidad entre las tecnologías de telefonía celular con las tecnologías de redes inalámbricas de banda ancha, contemplando los mismos estándares para ofrecer un mejor servicio y con una cobertura global. Es aquí donde la tecnología WiMAX toma gran relevancia [16], teniendo como fin el satisfacer las demandas de los usuarios por servicios de gran calidad, lo que consiste una importante consideración de cara al diseño.



CAPÍTULO 3

DESCRIPCIÓN DEL ESTÁNDAR 802.16e

Desde un principio, los programas de comunicación usados para la comunicación entre computadoras eran personalizados y solo permitían que dos computadoras usando dicho programa se comunicaran entre ellas, pero no con otras. Así, cuando se necesitaba hablar con una computadora diferente, había que escribir un programa nuevo. Y este método no podía ampliarse más que a unas cuantas computadoras.

Los primeros intentos para solucionar este problema fue la creación de protocolos que permitían a las computadoras del mismo fabricante hablar unas con otras. Estos protocolos no son muy utilizados en la actualidad (IPX/SPX, DECnet, AppleTalk, NetBeui, entre otros).

Como eso no fue suficiente se hizo necesaria la creación de un estándar que permitiera el desarrollo de tecnologías manteniendo la compatibilidad entre equipos y tecnologías desarrolladas por distintos fabricantes, esto a su vez permite una mayor difusión para tecnologías estandarizadas.

3.1 Estandarización

Con el fin de lograr la compatibilidad entre equipos de distintos fabricantes surge el Foro WiMAX, líder en el ramo de la industria de las telecomunicaciones. El Foro WiMAX es una organización sin fines de lucro formada para promover y certificar la compatibilidad e interoperabilidad, así mismo como la calidad de productos de banda ancha inalámbricos basados en los estándares IEEE 802.16 y ETSI HiperMAN [23]. Lo que significa que los equipos diseñados por distintos fabricantes serán compatibles entre si y de ese modo lograr una mayor cobertura y crecimiento para esta tecnología.

El estándar 802.16 permite el desarrollo de tecnologías para redes inalámbricas de banda ancha en áreas metropolitanas, dando soporte a servicios multimedia. Otro estándar de gran utilidad para la industria es el referente para el tráfico de voz a través del protocolo IP (VoIP). En este capítulo se dará una descripción de ambos estándares, que serán necesarios para la realización de las pruebas.

3.2 El estándar IEEE 802.16

El estándar 802.16 contiene un conjunto de especificaciones, características y funcionalidades [2]. En este se describen las normas de operación que han sido definidas por el IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*), mismas que han de ser tomadas en cuenta por los desarrolladores de tecnologías para redes de acceso inalámbrico de banda ancha en áreas metropolitanas (WMAN). El objetivo es mantener la compatibilidad de estos equipos, con la finalidad de obtener una mayor cobertura. Esto además permitirá integrar mejor distintas tecnologías de telecomunicaciones incluyendo las ya existentes.

El grupo de trabajo 802.16 del IEEE solo es responsable de estructurar las especificaciones para las tecnologías BWA (*Broadband Wireless Access*). Por esto el Foro WiMAX, que es un consorcio formado por varias compañías de renombre internacional en este rubro, es el encargado de dar seguimiento, promover, regular y certificar la compatibilidad e interoperabilidad de los equipos fabricados basados en este estándar.

Este estándar fue aprobado en 2004, en los años de trabajo entorno a este han sido definidos una variedad de parámetros y características que han sido determinados como necesarios para el buen desempeño de las tecnologías de BWA, que han de desarrollarse a partir de este, aunque algunas son opcionales. Entre las características más importantes definidas para las capas Física y MAC están las mostradas en la tabla 3.1.

A nivel físico (PHY)	A nivel de acceso al medio (MAC)
Bandas de operación con y sin licencia Bandas de 10-66GHz para enlaces LOS Bandas de 2-11GHz para enlaces NLOS Canalización de 5 y 10 MHz Anchos de banda de más de 10Mbps Codificación adaptiva Modulación adaptiva Ecuilización adaptiva Sistema de antenas adaptivo (AAS) Control de potencia de transmisión Modulación OFDM o múltiple OFDMA Multiplexaje TDMA (<i>Time Division Multiple Access</i>)	Asignación de recursos DAMA (<i>Demand Assigned Multiple Access</i>) ARQ y H-ARQ (retransmisión) Tamaño de los paquetes dinámico Descriptores de los canales <i>Uplink</i> y <i>Downlink</i> Clasificador de conexiones CID Servicios punto-multipunto (PMP) y <i>Mesh</i> (malla) Encriptación de paquetes Soporte el sistema de antenas adaptivo QoS

Tabla 3.1. Parámetros relevantes, capa MAC y PHY [2]

El estándar inicialmente definió las especificaciones para sistemas de acceso inalámbrico de banda ancha fijos. Sin embargo, en diciembre de 2005 fueron añadidas características para agregar movilidad al estándar, siendo aprobada en 2005 esta nueva versión fue denominada como IEEE 802.16e-2005 [4]. La evolución del estándar se muestra en la tabla 3.2.

Estándar	Características
802.16 (2001)	Interfaz aérea para sistemas fijos de acceso inalámbrico de banda ancha, especificaciones de las capas MAC y PHY entre 10-66GHz con (LOS)
802.16a (Enero 2003)	Ampliación del estándar 802.16 para su uso en bandas de 2 a 11GHz, con o sin línea de vista directa. Basado en protocolos PTP y PTMP. ARQ.
802.16b	Ampliación para las bandas libres de 5 a 6GHz.
802.16c	Ampliación del estándar 802.16 para definir las especificaciones en las bandas de 10-66GHz.
802.16d (Julio 2004)	Revisión del 802.16 y 802.16a para añadir los perfiles aprobados por el Foro WiMAX. Aprobado en junio de 2004, denominado 802.16-2004.
802.16e (Diciembre 2005)	Extensión del estándar 802.16d que incluye las especificaciones para dispositivos móviles.

Tabla 3.2. Evolución del estándar 802.16

El estándar contempla cuestiones de escalabilidad tanto en tecnología de acceso inalámbrico y arquitectura de red; debido a esto ofrece gran flexibilidad en el despliegue de redes y servicios ofrecidos. Algunas de las características sobresalientes son calidad de servicio (QoS), movilidad, seguridad, uso de técnicas *Multiple Input Multiple Output* (MIMO) y *Adaptive Antena System* (AAS) que le permiten lograr altas tasas de transmisión y gran cobertura.

La inclusión de técnicas MIMO y AAS junto con esquemas de sub-canalización flexibles, así como, codificación y modulación avanzadas; permiten soportar velocidades de hasta 63Mbps para el canal *downlink* (DL) y hasta 28Mbps en el *uplink* (UL), esto en canales de 10MHz [15,26].

La características de seguridad provistas son autenticación basada en *Extensible Authentication Protocol* (EAP), autenticación encriptada basada en *Data Encryption Standard* en modo *CBC* (DES-CBC) o *Advanced Encryption Standard* en modo CCM (AES-CCM) y esquemas de protección de mensajes de control basados en *Cipher-based Message Authentication Code* (CMAC) y *keyed Hash Message Authentication Code* (HMAC). Además incluye soporte para credenciales existentes como tarjetas SIM/USIM, *smart cards*, certificados digitales y esquema usuario/contraseña [3,23].

La encriptación de paquetes de datos se realiza sobre la información útil por lo que el encabezado MAC no es encriptado al igual que los mensajes de administración, esto para facilitar los procesos de registro y *ranging*.

Las especificaciones de la interfaz aérea se centran en su mayor parte en la capa de control de acceso al medio (MAC) y la capa física (PHY).

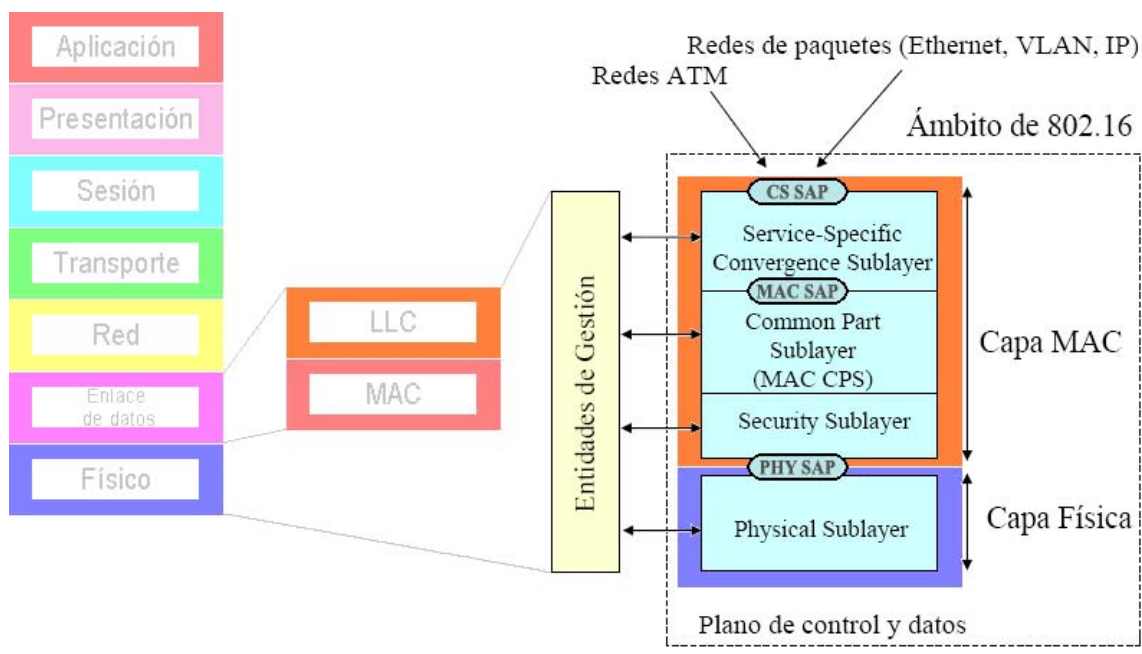


Figura 3.1. Estructura de capas 802.16

3.3 Arquitecturas WiMAX

En el estándar 802.16 se definen 3 diferentes topologías (ver figura 3.2) cada una con sus especificaciones.

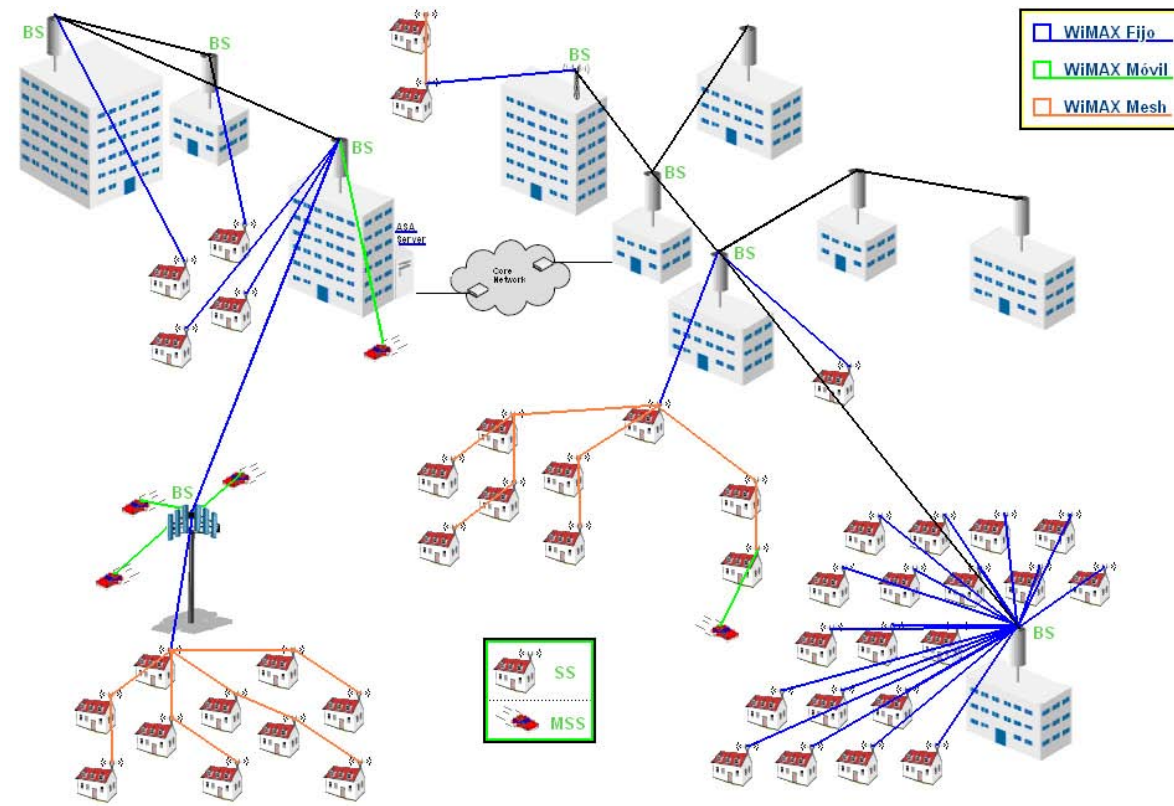


Figura 3.2. Arquitecturas WiMAX

3.3.1 Topología Fija

En la topología fija una **Estación Base** (BS: *Base Station*) proporciona acceso a una red (pública o privada) a cada estación suscriptor (SS: *Suscriber Station*) mediante enlaces PMP (Punto-Multipunto), teniendo una cobertura de 3.5-7km [3], líneas azules en la figura 3.2.

En esta arquitectura una BS provee servicio directamente a una o más SS para un negocio o residencia ofreciendo múltiples servicios. También ofrece la posibilidad de crear enlaces punto a punto entre dos BS con línea de vista directa para crear enlaces T1/E1 con altas velocidades para **backhails** a una distancia de hasta 50km [3], representados por líneas negras en la figura 3.2.

3.3.2 Topología Mesh

En el modo *Mesh* (o malla) una BS provee una conexión a una o más SS, aunque estas no estén conectadas directamente con la BS, entre los enlace se establece una distancia que se mide en saltos y es el modo en que un nodo mantiene relación con otro nodo. Un nodo SS mantiene conexión con su nodo padre el cual debe estar a un salto de distancia y es a través del cual envía y recibe información, este nodo puede ser a su vez padre de otros nodos que lo usan como intermediario en su comunicación, los enlaces son representados en color naranja en la figura 3.2.

Opcionalmente uno de los nodos puede mantener una conexión directa con una BS extendiendo la conexión de otras SS brindando conectividad externa (como Internet) a cada nodo en la malla.

3.3.3 Topología Móvil

En la topología móvil una estación base (BS: *Base Station*) ofrece conexión a una estación móvil (MS: *Mobile Station*), esta se desplaza dentro del área de cobertura de la BS con la que mantiene un enlace a través del cual envía y recibe paquetes.

El concepto de la topología móvil consiste en proveer de conectividad ininterrumpida a todas aquellas estaciones móviles (MS) que salgan del área de cobertura de la BS a la cual se encuentran conectadas para entrar dentro del área de cobertura de otra BS. Esta otra BS debe ser vecina de la BS origen y las áreas de cobertura deben intersectarse, para poder transferir su conexión de una a la otra siempre que esta pueda ofrecer los servicios que tenía establecidos con la BS a la que estaba conectada.

Cuando la MS se aleja de la BS con la que tenía establecida su conexión, busca otras BS a las que pueda transferir su conexión con tal de mantener el envío y recepción de su información de manera continua, debiendo determinar cual es capaz de ofrecerle la calidad de servicio (QoS) requerida y la mejor calidad de señal en el enlace, eligiendo siempre la mejor, la topología está representada por líneas verdes en la figura 3.2.

3.4 Capa Física (PHY)

El estándar define una interfaz aérea inicialmente en las bandas de frecuencia entre 10-66GHz, debido a que están en el rango de onda corta se requiere línea de vista (LOS) esto es adecuado para enlaces punto-multipunto (PMP) [2]. En el modo PMP, múltiples *Subscriber Station* (SS) se conectan a una misma *Base Station* (BS).

Posteriormente fue definido otro rango de frecuencias por debajo de los 11GHz, este es adecuado para enlaces sin línea de vista (NLOS); ya que debido a la longitud mayor de las ondas estas no se ven afectadas por obstáculos.

El canal de acceso de la BS a la SS se denomina canal *downlink* (DL) mientras que el canal que va de la SS a la BS es denominado canal *uplink* (UL). Además el estándar hace posible el uso de técnicas de duplexado *Frequency Division Duplex* (FDD) y *Time Division Duplex*.

Además WiMAX emplea *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM) en los canales de bajada (DL) y *Orthogonal Frequency Division Multiple Access* (OFDMA) en los canales de subida (UL) proporcionando de una mejor eficiencia espectral. Soportando opciones de multiplexado como *Time Division Multiple Access* (TDMA) y *Demand Assignment Multiple Access* (DAMA); TDMA y DAMA se realiza una asignación dinámica de *slots* en los canales.

3.4.1 *Frequency Division Duplexing* (FDD)

En un sistema de división de frecuencia los canales de *uplink* y *downlink* se encuentran en frecuencias separadas. Un *frame* de duración fija es usado para transmisiones en el canal *uplink* y *downlink*, esto facilita el uso de diferentes tipos de modulación, también permite el uso simultáneo de ambos canales en modo *full-duplex*, pudiendo transmitir y recibir datos al mismo tiempo. En el modo *half-duplex* la SS puede escuchar el DL solo si no esta transmitiendo en el UL. La figura 3.3 ilustra diferentes modos de operación de FDD.

Frame. Un frame es un elemento de la capa MAC que contiene un bloque de encabezado, uno con datos de tamaño variable y otro con información para comprobar errores al recibir los datos. El encabezado es de tamaño fijo y en el se define la estructura del frame, como tipo de datos, tamaño del frame y espacio usado por cada bloque. Un frame sirve para encapsular tráfico de capas superiores.

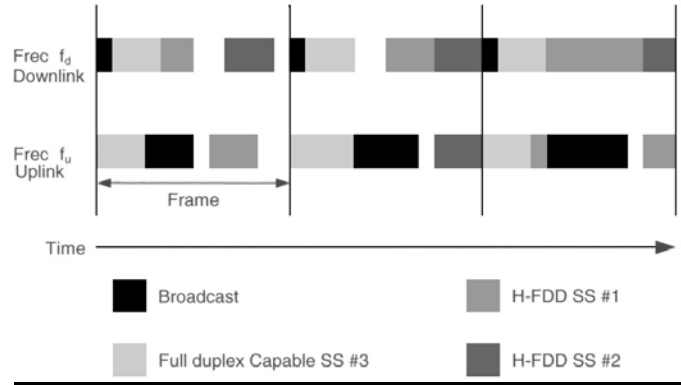


Figura 3.3. Estructura de la trama FDD

3.4.2 Time Division Duplexing (TDD)

En el sistema de división en tiempo, las transmisiones de los canales *uplink* y *downlink* comparten la misma frecuencia pero tienen tiempos de transmisión diferentes. Un *frame* TDD tiene una duración fija y contiene un *subframe uplink* y un *subframe downlink*. El frame es dividido en un número de *slots* físicos (PS: *Physical Slots*), esto ayuda a particionar fácilmente el ancho de banda, ver figura 3.4.

Slot. Un slot describe tanto el tiempo como el subchannel en las asignaciones de ancho de banda a cada SS para que transmita sus paquetes. El slot es la unidad mínima que puede ser asignada.

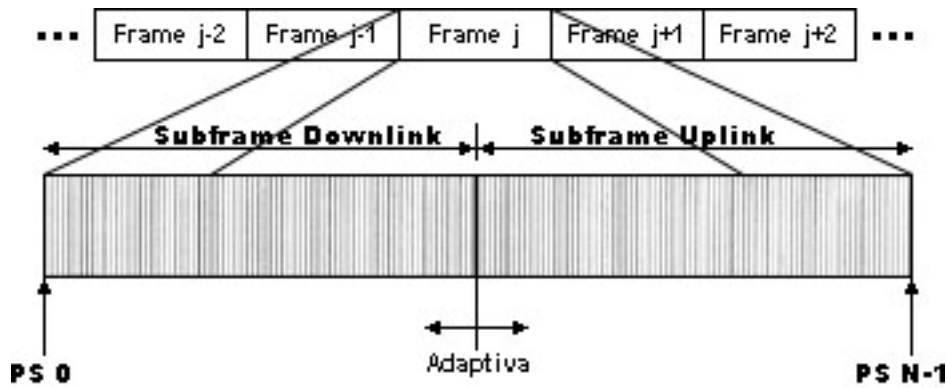


Figura 3.4. Formato TDD compartiendo la misma frecuencia

Para OFDM y OFDMA un PS es definido como la duración de cuatro símbolos de modulación. La duración de los *subframes* UL y DL es variable pero el tamaño del *frame* siempre es fijo. Por lo que, si la duración del *subframe* UL crece, la duración del *subframe* DL debe disminuir en la misma cantidad de tiempo. El formato general de un *frame* TDD para OFDM se muestra en la figura 3.5.

$$\text{Duración del frame} = \text{Duración Subframe UL} + \text{Duración Subframe DL}$$

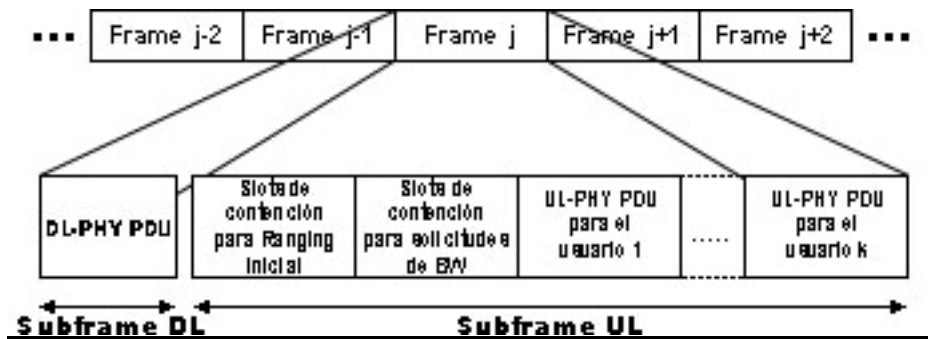


Figura 3.5. Formato TDD, frecuencias diferentes para UL y DL

Comparando los dos modos TDD y FDD, para TDD se usa una duración fija del *frame* tanto para el UL como para el DL, mientras que con FDD la distribución es adaptativa. Sin embargo TDD es más práctico cuando las tasas de datos son asimétricas entre el UL y DL como es el caso de las transmisiones en Internet. La topología *Mesh* soporta TDD.

3.4.3 OFDM/OFDMA

Una de las principales características de *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM), es su ortogonalidad con lo que se logra tener una mayor eficiencia espectral, esta ortogonalidad se da entre las señales de las *subcarriers* lo que permite que se superpongan sin interferir entre ellas.

Para la creación de las formas de onda de OFDM se usa IFFT (Transformada inversa de Fourier) en los transmisores para la modulación de los *streams* de datos; mientras que se utiliza FFT (Transformada de Fourier) en los receptores para demodular los *streams* recibidos.

3.4.4 Dominio de la frecuencia

En el dominio de la frecuencia la estructura de un símbolo OFDM está formado por *subcarriers*, el tamaño de la FFT es igual al número de *subcarriers* en el sistema WiMAX con un valor típico de 256. Se definen tres tipos de *subcarriers* estas pueden ser para transmisión de datos (*Data*), para propósitos de estimación (*Pilot*) y un rango definido como de guarda en el que no se transmite ningún tipo de datos (*Null*) [9]; adicionalmente se define una *subcarrier* central (DC), la estructura completa se puede ver en la figura 3.6.

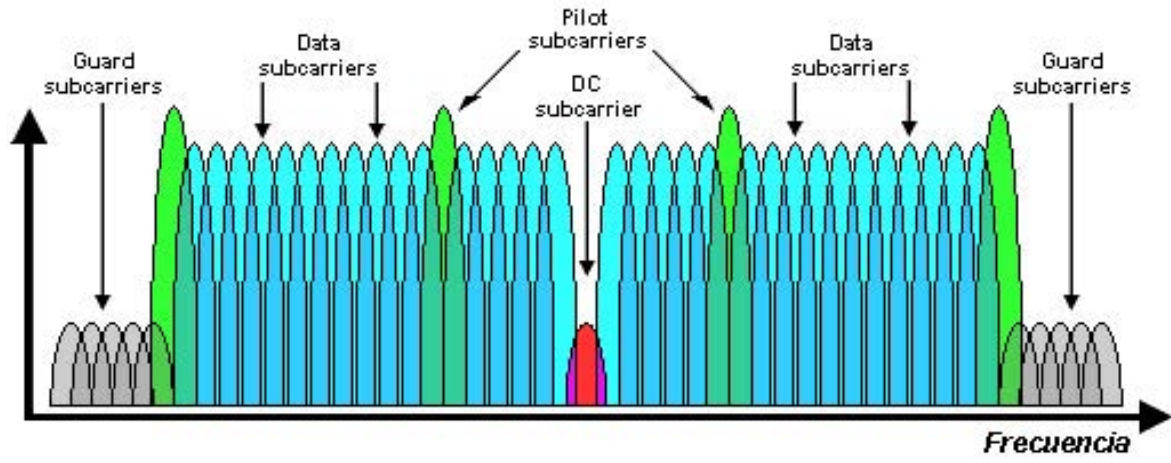


Figura 3.6. Estructura de símbolo OFDM y OFDMA

3.4.5 Dominio del Tiempo

OFDM crea una estructura de símbolo en el tiempo formando la señal a través de la transformada inversa de Fourier (IFT). El tiempo que dura un símbolo se divide en **tiempo de guarda** y **tiempo de símbolo** como se muestra en la figura 3.7. Una copia del tiempo de guarda (TG) es repetido al final del símbolo y se usa para recoger las señales generadas por *multipath*.

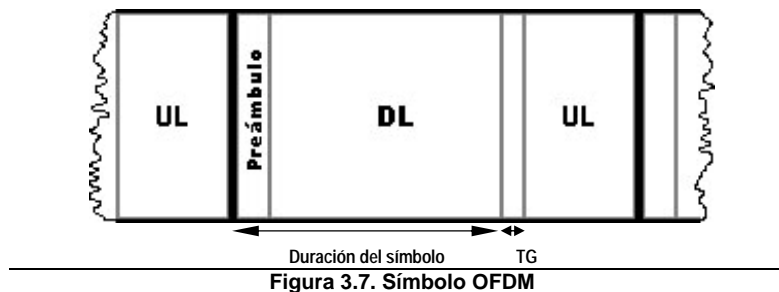


Figura 3.7. Símbolo OFDM

Multipath. Cuando una señal de onda corta se encuentra un obstáculo, esta al no poder atravesarlo, es reflejada en diferentes direcciones. En OFDM esto es aprovechado para reforzar la intensidad de la señal, que es posible debido a su naturaleza ortogonal.

OFDM se usa para las transmisiones en el canal DL, que son relativamente simples, dado que en este caso solo transmite la BS; los paquetes son enviados a todos los SS conectados y cada uno recibe solo los destinados a él. Se emplea un gran número de *subcarriers*, estos *subcarriers* se usan para crean grupos denominados *subchannels* y cada grupo es usado por diferentes nodos receptores.

Mientras que para las transmisiones en el canal UL se emplea OFDMA, ya que múltiples SS envían paquetes a la BS. Para eso, a un transmisor se le asignan uno o más *subchannels*, las *subcarriers* de un *subchannel* no necesariamente son adyacentes, la figura 3.8 muestra las agrupaciones de *subcarriers*, las asignaciones de *subchannels* se organizan usando el mecanismo de *Time Division Multiple Access* (TDMA). Así, cada SS transmite paquetes en los *slots* de tiempo asignados a él, organizados de acuerdo a la estructura de una trama OFDMA como se muestra en la figura 3.9.

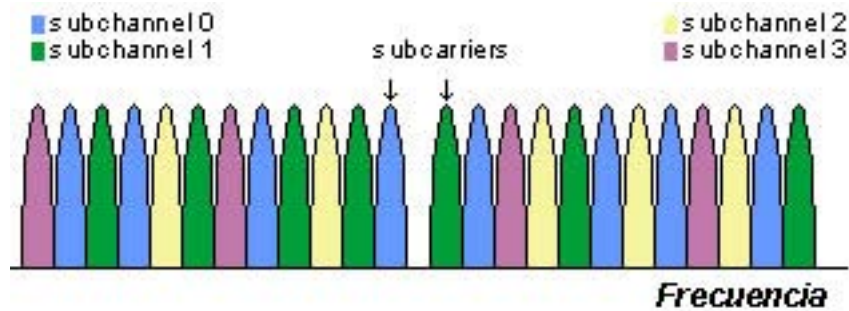


Figura 3.8. Subchannels OFDM

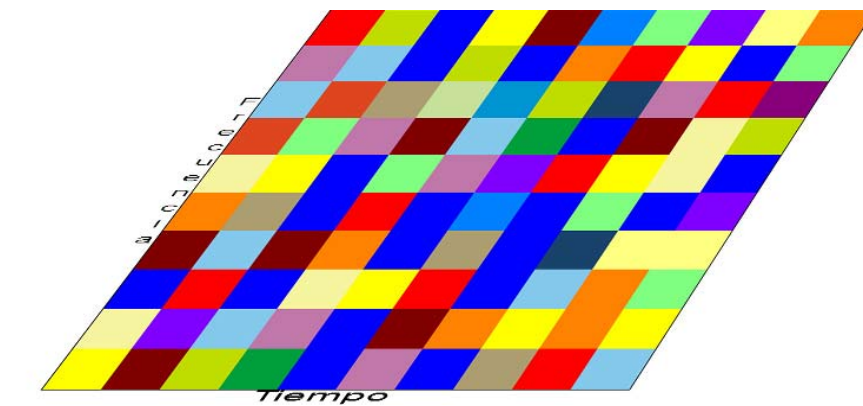


Figura 3.9. Descripción de la estructura OFDMA

Quien se encarga de la administración de estos recursos tanto para el UL como para el DL es la estación base, la cual indica sobre las asignaciones a cada nodo mediante el envío de mapas de mensajes, en la figura 3.10 se muestra un mapa de mensajes donde se especifica la estructura asignación de *frames* para el UL-MAP y el DL-MAP.

DL-MAP. El DL-MAP (Downlink-MAP) define las asignaciones de uso del canal downlink, conteniendo *information elements* (IEs) donde se le indica a cada SS en que slots hay paquetes destinados a él, y también se especifica la estructura del UL-MAP.

UL-MAP. El UL-MAP (Uplink-MAP) define las asignaciones de uso del canal uplink, este contiene *information elements* (IEs) donde se le indica a cada SS sus oportunidades de transmisión en slots, así como también para que tipo de servicio fueron concedidas.

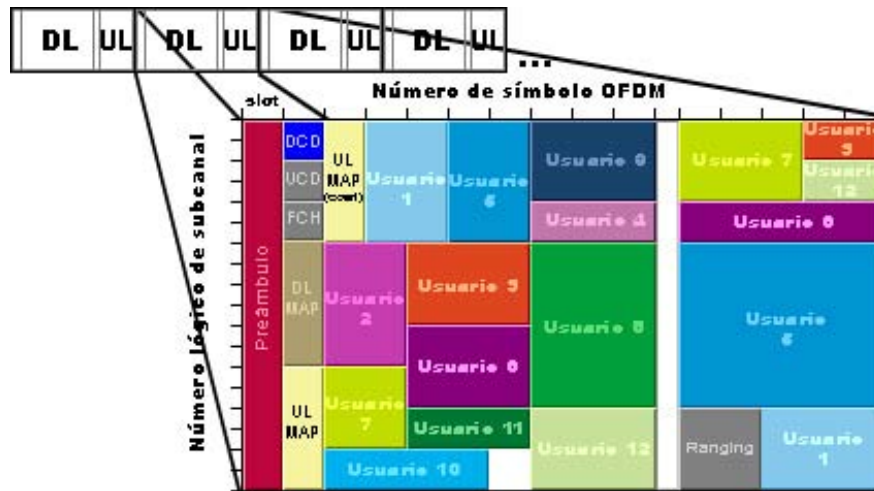


Figura 3.10. Estructura de un Mapa

Cada SS envía y recibe paquetes en los *slots* de tiempo asignados por la BS, los *slots* de tiempo son especificados a través del Mapa tanto para recibir paquetes (DL-MAP) como para enviarlos (UL-MAP). Dentro de los *slots* de tiempo asignados, cada SS puede enviar paquetes de datos o bien solicitudes de ancho de banda. El número de *slots* asignados depende de las solicitudes de ancho de banda realizadas y son concedidas por la BS para cada nodo de acuerdo a la disponibilidad de recursos y dando preferencia a los flujos de servicio según estén establecidos de acuerdo con la QoS asignada para cada flujo.

3.5 Capa de Control de Acceso al Medio (MAC)

Las premisas fundamentales de la capa MAC son la Calidad de Servicio (QoS), Modulación adaptiva (AMC) y *handover*. La capa MAC se basa en el concepto de flujos de servicio, especifica un mecanismo de señalización de QoS para solicitudes de ancho de banda y para asignaciones en los canales de UL y DL.

3.5.1 Modulación adaptiva (AMC)

El control de acceso al medio es capaz de soportar múltiples capas físicas con *Adaptive Modulation and Coding* (AMC), que le permite tomar ventaja de las fluctuaciones en un canal variante en el tiempo. La idea básica es usar tasas de transmisión altas cuando la calidad del canal es buena, mientras que para calidades deficientes las tasas de

transmisión se disminuyen para garantizar la estabilidad del enlace, el factor utilizado para determinar la calidad de la señal es la relación señal a ruido (SNR).

Durante la conexión se puede cambiar el esquema de modulación de acuerdo con la calidad del SNR buscando siempre ofrecer el mejor esquema. Dentro de las modulaciones contempladas están QPSK, 16-QAM, 64-QAM por portadora con tasas de codificación de 1/2, 2/3 y 3/4, que indican la razón entre un bloque codificado y uno sin codificar, así para una codificación de 2/3 se recibe un bloque de tamaño 2x y al codificarlo se genera un bloque de tamaño 3x.

Además para modulación se soporta un sistema de corrección de errores *Forward Error Correction* (FEC) concatenado que se basa en códigos convolucionales y *Red Solomon*.

3.5.2 Calidad de servicio (QoS)

Con el fin de garantizar la transmisión de ciertas aplicaciones de un modo adecuado es necesario procurar la QoS requerida para cada aplicación transmitida por una SS. Para proveer QoS es necesario asociar los paquetes que pasan por la capa MAC con un flujo de servicio, así, para cada tipo de aplicación se define un flujo de servicio. Cada flujo de servicio tiene asociado un identificador *Connection ID* (CID), y las asignaciones de ancho de banda son provistas por la BS de acuerdo a este lo mismo para el *downlink* como para el *uplink*.

Los flujos de servicio permiten una mejor distribución de las asignaciones de recursos de frecuencia, tamaño y tiempo para la transmisión de *frames* al estar asociados con una clase de servicio que describe las características para la transmisión de los paquetes de cada flujo de servicio. En el estándar se definen diferentes clases de servicio:

Unsolicited Grant Service (UGS). En el estándar *Unsolicited Grant Service* (UGS). Muy demandante para servicios con tasas de transmisión constantes, que garantiza intervalos de transmisión periódicos y de tamaño fijo, principalmente usada para transmisión de tráfico de video en tiempo real, como video conferencias, tráfico de voz (sin supresión de silencio) y enlaces T1/E1.

Real-time Packet Services (rtPS). En el estándar, *Real-Time Variable Rate Service* (RT-VR). Para flujos de datos en intervalos periódicos y de tamaño variable como video MPEG.

Extended real-time Packet service (ertPS). En el estándar, *Extended Real-Time Variable Rate Service* (ERT-VR). Definida en el amendment 802.16e, es para servicios entre rtPS y UGS, como voz con supresión de silencio.

Non-real-time Packet Services (nrtPS). En el estándar, *Non-Real-Time Variable Rate service* (NRT-VR). Para uso con paquetes de datos de tamaño variable para los que se requiere una baja tasa de transmisión, soportando pequeños retrasos, como tráfico FTP.

Best Effort (BE). En el estándar, *Best Effort Service* (BE). Usado para servicios de baja prioridad para los que no se requiere un nivel de servicio mínimo, como correo electrónico o http.

3.6 Control de admisión

El control de admisión esta a cargo de la capa MAC y es necesario para que una SS pueda establecer una conexión con una BS.

El proceso de *ranging* se ejecuta en tres situaciones distintas; como parte del proceso de inicialización cuando se inicia conexión por primera vez, cuando se produce un *handover* para establecer una conexión con la nueva BS y finalmente se ejecuta cada cierto periodo de tiempo una vez establecida la conexión con la finalidad de que las SS y MS conectadas puedan mantener la calidad necesaria de la señal realizando los ajustes correspondientes de niveles de potencia y sincronía durante su conexión con la BS.

3.6.1 Proceso de inicialización

El proceso de inicialización consiste en establecer una conexión con una BS el procedimiento completo según el estándar [2] se muestra en la figura 3.11. Este describe los procesos desde que un nodo intenta establecer una conexión con una BS hasta que la conexión ha sido establecida y puede comenzar con la transmisión de datos habiendo logrado la conexión física y de red.

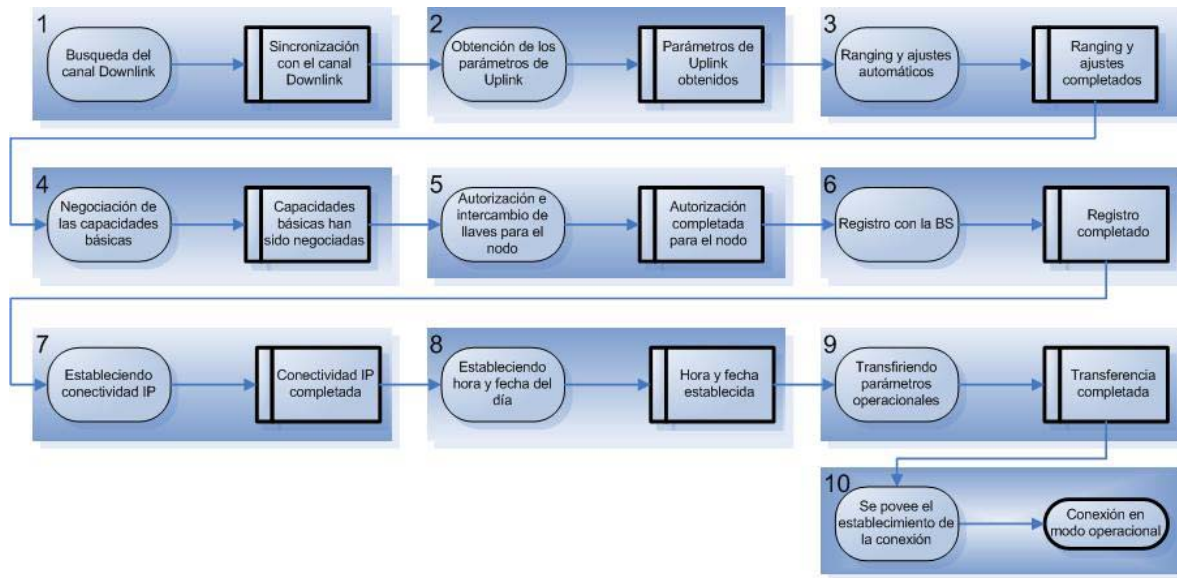


Figura 3.11. Proceso de inicialización

Este proceso comienza cuando una MS decide conectarse a una BS:

1. Para esto debe escuchar y sincronizarse con el canal DL de la BS con la que desea establecer una conexión.
2. Una vez sincronizado con el canal DL, del MAPA obtiene los parámetros UL para conocer las regiones de *ranging*, canales, potencia de transmisión, etc., y ajusta sus parámetros de transmisión.
3. Comienza a contender en los períodos de *ranging* contra otros nodos que estén intentando establecer una conexión en ese momento, realizando los ajustes necesarios.
4. Una vez logrado el *ranging*, el nodo negocia las capacidades básicas, entre ellas, el *Basic CID* que lo identificará con la correspondiente BS.
5. Se autorizan al nodo las capacidades básicas negociadas anteriormente y se realiza el intercambio de llaves para continuar con el registro.
6. Se registra con la BS lo que le permite tener acceso a la red.
7. Habiendo obtenido acceso a la red, el nodo obtiene una dirección IP.
8. El nodo establece una hora y fecha en común con la BS, para su uso con estampas de tiempo, esto es opcional.
9. Transferencia de parámetros operacionales adicionales, que el nodo puede obtener mediante la descarga de un archivo de configuración.

10. Finalmente se establece la conexión provista y el nodo puede comenzar con el intercambio de datos recién se acaba de conectar.

Estampa de tiempo. Una estampa de tiempo es un identificador simple que sirve para identificar cada transacción de manera única.

3.6.2 Proceso de ranging

El proceso de *ranging* es el proceso que permite a una SS o MS sincronizarse con los *frames* y solicitar ajustes de potencia y cambio en los perfiles de *downlink*.

Según la descripción del estándar el proceso de *ranging* realiza el intercambio de mensajes de RNG-REQ y RNG-RSP entre la MS y la BS durante la inicialización de su conexión. El comportamiento de este proceso se ilustra en la figura 3.12.

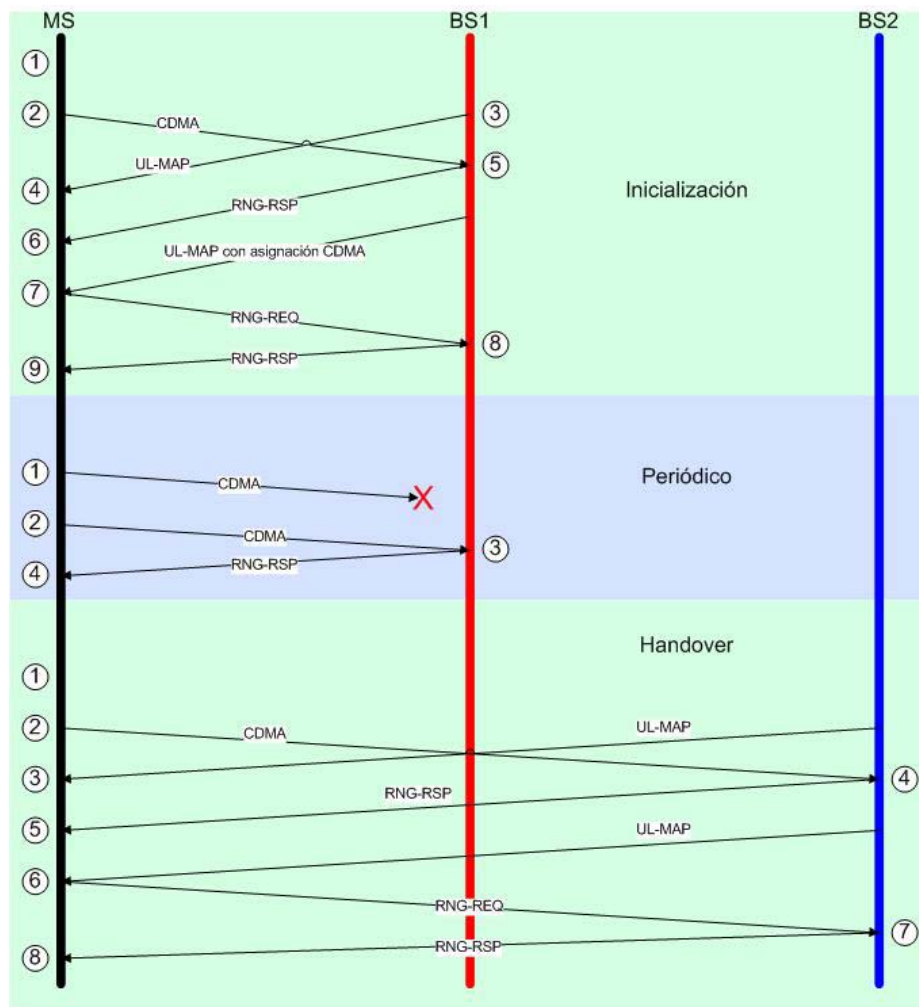


Figura 3.12. Diagrama de intercambio de mensajes para Ranging

A continuación se da una descripción de los mensajes de *ranging* involucrados en los distintos procesos y se describen los procedimientos para cada tipo de *ranging*.

RNG-REQ *Ranging Request*

Es transmitido por la SS o MS durante la inicialización y para realizar ajustes en la potencia. Se vale de un *Inicial Ranging CID* para ser identificado por la BS cuando no ha realizado ningún registro, y por un *Basic CID* en cualquier otro caso. Puede ser usado en otros periodos para determinar el retraso de la red.

RNG-RSP *Ranging Response*

Enviado por la BS en respuesta a un RNG-REQ. También se transmite de forma asíncrona para indicar correcciones basándose en mediciones hechas de otros mensajes recibidos, por lo que la MS está preparada para recibirlo en todo momento.

Ranging Inicial

1. Una vez que la MS encuentra una BS comienza con el proceso de *ranging*. En primer lugar crea un código CDMA y elige un tiempo aleatorio para comenzar a transmitir (usando el algoritmo *exponential backoff* [5]).
2. La MS entra en contención pasado el período de *exponential backoff* y envía un mensaje con código CDMA para el *ranging* inicial. Se programa un temporizador y si después de 50ms no se obtiene respuesta se enviará un nuevo mensaje.
3. La BS crea y envía un MAPA.
4. Cuando la MS recibe un MAPA, al estar en contención, ésta busca si existe alguna asignación en respuesta al mensaje CDMA enviado, en el caso presentado en el diagrama no encuentra ninguna y espera.
5. La BS recibe el código CDMA y crea un mensaje RNG-RSP insertando una asignación de transmisión para el código CDMA recibido e indicando ajustes en la potencia de transmisión (aumento o disminución).
6. La MS recibe un mensaje RNG-RSP con indicaciones para ajustar la potencia de transmisión y hace los cambios necesarios.
7. La MS vuelve recibe un nuevo MAPA y busca una asignación en respuesta al código CDMA enviado. Si la encuentra envía un mensaje RNG-REQ.
8. La BS recibe el mensaje RNG-REQ enviado por la MS, en consecuencia crea un Basic CID para la conexión de la MS y lo envía a través de un mensaje RNG-RSP.
9. La MS recibe un nuevo mensaje RNG-RSP, confirma que sea la respuesta al último mensaje RNG-REQ enviado. Si es así, busca indicaciones para realizar nuevos ajustes en la potencia. Entonces la MS encuentra que le fue asignado un

Basic CID, y comienza a negociar los recursos que necesita. Finalmente, activa el *ranging* periódico programando el próximo período y procede a negociar las capacidades básicas y así continua con el proceso de inicialización.

Ranging periódico

1. Una vez transcurrido el tiempo programado al finalizar el *ranging* inicial, comienza el período de *ranging* enviando un código CDMA, que no necesariamente es el mismo que se usó en el *ranging* inicial. Se programa un temporizador para que en caso de no obtener respuesta, después de cierto tiempo, se vuelva a enviar otro mensaje.
2. Se activa el temporizador indicando que no se ha recibido respuesta al código CDMA enviado anteriormente, entonces se elige otro valor usando *exponential backoff*, espera el tiempo indicado por éste y transmite el nuevo código CDMA.
3. La BS recibe el código CDMA, entonces crea un mensaje RNG-RSP indicando ajustes en la potencia de transmisión (aumento o disminución).
4. La MS recibe un mensaje RNG-RSP con indicaciones para ajustar la potencia de transmisión y con información sobre el próximo período de *ranging*.

Ranging durante *handover*

1. Una vez que la MS decide cambiar su conexión con otra BS y ha activado el mecanismo de handoff, la MS comienza con el proceso de *ranging*, crea el código CDMA y elige un tiempo aleatorio, de acuerdo a un valor de *backoff* elegido, para entrar en contención.
2. Una vez pasado el tiempo de *backoff* la MS entra en contención y envía un código CDMA, luego espera a recibir respuesta en un MAPA.
3. Al estar en contención la MS busca una asignación para el mensaje CDMA enviado pero en el caso presentado en el diagrama no encuentra ninguna.
4. La BS recibe el código CDMA y crea un mensaje RNG-RSP insertando una asignación en el MAPA para el código CDMA recibido.
5. La MS recibe un mensaje RNG-RSP con indicaciones para ajustar la potencia de transmisión.
6. La MS vuelve a buscar una asignación en respuesta al CDMA enviado. Si la encuentra envía un mensaje RNG-REQ.

7. La BS recibe el mensaje RNG-REQ enviado por la MS, en consecuencia crea un *Basic CID* para la conexión de la MS y es enviado a través de un mensaje RNG-RSP.
8. Se recibe un nuevo mensaje RNG-RSP en el que se le indica realizar nuevos ajustes en la potencia y la asignación un *Basic CID* procediendo a negociar las capacidades básicas y así continua con el proceso de registro según la figura 3.11.

La etapa de *ranging* se realiza mediante contención usando códigos de *ranging* inicial. Sin embargo para las MS que deseen realizar un *handover* existe un dominio de códigos que podrá usar para este propósito.

Aunque los procesos de inicialización son usados en general por cualquier nodo que desee ingresar a una red WiMAX, son empleados en mayor medida por las MS. Aunque es importante realizar un proceso de inicialización en un corto tiempo, un nodo con un enlace fijo, no se ve muy afectado por tener un tiempo relativamente alto en este proceso de ingreso a la red, mientras para un nodo móvil es crucial realizar este proceso en un tiempo mínimo para no afectar el desempeño de sus aplicaciones, en especial las de voz y video en tiempo real.

3.7 El estándar 802.16e y WiMAX Móvil

Una de los principales objetivos que se contemplan y establecen mediante la enmienda hecha al estándar, IEEE 802.16e, son los lineamientos necesarios para agregar movilidad a WiMAX. Esta enmienda permite a las estaciones móviles (MS) mantener una conexión con una red de área metropolitana inalámbrica (WMAN) mientras se desplazan dentro del área de cobertura ofrecida por varias estaciones base (BS).

La base de la movilidad es el *handover*. La función del *handover* es el hecho de llevar un nodo móvil de una celda a otra sin interrumpir la conexión en curso. El *handover* se puede deber al desplazamiento de una estación móvil, a cambios en las condiciones del canal o a consideraciones de la capacidad de la celda. Las funciones de movilidad operan en las bandas de frecuencia de 2.3, 2.5, 3.3 y 3.5GHz [2,17].

En primer lugar hay que considerar que el comportamiento de las señales es diferente cuando se ven sometidas a efectos de movilidad. Por eso, para soportar movilidad los diseñadores de OFDMA realizaron algunas modificaciones definiendo una variante denominada *Scalable-OFDMA*.

3.7.1 *Scalable* OFDMA (SOFDMA)

La capa física de OFDMA fue modificada por sus diseñadores para crear SOFDMA, que tiene como fundamento brindar características de conectividad para los enlaces móviles.

La escalabilidad en OFDMA se logra cambiando el tamaño de la FFT y por lo tanto el número de *subcarriers* dentro del ancho de banda del canal manteniendo el espacio entre las *subcarriers* constante a lo largo de los diferentes anchos de banda. El tamaño de la FFT es variable y puede tomar valores de 128, 512, 1024 y 2048. Se asigna una FFT de menor tamaño para canales con bajo ancho de banda mientras que para canales con mayor ancho de banda se asignan tamaños de FFT más grandes. Esto permite una tasa de transmisión adaptiva.

Haciendo el espacio entre *subcarriers* constante, SOFDMA reduce la complejidad del sistema para canales pequeños y mejora el desempeño para canales más amplios.

SOFDMA soporta anchos de banda de canal de 1.25MHz hasta 20MHz y está estructurado de la misma forma que OFDMA. Continuando con el aspecto fundamental sobre movilidad a continuación veremos más a fondo sobre el proceso de *handover*.

3.7.2 Tipos de *Handover* (L2)

En el 802.16e se definen dos tipos de *handover* genéricos, *hard handover* y *soft handover*.

Hard handover, conocido como *break-before-make*. La MS interrumpe su conexión con la BS actual antes de establecer un enlace con una nueva BS, este es un *handover* simple.

Soft handover, conocido como *make-before-break*. La MS establece una conexión con una nueva BS antes de interrumpir su conexión con la BS actual, la MS puede tener dos o

más enlaces con dos o más BS, que le permiten estar en un estado de *soft handover*, es más rápido sin embargo también es más complejo. El *soft handover* se divide a su vez en dos tipos, *Fast BS Switching* (FBSS) y *Macro Diversity HandOver* (MDHO).

Fast BS Switching, ofrece cambios rápidos de una BS a otra. El cambio rápido se debe a que la MS no realiza el proceso de entrada a la red.

Macro Diversity HandOver, la MS transmite simultáneamente a más de una BS.

El estándar sólo define como obligatorio el *Hard Handover* el resto son opcionales. El *handover* tiene varios retos:

- Debe ser lo suficientemente rápido, entre 50ms y 150ms.
- Debe ser capaz de realizar un proceso seguro mediante cifrado.
- Debe incluir soporte para el ahorro de energía para extender la duración de la batería en dispositivos móviles.
- Es necesario considerar que el *handover* sucede tanto en capa de enlace de datos (L2) como en capa de red (L3).

El *handover* L2 es administrado por WiMAX mediante un mecanismo en la subcapa MAC, mientras que el *handover* para L3 se lleva a cabo mediante el uso de *Mobile IP*. Observando los pasos del proceso de inicialización (diagrama figura 3.11), el procedimiento se puede dividir en dos etapas como se ve en la tabla 3.3.

Escanear canal <i>Downlink</i> y establecer sincronización con la BS Obtener parámetros del <i>Uplink Channel Descriptor</i> (UCD) Realizar el <i>ranging</i> Negociar las capacidades básicas Autorizar a la SS o MS e intercambiar llaves Realizar registro	Capa 2 MAC
Establecer conectividad IP Establecer hora del día Transferir parámetros operacionales Completar la conexión	Capa 3 RED

Tabla 3.3. Etapas de un *handover*

El mecanismo consiste en identificar las BS a las que una MS puede transferir la conexión. Para esto, mediante *broadcast* una BS difunde información de la topología de red usando mensajes MOB_NBR-ADV (*Neighbour ADvertisement*). Este mensaje provee información acerca del canal de las BS vecinas.

Las BS vecinas son aquellas que circundan con la BS que actualmente provee un enlace. La información de cada BS vecina es provista a través de su *Downlink Channel Descriptor* (DCD) y *Uplink Channel Descriptor* (UCD) incluidos dentro del Mapa (ver figura 3.10). El estándar indica que una BS puede obtener esta información a través de un *backbone* lo que facilitaría la sincronización de la MS con las BS vecinas eliminando la necesidad de monitorear la transmisión de los mensajes DCD y UCD.

Cada BS mantiene una tabla con información de cada una de sus BS vecinas; cada una de éstas difunde información a intervalos periódicos acerca de su topología de red a través de mensajes MOB_NBR-ADV, que van dentro de los DCD y UCD, el mensaje incluye información del canal para identificar una red y definir las características de las BS potenciales para una MS que busca realizar un *handover*. El estándar indica que el valor máximo para este periodo es de 30 segundos [2,18].

3.7.3 Proceso de escaneo (*Scanning*)

Escaneo es el proceso mediante el cual una MS realiza un sondeo para obtener las características de conexión que puede establecer con las BS a su alrededor, BS vecinas. Un intervalo de escaneo es el tiempo que dura la MS en examinar las características de las BS vecinas. Una BS debe asignar intervalos a la MS con el propósito de que esta busque y monitoree la capacidad de las BS vecinas como destino para un *handover*. El escaneo se basa en el intercambio de mensajes de administración de la capa MAC, estos mensajes se describen a continuación:

MOB_SCN-REQ	<i>Mobility Scanning interval allocation Request</i>
-------------	--

Mensaje enviado por la MS para solicitar un intervalo de escaneo con el propósito de buscar BS disponibles. En éste se indica un grupo de vecinas a las que va a escanear y si se asociará con alguna. Este mensaje incluye un índice que corresponde a la posición de las BS en el mensaje MOB_NBR-ADV.

MOB_SCN-RSP *Mobility Scanning interval allocation Response*

Una vez recibido el mensaje MOB_SCN-REQ la BS responde con un mensaje MOB_SCN-RSP, también puede ser enviado si no ha sido solicitado. Éste indica si le fueron asignados los intervalos, en caso afirmativo éstos serán iguales o mayores a los solicitados. También recomienda un grupo de BS a escanear.

Habiendo recibido el mensaje MOB_SCN_RSP si la respuesta fue afirmativa, la MS realiza los escaneos para una o más BS de acuerdo al intervalo asignado. Cuando la MS identifica una BS mediante un escaneo, ésta intenta sincronizarse con su canal *downlink* y estimar la calidad del enlace físico.

Mientras en la BS los paquetes destinados para la MS con puestos en un *buffer* y transmitidos entre los periodos de entrelazado o una vez finalizado el modo de escaneo.

MOB_SCN-REP *Mobility Scanning result Report*

Cuando en el mensaje MOB_SCN-RSP se le indica a la MS escanear un grupo de BS recomendadas, ésta, después de cada periodo de escaneo responde con un mensaje MOB_SCN-REP donde reporta a su BS servidora los resultados obtenidos.

Estos mensajes son utilizados para la administración de los procesos de escaneo para monitorear las BS vecinas y determinar cuando es necesario y posible realizar un *handover*, determinando cual de las BS vecinas es la mejor candidata para realizar el cambio.

3.7.4 Proceso de asociación

La asociación es un procedimiento de *ranging* inicial que es opcional y ocurre durante el intervalo de escaneo. La función de la asociación es habilitar a la MS para adquirir y registrar los parámetros de *ranging* y servicio disponibles. Con el fin de realizar una mejor elección entre las distintas BS vecinas para un *handover*. Existen tres niveles de asociación:

Asociación de nivel 0: Escaneo y asociación sin coordinación. La BS servidora y la MS negocian la duración de la asociación e intervalos, a través del mensaje MOB_SCN-REQ. La BS destino no tiene conocimiento de la MS así que ésta usa los periodos de contención para realizar el *ranging*.

Asociación de nivel 1: Asociación con coordinación. Con la recepción de un mensaje MOB_SCN-REQ la BS provee los parámetros de asociación a la MS y coordina esta asociación entre la MS y la BS vecina. La BS vecina reserva un código CDMA y un *slot* en una región dedicada para *ranging* inicial. El código CDMA o el *slot* pueden ser asignados a más de una MS pero no ambos, a modo de que no exista una colisión potencial entre dos MS.

Asociación de nivel 2: Asociación asistida por la red. La MS puede solicitar una asociación que sea asistida por la BS servidora, mediante un mensaje MOB_SCN-REQ, incluyendo una lista de BS vecinas con quien desea asociarse. La BS servidora coordina el proceso de asociación con solicitudes a la BS vecina similares a la del nivel de asociación 1. La MS no espera una respuesta después del envío del código CDMA ya que es enviada directamente a la BS servidora quien informa a la MS en un mensaje MOB_ASC-REP. Este tipo de asociación también puede ser iniciada por la BS servidora.

3.7.5 Proceso de *handover* (L2)

El estándar 802.16e no define un algoritmo para decidir el inicio de un *handover*. La MS después del proceso de escaneo, debe analizar la información obtenida de las BS vecinas, para evaluar la posibilidad de un *handover*. Una vez tomada la decisión de realizar el *handover*, que puede ser tomada tanto por la MS como por la BS, se envía una notificación en un mensaje MOB_BSHO-REQ o MOB_MSHO-REQ dependiendo de quien haya realizado la decisión. Una vez tomada la decisión se lleva a cabo el proceso de *handover*. El proceso consiste de cinco pasos según la figura 3.13. A continuación se describen los mensajes involucrados para la realización de un *handover*:

MOB_MSHO-REQ *Mobility MS HO Request*

Solicitud de inicio de *handover* enviada por la MS. La MS transmite el mensaje para comenzar un proceso de handoff. La BS responde con un mensaje MOB_BSHO-RSP para continuar con el proceso.

MOB_BSHO-REQ *Mobility BS HO Request*

Solicitud de inicio de *handover* enviada por la BS. El estándar lo define como opcional. Si se usa, el mensaje debe llevar al menos una BS recomendada y la MS debe responder con un mensaje MOB_HO-IND.

MOB_HO-IND *Mobility HO Indication*

Se utiliza para indicar si se efectúa o rechaza el *handover* con una de las BS recomendadas en el mensaje MOB_BSHO-REQ.

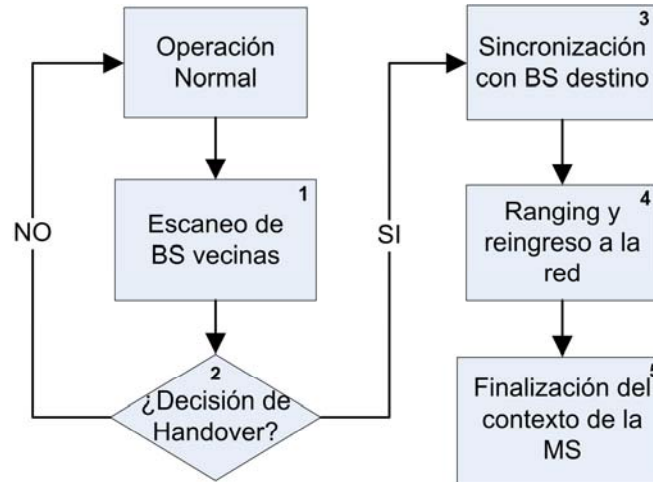


Figura 3.13. Proceso de *Handover*

1. Se hace la reelección de la celda por escaneo de las BS vecinas para determinar la viabilidad para realizar un *handover*. La MS usa la información en los mensajes MOB_NBR-ADV de las BS vecinas para programar nuevos periodos de escaneo, periodos de dormir (*sleep*) o determinar una BS vecina potencial para un *handover*.
2. La decisión de un *handover* puede ser originada tanto por la BS como por la MS. Si existe una selección conveniente y se decide iniciar un *handover* se envía un mensaje MOB_MSHO-REQ o MOB_BSHO-REQ. Si la MS inició el *handover*, la BS transmite un MOB_BSHO-RSP. De lo contrario se continúa con la operación normal.
3. La MS se sincroniza con el *downlink* de la BS destino usando la información recibida en un mensaje MOB_NBR-ADV o mediante la asignación de un *slot* para *ranging* inicial recibido por la BS servidora a través del *backbone*.
4. La MS y la BS deben realizar el *ranging* de *handover* en lugar del *ranging* inicial como se describió en la sección 3.6.2, negociar las capacidades básicas, realizar la fase de asociación y registro y el reingreso a la red para obtener conectividad IP.
5. La finalización del contexto es el paso final de un *handover* y consiste en terminar las conexiones con la BS servidora y eliminar toda la información asociada, es decir, paquetes en las colas, ARQ, temporizadores, contadores, etc. Enviando un mensaje MOB_HO-IND, indicando la liberación de la conexión.

3.7.6 Mecanismo de *handover*

Como hemos visto en las secciones anteriores, las funciones de movilidad se dividen en dos fases. La primera incluye las funcionalidades que predicen o habilitan el proceso de *handover* [3], como pueden ser información de la calidad del canal, funciones de medición y detección de BS vecinas, etc, fase de *pre-registro*. La segunda incluye el cambio de BS que delega la comunicación de una BS a otra, transfiriendo los parámetros relevantes de la conexión, fase de *handover*. Como se puede ver en la figura 3.14.



Figura 3.14. Pasos para realizar un *handover*

El mecanismo de HO es un procedimiento que da soporte a las MS, dándoles la posibilidad de desplazarse una gran distancia sin perder conectividad. Permite que una MS cambie de conexión entre dos BS.

El *handover* tiene como objetivo brindar conectividad a una MS aprovechando la existencia de diferentes BS, es decir, transfiere el servicio de una BS a otra mientras la MS se desplaza sin perder conectividad y mantiene la QoS requerida, esto último es posible como se demuestra en [7].

Sin embargo, el estándar tampoco define un algoritmo específico para el mecanismo de *handover*, dejando abierto el diseño del algoritmo a emplear. En el presente trabajo se tomo como referencia el mostrado en la figura 3.15, que describe un procedimiento para llevarlo a cabo, éste se basa en el estándar y fue propuesto por V. Rangel et al [7] que contribuye en el desarrollo del modelo internacional.

Durante la fase de **pre-registro** la conexión con la BS servidora no concluye y la transmisión de paquetes continúa. En la fase de *handover* la MS se asocia con la BS destino, libera la conexión con la BS servidora y finalmente cambia su conexión con la BS destino. La MS se sincroniza con el DL de la BS destino como se ve en el diagrama de la figura 3.15.

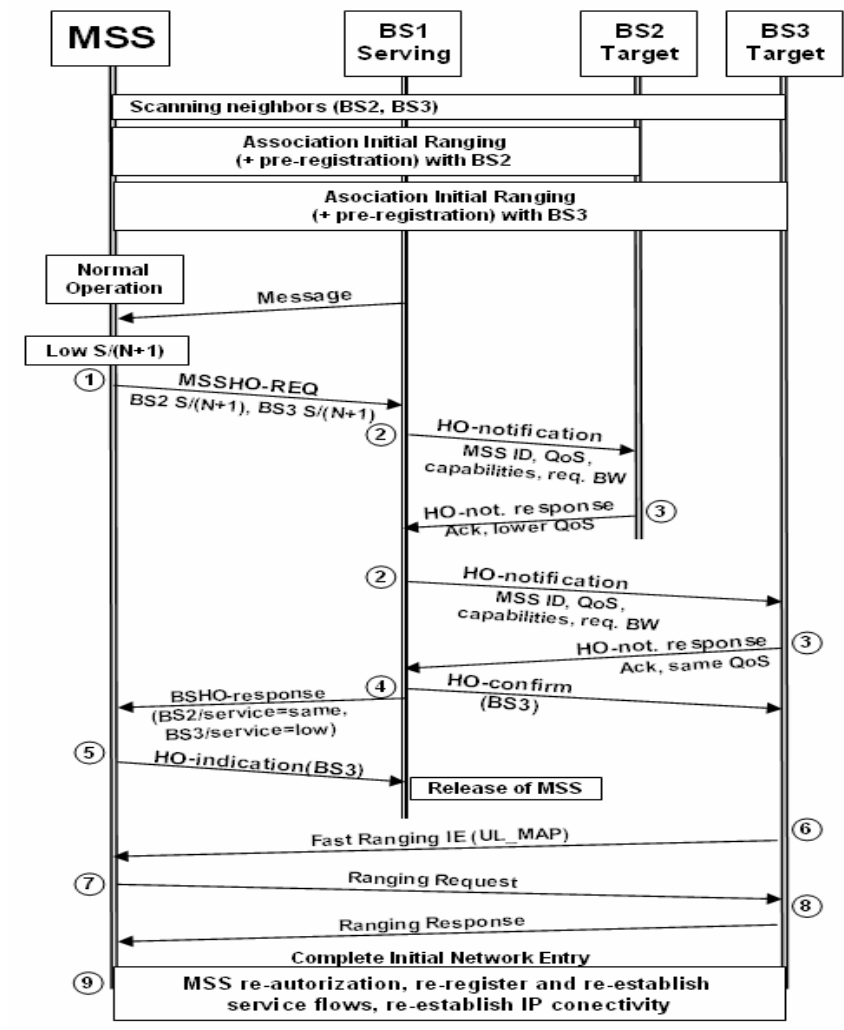


Figura 3.15. Procedimiento de HO en capa MAC

El estándar también ofrece la posibilidad de que la MS pueda cancelar el proceso de HO en cualquier momento [2,17], antes de que expire el tiempo de retención de recursos después de la transmisión de un mensaje MOB_HO-IND. El tiempo de retención de recursos es uno de los parámetros intercambiados durante el procedimiento de registro (es múltiplo de 100ms, siendo 200ms un valor recomendado), que indica el tiempo que dura la reservación los recursos solicitados durante el *handover*.

3.7.7 Ahorro de energía

En un sistema WiMAX móvil el uso de dispositivos que funcionan con baterías es habitual. La duración de la carga de una batería es limitada y su vida también lo es. Es por eso que el ahorro de energía se vuelve esencial en ambientes inalámbricos. Por eso el estándar observa algunos aspectos que permiten extender la duración de la batería.

Los aspectos consisten en definir modos de operación y estos son, modo dormido (*sleep mode*) y modo inactivo (*idle mode*).

En el estado de modo dormido, la MS negocia periodos de ausencia con la BS servidora en los que no consumirá recursos ni de *uplink* ni de *downlink*. Esto además de minimizar el uso de energía, reduce el uso de recursos de la interfaz aérea en la BS. Durante este periodo la BS conserva los recursos de la MS, los paquetes destinados a ésta son almacenados en un *buffer* hasta que finaliza el *sleep mode*. Terminado el *sleep mode* la BS reserva recursos para enviar los paquetes que mantiene en el *buffer* para esta MS.

En el estado de modo inactivo, permite a la MS hacerse disponible para la BS en los periodos de *broadcast* en *downlink* sin registrarse con alguna BS específica conforme la MS atraviesa múltiples BS generalmente sobre grandes áreas geográficas. Esto beneficia a la MS eliminando los requerimientos del modo de operación normal y de *handover* y restringiendo la actividad de escaneo a intervalos discretos. El beneficio obtenido por la BS además de la eliminación en el uso de recursos de la interfaz aérea y el tráfico de *handover*, es que provee un método simple y rápido denominado *paging*. El *paging* es usado para alertar a la MS sobre tráfico pendiente en el *downlink*.

La eliminación del *handover* se debe a la creación de grupos lógicos entre las BS. Cada grupo de BS realizan transmisiones de *broadcast* para entregar los paquetes de cada MS que se encuentre en este estado usando su CID.

3.7.8 Handover a nivel de red (L3)

En capa de red L3, la movilidad se divide en 2 ámbitos, entre dos dominios de red distintos (macromovilidad) y en el mismo dominio de red (micromovilidad).

La macromovilidad se utiliza para cambiarse entre dos dominios de red. En la macromovilidad ha dominado una única propuesta llamada *Mobile IP* (MIP) de la cual hay versiones mejoradas.

La micromovilidad es para un cambio que se realiza dentro de un mismo dominio administrativo, entre dos subredes. Este escenario es mucho más frecuente, por lo que es necesario minimizar el impacto de la señalización. A diferencia de la macromovilidad, la micromovilidad tiene distintas soluciones: MIP-RR (*MIP-Regional Registration*), HMIP (*Hierarchical MIP*), CIP (*Cellular IP*) y HAWAII.

3.8 Mobile IP

Generalmente cuando un usuario móvil transfiere su conexión mediante un *handover* de una estación base a otra, también cambia de red, por lo que una vez completado el cambio físico se deben establecer los nuevos parámetros de conexión con la nueva red a la que se ingresa, para eso se le debe asociar con una dirección IP para que pueda continuar recibiendo los paquetes dirigidos a dicho usuario. Aún cuando el estándar especifica el establecimiento de la conectividad IP mediante un esquema de solicitudes DHCP, para cuestiones de movilidad abarcando un área más extensa es conveniente el uso de protocolos como *Mobile IP*.

Mobile IP es un protocolo de nivel de red, con el es posible que los paquetes transmitidos sean dirigidos al destinatario correcto manteniendo así una conexión permanente a la red en condiciones de movilidad. Para esto *Mobile IP* crea túneles conforme el usuario va cambiando su conexión de una red a otra.

Mobile IP es un protocolo publicado por la *Internet Engineering Task Force* (IETF) en la tabla 3.4 se muestran las distintas versiones del estándar, donde se describen los métodos, comportamientos, especificaciones y en general todas las características que este protocolo debe cumplir.

Request For Comments (RFC)	Descripción
RFC2002	IP Mobility Support. Características que permitan el ruteo transparente de datagramas IP para nodos móviles en Internet, octubre 1996.
RFC3220	IP Mobility Support for IPv4. Se agregan características y se hacen correcciones al RFC 2002, enero 2002.
RFC3344	IP Mobility Support for IPv4. Correcciones al RFC3220, agosto 2002.
RFC4721	Mobile IPv4 Challenge/Response Extensions. Define mejoras en cuestiones de seguridad, enero 2007.

Tabla 3.4. Especificaciones para *Mobile IP*

Otros RFCs relacionados con *Mobile IP* se mencionan en la tabla 3.5.

Request For Comments (RFC)	Propósito
RFC2003 [27]	Encapsular de IP dentro de IP
RFC1853 [28]	Concepto de <i>IP Tunneling</i>
RFC1256 [29]	Mensajes de descubrimiento de rutas ICMP

Tabla 3.5. RFCs relacionados con *Mobile IP*

Algunas de las entidades y elementos característicos que componen *Mobile IP* son descritos en la tabla 3.6, obtenidos de la documentación de OPNET Modeler.

Mobile Node (Nodo Móvil)

Es un *host* o *router* que cambia su punto de asociación de una red a otra. Un nodo móvil puede cambiar su ubicación sin cambiar su dirección IP. Esto le permite comunicarse con otros nodos en Internet en cualquier ubicación usando una misma dirección IP, asumiendo conectividad en capa de enlace a un punto de asociación siempre disponible.

Home Agent (HA)

Es un *router* en la red local de un nodo móvil, que hace de túnel para la entrega de datagramas al nodo cuando esta fuera de su red local y mantiene información de su localización actual.

Foreign Agent (FA)

Es un *router* en una red visitada por un nodo móvil, que le provee servicios de ruteo mientras se encuentra registrado. El *foreign agent* recibe los datagramas provenientes del túnel creado por el *home agent* y los entrega al nodo móvil. Para los datagramas enviados por el nodo móvil, el *foreign agent* funge como *router* predeterminado.

Care-of Address

Extremo de un túnel hacia un nodo móvil, para que los datagramas sean entregados al nodo mientras esta conectado a través de un punto de acceso externo a la red que se conecta de manera habitual. El protocolo puede usar dos tipos de *care-of address* diferentes una "*foreign agent care-of address*" que es la dirección de un agente externo con el que el nodo esta registrado, y una "*co-located care-of address*" que es una dirección local que el *foreign agent* asigna al nodo en su red interna.

Home Address

Es una dirección IP asignada a un nodo móvil que permanece sin cambio sin importar donde establezca su conexión a Internet.

Tabla 3.6. Elementos de *Mobile IP*

A un nodo móvil se le asigna una dirección IP denominada *Home Address* en una red local originaria (*Home Network*). Esta *Home Address* es administrada como una dirección IP permanente provista por un *host* estacionario (*Home Agent*). Un paquete IP enviado por el nodo móvil es encapsulado dentro de otro paquete IP, para lograr que llegue a su destino.

Cuando el nodo móvil está en un área apartada de su *Home Network* se le asocia con una ***foreign agent care-of address*** que refleja su punto de asociación actual.

El nodo móvil usa su *Home address* como destino para todos los datagramas IP que envía, así las respuestas son recibidas por su *Home Agent* quien le hace llegar todos los datagramas destinados a él, una representación de un modelo *Mobile IP* se ilustra en la figura 3.16.

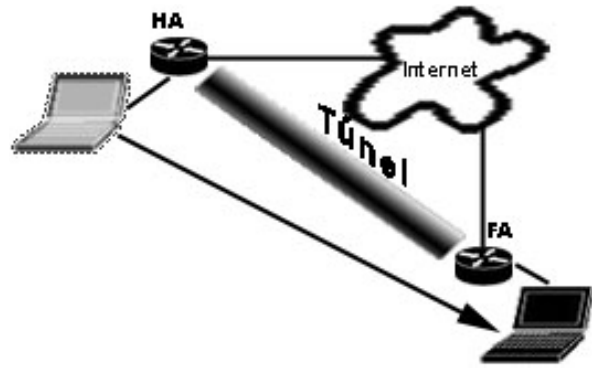


Figura 3.16. Representación de *Mobile IP*

Así, cada nodo móvil es identificado por su *Home Address* sin importar el punto por el que tenga acceso a Internet. Mientras el nodo móvil se mantiene fuera de su área local se registra con un *Foreign Agent* que lo asocia con una *care-of-address* que provee información sobre su punto de acceso actual a Internet. Esta *care-of-address* se registra con el *Home Agent*, así éste envía los datagramas destinados al nodo móvil a través de un túnel usando su *care-of-address* que lo enlaza con el *Foreign Agent* quien finalmente lo tiene asociado con otra *care-of-address* que lo identifica dentro de su red local.

3.9 VoIP: Voz sobre IP

La tecnología de voz sobre IP (VoIP: *Voice over IP*) permite la transmisión de paquetes de voz en una red basada en el protocolo de Internet (IP). Una red convergente de voz y datos ofrece una disminución de costos ya que hay menos redes que administrar y mantener. No obstante la adición de protocolos de VoIP incrementa la complejidad en la configuración y administración de los dispositivos al igual que consume recursos de la red que impactan sobre el tráfico de datos. Además, el desempeño *end-to-end* que requiere la transmisión de voz debe ser muy preciso con el fin de que sea entregada casi

inmediatamente. Por lo que las redes deben ser diseñadas para que los requerimientos en la transmisión de paquetes de voz no afecten el desempeño del tráfico de paquetes de datos, razón por la cual la QoS es imprescindible dentro de la tecnología WiMAX.

La tecnología VoIP ha ido evolucionando gradualmente y reúne varios protocolos cada uno de ellos definido por distintas organizaciones. Estos definen las normas a seguir para la digitalización de las señales de voz, para que puedan ser enviadas en forma de paquetes.

Esto nos permite realizar llamadas de voz o transmitir audio y video usando redes basadas en el protocolo IP a muy bajo costo gracias a la extensión que estas redes tienen. Los protocolos que han sido creados para ofrecer servicios de VoIP son mostrados en la tabla 3.7.

Protocolo [30]	Creador/Tipo
H.323*	Conjunto de protocolos definidos por la ITU-T
SIP*	<i>Session Inicial Protocol</i> , definido por la IETF
Megaco H.248*	<i>Gateway control Protocol</i>
MGCP*	<i>Media Gateway control Protocol</i> (Cisco)
Skinny Client*	<i>Skinny Client Control Protocol</i> (Cisco)
MiNet	Protocolo de Mitel
CorNet-IP	Protocolo de Siemens
IAX	Protocolo original para la comunicación entre PBXs Asterisk
Skype	Protocolo propietario <i>peer-to-peer</i>
IAX2	Versión 2 del protocolo IAX
Jingle	Protocolo utilizado en la tecnología Jabber
weSIP	Protocolo de Voz Telecom

* Protocolos de señalización

Tabla 3.7. Protocolos para VoIP

Para la digitalización de la voz se han desarrollado diversos *codecs* que permiten codificarla en paquetes para ser transmitidos a través de una red de datos. La transmisión de un paquete de voz se muestra en el diagrama de la figura 3.17.

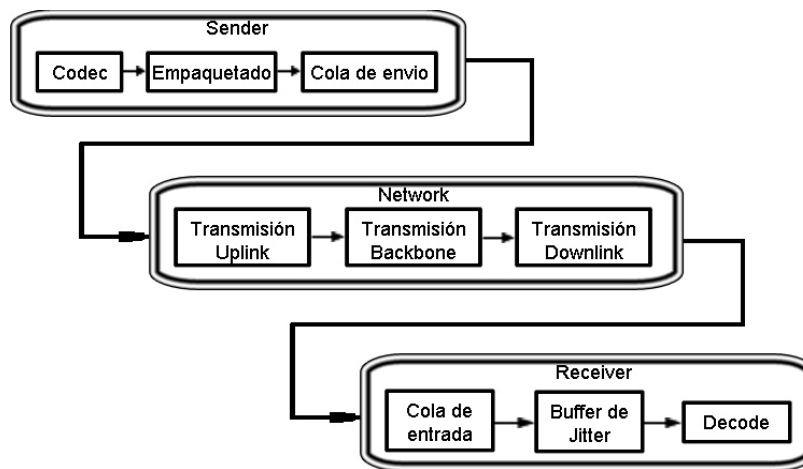


Figura 3.17. Trayectoria de un paquete de voz

Existen varios estándares para la codificación de la voz que se muestran en la tabla 3.8.

Codec [30]	Tasa de transmisión
G.711	48, 56 o 64 kbps
G.722	48, 56 o 64 kbps
G.723.1	5.3 o 6.3 kbps
G.726	16, 24, 32 o 49 kbps
G.728	16 kbps
G.729	8 kbps

Tabla 3.8. Codificadores de Voz

H.323 es un protocolo que provee las bases para el envío de audio y video y soporta codificadores como G.711, G.723.1, G728, entre otros. Por lo que nosotros centraremos nuestra atención en G.711 que es soportado por H.323.

Una aplicación de voz con un codificador G.711 usa una frecuencia de muestreo de 125MHz, por lo que en un segundo recoge 8000 muestras. Para G.711 se usa UDP como protocolo de transporte y las tramas son enviadas cada 10ms.

Sabiendo que G.711 toma 8000 muestras por segundo, con una resolución de 8 bits, la tasa generada por la capa de aplicación es de 64kbps [19], como se ve en la tabla 3.8:

$$8000 \text{ muestras} * 8\text{bits} = 64000 \text{ bps} \tag{F3.1}$$

Tomando en cuenta que el envío se realiza cada 10ms, tenemos que se envían un total de 100 frames cada segundo, obteniendo frames en capa de aplicación de 80bytes:

$$8000 \text{ muestras}/100 = 80\text{bytes} \tag{F3.2}$$

Voz	Trama				
	Tamaño(bits) (encabezado + datos)			Total	
Voz				80	
UDP		20	80	100	
IP+UDP	20	20	80	120	
MAC+IP+UDP	6	20	20	80	126

Tabla 3.9. Encapsulamiento para G.711

Las muestras de voz son tomadas cada segundo, por lo que en capa de aplicación se genera una tasa de 64kbps. Pero los *frames* se envían cada 10ms y después de haber pasado por la capa MAC (ver tabla 3.9), han sido fragmentados para ser enviados en slots a través de la interfaz aérea WiMAX, además de haberse agregando los encabezados correspondientes. Con esto se obtiene una tasa de transmisión de 96kbps.

$$126\text{bytes} * 8\text{bits} * 100\text{fps} = 100800\text{bps} \tag{F3.3}$$

Como en G.711 no se usa supresión de ruidos se recomienda usar un flujo de servicio para tráfico de voz con una QoS UGS para una tasa de transmisión de 100.8kbps y un retardo (*delay*) de 10ms.

3.10 Conclusiones

La funcionalidad de las entidades que componen un sistema WiMAX (BS y MS) consisten en la transmisión de información, en el *downlink* (BS->MS), que se dividen en tiempo y frecuencia y las transmisiones en el *uplink* (MS->BS), toman lugar de acuerdo a la programación del uso de los canales, en ambos casos los recursos son administrados por la BS. Y con el uso de OFDM se obtiene un gran aprovechamiento de la interfaz aérea, que ofrece una gama amplia de esquemas aéreos para usar.

Finalmente, en el estándar no se establecen procedimientos o algoritmos para realizar el handover, por lo que para el diseño del mecanismo se tiene libertad en la forma de realizarlo, solo basta con seguir los lineamientos citados y utilizando los elementos descritos en este.

Por otro lado, para tener un proceso de *handoff* completo es necesario incluir funciones de movilidad en L3. Con *Mobile IP* se puede ofrecer un servicio de movilidad completo, sin embargo debido al encaminamiento triangular, se produce redundancia de tráfico en Internet, aunque se han realizado mejoras a este protocolo que reducen la magnitud del problema. No obstante es de gran utilidad pues permite al nodo ser localizado sin importar su ubicación en Internet.

Para los servicios de VoIP se cuenta con varias posibilidades, teniendo codificadores con diversas características como la compresión, supresión de ruido, eliminación de periodos de silencio, entre otros. Que ofrecen una gama amplia para la creación de aplicaciones de voz.



CAPÍTULO 4

ANÁLISIS Y DISEÑO DEL MODELO DE SIMULACIÓN

4.1 Introducción

Por ser WiMAX una tecnología relativamente nueva, resulta muy difícil realizar estudios con equipos reales debido a que son poco accesibles y muy costosos; para el diseño de redes, la facilidad y ventajas que ofrece un simulador como OPNET *Modeler*, al no tener que realizar pruebas con equipo real, lo que evita muchos inconvenientes, aunado a la flexibilidad que brinda, hacen de éste una excelente herramienta para el trabajo de simulación de redes. El uso de estos sistemas ayuda a disminuir los costos de desarrollo.

En este capítulo se realizará un análisis de los componentes del simulador OPNET *Modeler*, del funcionamiento del modelo WiMAX dentro de éste y se hará una descripción de los escenarios, pruebas y cambios realizados sobre el modelo.

Con la finalidad de poder definir un mecanismo de *handoff* que permita reducir el tiempo que dura la transferencia de la conexión de una estación base a otra manteniendo la QoS requerida por cada estación móvil (MS). El estudio del presente trabajo consiste en determinar una forma adecuada para que el intercambio de mensajes sea más eficiente. Esto se pretende lograr mediante la reducción del tiempo que los mensajes permanecen en la cola desde que son creados hasta antes de ser enviados.

4.2 Modelo de simulación

Los estudios fueron realizados con el empleo de la herramienta de simulación de redes *Optimized Network Engineering Tools*, OPNET *Modeler* v.14, la cual ofrece diversos instrumentos de modelado y actualmente soporta el modelo de WiMAX incluyendo las básicas para su funcionamiento.

Modeler permite simular redes alámbricas e inalámbricas a escala real mediante el modelado de protocolos, dispositivos y tecnologías. Útil para la planeación de una red, administración de su desempeño, ingeniería y operaciones sirviendo como herramienta de innovación. Con el empleo de *Modeler* como solución, se puede realizar un extenso análisis del desempeño de protocolos y tecnologías de infraestructura de red a escala real.

4.2.1 Entorno de simulación (OPNET Modeler)

Un simulador sirve para modelar un sistema real mediante el uso de computadoras. Para esto debe ser capaz de establecer las condiciones de funcionamiento del sistema en cuestión tomando en cuenta las variables involucradas, todo esto basado en modelos matemáticos y estadísticos, que permiten recrear el entorno que conforma al sistema y obtener resultados de comportamiento de acuerdo con los parámetros manejados para su análisis.

OPNET *Modeler* es capaz de recrear una gran variedad de redes simulando el flujo de mensajes, paquetes perdidos, mensajes de flujo de control, entre muchos otros. Esta compuesto por tres elementos principales que son una interfaz de simulación gráfica, editores de diseño jerárquico y un analizador de resultados.

En *Modeler* un diseño se hace de manera jerárquica, este cuenta con tres modelos para la realización de un diseño: *Modelo de red* donde se realiza la configuración de la redes y subredes de la simulación, *Modelo de nodos* donde se define las estructura de estos y los protocolos que maneja y *Modelo de procesos* donde se definen los estados de un nodo mediante *maquinas de estados finitos* (FSM: *Finite State Machine*), ver figura 4.1.

Modelo de Red. En este se pueden definir la topología de la red de comunicación, a través de la interconexión de las entidades de comunicación llamadas nodos, definiendo el tipo de conexión ya sea bus, punto a punto, enlaces de radio, entre otros. En base a estos bloques básicos se pueden crear modelos más complejos.

Modelo de Nodos. Aquí se define la estructura y funcionalidad de cada dispositivo de comunicación presente dentro de la red como pueden ser servidores, computadoras, PDAs, *laptops*, ruteadores, etc.

Un nodo puede estar compuesto por varios módulos entre ellos el módulo transmisor y el módulo receptor encargados de la transmisión y recepción de paquetes respectivamente para comunicarse con los enlaces de la red. Igualmente se pueden definir procesos, colas y generadores de tráfico.

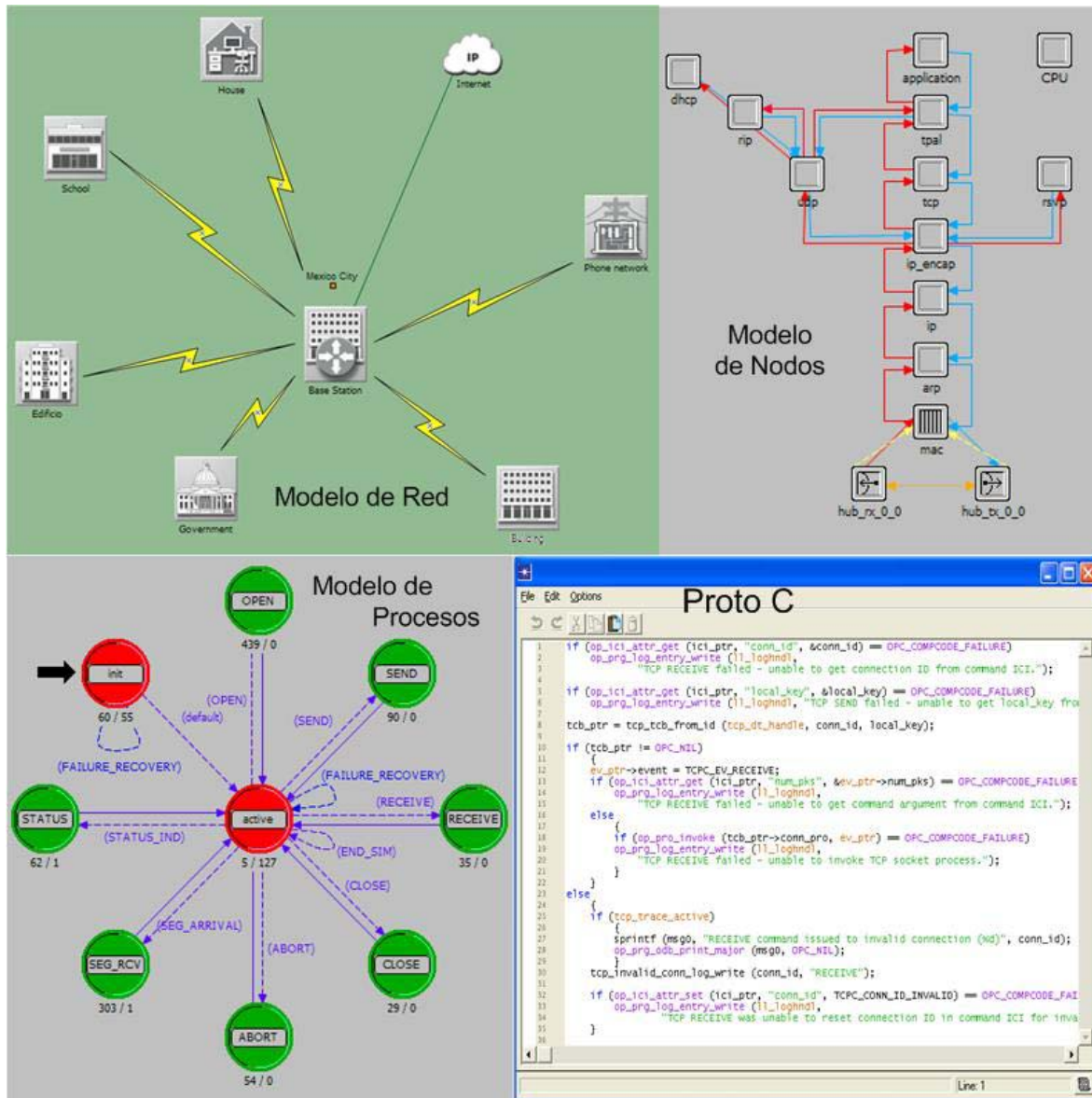


Figura 4.1. Elementos de OPNET Modeler

Modelo de Procesos. En este módulo se define la función realizada por cada uno de los módulos de un nodo. La funcionalidad de cada módulo esta representada gráficamente mediante **maquinas de estado finito** (FSM) donde se describen los comportamientos en respuesta a los eventos que suceden dentro de un nodo.

Editor de Código. Es donde se crea el código que describe el comportamiento de cada componente de un estado dentro de la FSM que corresponde a un proceso de un nodo. Este código se basa en un lenguaje denominado *Proto-C*.

Proto-C. Es un conjunto extenso de librerías proporcionadas por OPNET que forman parte del núcleo de Modeler; en estas librerías se definen procedimientos específicos escritos en lenguaje de programación C creados específicamente para definir elementos, condiciones y obtener parámetros referentes al comportamiento de una red. Esta librería contiene un sin número de funciones y procedimientos predefinidos que facilitan el estudio al mismo tiempo que ofrecen un alto nivel de flexibilidad en el desarrollo de los elementos necesarios para simular los procesos dentro de una red de comunicaciones.

Modeler actualmente incluye soporte para el diseño y evaluación de sistemas IEEE 802.16 WiMAX.

4.3 Modelo de procesos WiMAX

En el modelo se separan los planos de control y de datos de la capa MAC de WiMAX. A su vez, el plano de datos es común para la MS y para la BS mientras que los planos de control están separados. Por lo que se tienen tres módulos separados como se muestra en la figura 4.2.

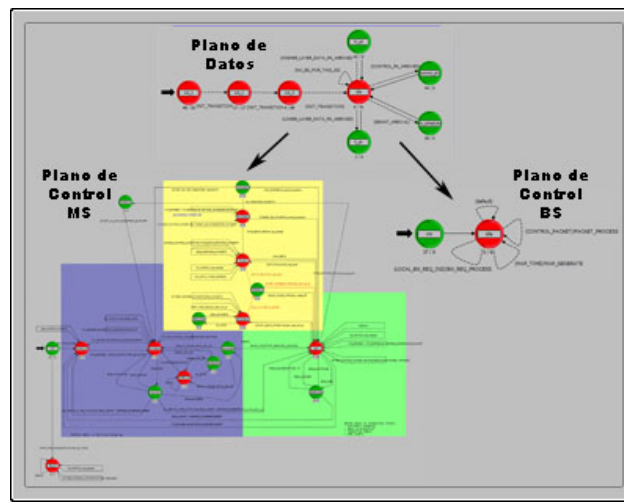


Figura 4.2. Capa MAC WiMAX

En el modelo de procesos se define el comportamiento de un nodo mediante máquinas de estado finito (FSM), es decir, se define el comportamiento en respuesta a eventos que suceden dentro de una MS.

La funcionalidad del plano de datos es recibir todos los paquetes. Los paquetes de datos de la capa superior y los paquetes de datos y control de la capa inferior (PHY). Los paquetes de control son enviados a los procesos hijos que corresponden a los planos de control de la MS y de la BS.

en el CID del *ranging* inicial esperando para contender en la región de *ranging* para poder transmitir el paquete a la BS y poder registrarse y establecer una conexión con ella.

Operación regular. En esta sección se capturan todos los eventos que suceden una vez que la estación suscriptora ha logrado establecer conexión con una BS. Aquí se procesan los mensajes de control, se determinan los períodos de *ranging* con el fin de realizar los ajustes necesarios a los parámetros de la conexión (nivel de potencia), se actualizan los intervalos de escaneo para la BS vecinas. Igualmente, es donde se debe notificar sobre el inicio del handover junto con los de movilidad para handover.

Escaneo y handover. En esta sección se procesan y programan los intervalos de escaneo, se actualizan las mediciones de calidad de señal de las BS vecinas para evaluar el handover. Principalmente se procesan los mensajes de HO y se establece cual será la BS destino y si se produce el *handoff* se encarga de que se realice el proceso de *ranging* con la nueva BS y prepararse para el proceso de transición.

Del mismo modo como en una MS se representa el flujo de procesos mediante el plano de control, una BS tiene su equivalente, ver figura 4.4, en estos se procesan los mensajes y eventos particulares ya sea para la MS o la BS, pero también existe un modelo donde se procesan las funciones en común.

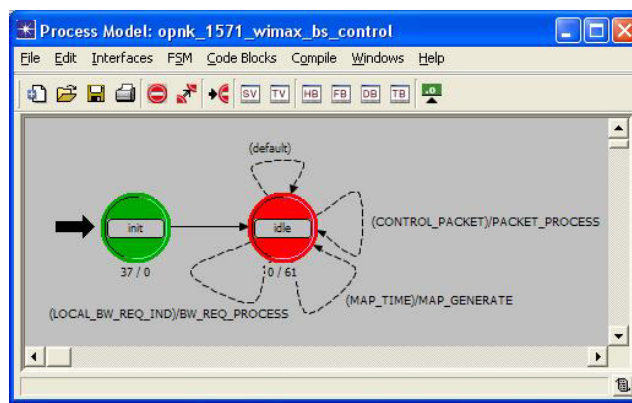


Figura 4.4. Plano de control en la capa MAC de una BS

Aunque para el envío de paquetes de datos en OPNET *Modeler* se adaptó la capa física dentro del modelo, para el intercambio de mensajes de control no ha sido hecha la implementación correspondiente. Lo que repercute en la obtención de resultados para el retardo en la capa física. Es decir los paquetes son enviados directamente de la capa

MAC origen a la capa MAC destino sin pasar por la capa física y por consiguiente omitiendo este retardo en los resultados. Esto es razonable debido a que por ser una nueva tecnología el desarrollo se haga de acuerdo a las necesidades más básicas y prioritarias para facilitar el desarrollo de la tecnología.

4.4 Modelo inicial de pruebas

Las pruebas a realizar consistirán en determinar el funcionamiento del modelo de propagación que deberá coincidir con el del modelo teórico tomando en cuenta la calidad de la señal mediante las mediciones de la relación señal a ruido (SNR: *Signal to Noise Ratio*). También se comprobará el comportamiento del mecanismo de *handoff* que incluye el modelo.

Con el fin de conocer el comportamiento lo más completo posible del mecanismo de *handoff* se realizarán las pruebas necesarias contemplando las capas L2 y L3 en un ambiente de movilidad, uno de los principales objetivos será comprobar el efecto que tienen sobre el tráfico los principales elementos involucrados en este proceso.

En primer lugar se analizará el proceso de *ranging*, este proceso ocurre cuando una MS intenta establecer una conexión con una BS, cuando se produce un proceso de handover y cada determinado período de tiempo una vez establecida la conexión con el fin de ajustar los parámetros de la conexión (potencia, sincronía). Es de particular interés conocer el tiempo que tarda en completarse este proceso una vez que ha iniciado.

También es necesario observar el efecto que tiene sobre la señal el desplazamiento de la MS para esto se analizará el SNR ya que es lo que determina la activación del mecanismo de handover.

Por otro lado, se realizarán pruebas en las que se pueda observar el retraso que sufren los paquetes (*Packet delay*) debido a su permanencia en una cola. Ya que cada paquete antes de ser enviado a su destino se pone en una cola, en espera de que la BS envíe las concesiones necesarias en el MAPA UL para poder ser transmitido. Dado que cada

mensaje debe ser tratado como un paquete a la hora de ser enviado, al realizar este estudio podremos conocer el retardo que sufre un mensaje.

Finalmente será necesario determinar la mejor forma de adaptar el mecanismo de HO diseñado de modo que al integrarlo no se vean afectadas otras características del modelo por lo que se hará un análisis de la implementación del modelo WiMAX dentro de éste para establecer la mejor forma de implementarlo.

Para los resultados requeridos se plantea un primer escenario en OPNET *Modeler* con las siguientes características:

El escenario consta de 3 estaciones base (BS), un nodo móvil (MS) y un servidor que recibirá el tráfico enviado por la MS, en la figura 4.5 se muestra esta configuración.

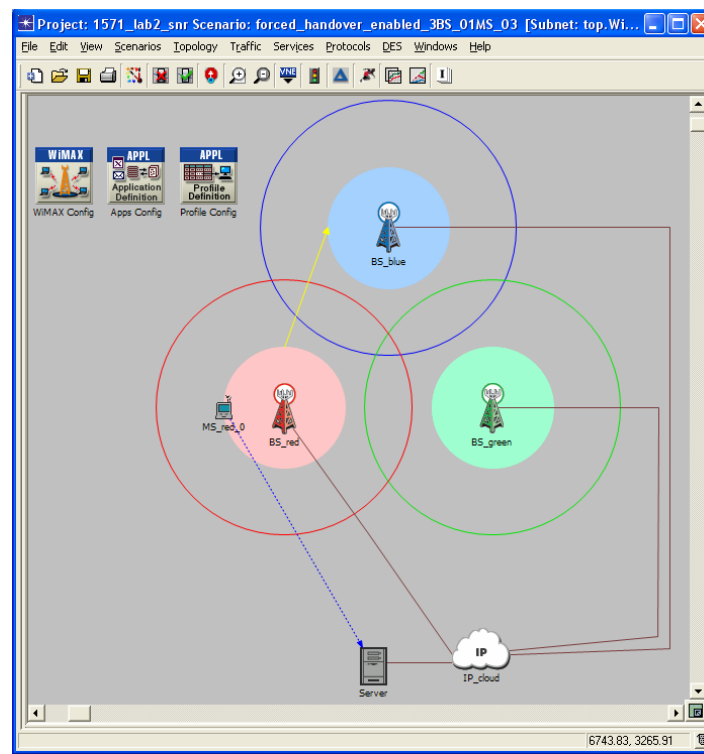


Figura 4.5. Modelo inicial de pruebas

Las BS están diferenciadas por colores y son identificadas cada una como BS_red, BS_blue y BS_green, están interconectadas a través de un sistema basado en IP. Hay un servidor al que se tiene acceso a través de una red IP y es con el que la MS mantiene el intercambio de paquetes de voz. En un principio la MS, identificada como MS_red_0, está

conectada con la BS_red, una vez iniciada la simulación sigue una trayectoria identificada con una flecha de color amarillo. Durante el *handoff* la MS debe cerrar su conexión con la BS_red y establecer conectividad con la BS_blue.

Por último, el servidor esta configurado para aceptar tráfico FTP y VoIP generados por la estación móvil. Para el tráfico FTP se generan 50,000 *bytes* a intervalos de tiempo de 300segundos éstos se envían mediante *Best Effort* (BE). Mientras que para VoIP se usa G.711 según se describió en la sección 3.9.

4.5 Análisis del SNR (Signal to noise ratio)

En este trabajo el análisis del SNR tiene dos objetivos, por un lado comprobar que se trabaja con un modelo de propagación basado en un modelo teórico, esto para asegurar la validez de los resultados; por otro lado, dado que el SNR refleja la calidad de la señal principalmente de acuerdo al desplazamiento de la MS y en el estándar no se menciona específicamente el parámetro que se ha de emplear ni el momento para activar el mecanismo de handover, dejando abierta su elección. Es por esto que el momento que determinará la activación del mecanismo de HO en este trabajo será de acuerdo a la calidad de la señal medida mediante el SNR, correspondiente al modelo del apéndice B2.

Los resultados sobre calidad de la señal para determinar la activación del mecanismo de HO se hicieron mediante mediciones de SNR. El comparativo de las mediciones se realiza entre la BS servidora contra los valores obtenidos de las BS vecinas. Así, nuestro indicador será un nivel bajo de SNR en la conexión actual con respecto a la señal medida de las BS vecinas. Para esto es necesario determinar un valor de umbral y cuando la diferencia sea menor a éste, será momento de comenzar con el proceso de *handoff*.

La medición del SNR en la MS se realiza en el instante en que ésta recibe un paquete, con esto se obtiene el nivel de la señal que se tiene con la BS servidora. Por su parte el SNR de las BS vecinas se realiza durante el proceso de escaneo. En la figura 4.6 se muestra el nivel de SNR en la MS mientras se desplaza a través de la trayectoria de color amarillo.

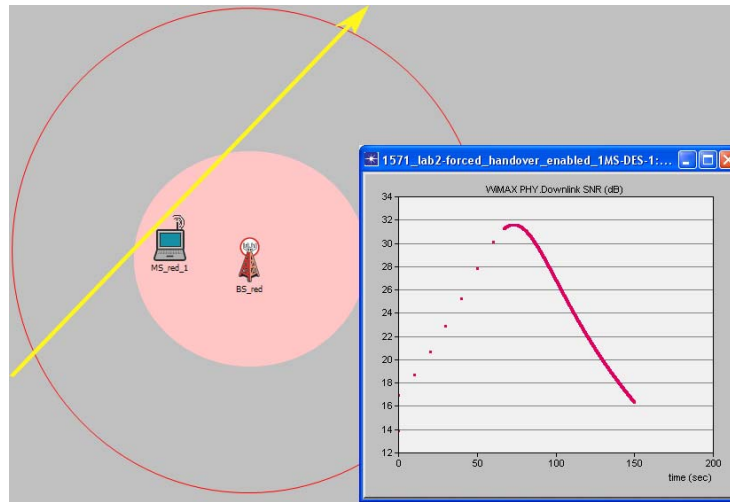


Figura 4.6. SNR con flujos de voz

En la gráfica podemos notar dos secciones una línea roja que comienza punteada y luego se vuelve continua. Durante los primeros segundos la línea roja es punteada debido a que las mediciones se hacen mediante los únicos paquetes que son recibidos, es decir, los de *ranging* periódico. Cuando la línea se hace continua, comienza la recepción de paquetes de voz. Cada punto de la línea indica el valor de SNR que la MS sostiene con la BS a la que está conectada, la BS_red, en el instante en que el paquete es recibido. Aquí los valores de SNR oscilan entre 16dB y 32dB (decibeles) y el nivel bajo es el de interés, ya que es el determinante de activación.

Mientras que la línea negra representa los intervalos de escaneo con una BS vecina, en este caso el escaneo se efectúa de manera continua durante todo el proceso de la conexión y la tendencia nos indica que la MS se acerca a esta BS. En todos los casos anteriores las mediciones son tomadas para el *downlink*.

4.6 Análisis del tráfico de mensajes

En esta sección analizaremos las funciones y mensajes de control. Nos enfocaremos a los mensajes de control para movilidad, identificando las funciones y dando seguimiento a los mensajes que son transmitidos entre una MS y su BS para conocer el funcionamiento de *handoff* más a detalle dentro del modelo.

Para eso necesitamos conocer en dónde se crean los mensajes en el origen y dónde son recibidos en el destino incluyendo el tratamiento que sufren en ese trayecto.

El simulador consta de varios módulos que dan soporte a la parte de movilidad de WiMAX. Cada módulo contiene un conjunto de procedimientos y funciones que dan funcionalidad a WiMAX dentro de éste, tanto para la MS como para la BS. Los mensajes son generados en el módulo de movilidad del plano de control y recibidos en el plano de datos donde se clasifican y canalizan al plano de control. En la tabla 4.1 se muestran algunas funciones involucradas en el procedimiento de *handoff* que fueron identificadas dentro del modelo.

Módulo	Función	Descripción
wimax_support	wimax_support_pk_send	Envía un paquete a la capa MAC específica
	wimax_support_mac_connection_pk_enqueue	Encola un paquete de datos de acuerdo con su CID en la capa MAC
	wimax_support_mac_pk_in_queue_insert	Encola un paquete de acuerdo con su flujo de servicio
	wimax_support_bw_request_insert	Encola una solicitud de ancho de banda
wimax_mobility_support	wimax_mob_nbr_adv_interval_check	Se encarga de crear y enviar mensajes MOB_NBR-ADV
	wimax_mob_management_msg_create	Crea mensajes de administración y control
	wimax_mob_control_msg_send	Accesa a la cola para enviar un mensaje
	wimax_mob_bsho_response_send	
wimax_bs_control	wimax_bs_control_packet_process	Procesa los mensajes de control en la BS
	wimax_bs_control_bw_req_process	Procesa las solicitudes de ancho de banda
	wimax_bs_control_sched_bw_req_notify	Notifica sobre una nueva solicitud de ancho de banda
	wimax_bs_control_sched_bw_req_insert	Cuando llega una solicitud de ancho de banda la inserta en la cola correspondiente
	wimax_bs_control_map_process	Invocada al principio de cada frame para generar los mapas UL y DL
	wimax_mac_mob_nbr_adv_evaluate	Evalúa si se necesita enviar un mensaje MOB_NBR-ADV y lo crea y realiza una solicitud de ancho de banda para enviarlo en un broadcast
wimax_ss_control	wimax_ss_control_packet_process	Procesa los mensajes de control en la MS
	wimax_ss_control_grants_decode	Decodifica los elementos de información de acuerdo al tipo de concesiones recibidas
	wimax_ss_control_scan_next_nbr_bs	Sondea la próxima BS en la lista de vecinas
	wimax_ss_control_scan_serving_bs	Comprueba el estado de su conexión con la BS servidora

Tabla 4.1. Funciones de procesos de control y movilidad

Las funciones anteriores sirven de apoyo para la creación y gestión de los mensajes usados que son mostrados en la tabla 4.2 y son referentes a movilidad de acuerdo a las especificaciones hechas en el estándar.

Mensaje	Descripción
MOB_NBR-ADV	Para comenzar escaneo de BS vecinas
MOB_SCN-REQ	Solicitud de escaneo
MOB_SCN_RSP	Respuesta a solicitud de escaneo
MOB_MSHO-REQ	Solicitud de HO por parte de la MS
MOB_BSHO-RSP	Respuesta a solicitud de HO
MOB_HO-IND	Indica que termina la conexión con la BS servidora o una cancelación de HO

Tabla 4.2. Mensajes de administración de movilidad

Para estos mensajes el modelo permite su definición mediante los formatos establecidos en el estándar, en la figura 4.7 se muestra un ejemplo del formato para un paquete MOB_MSHO-REQ.

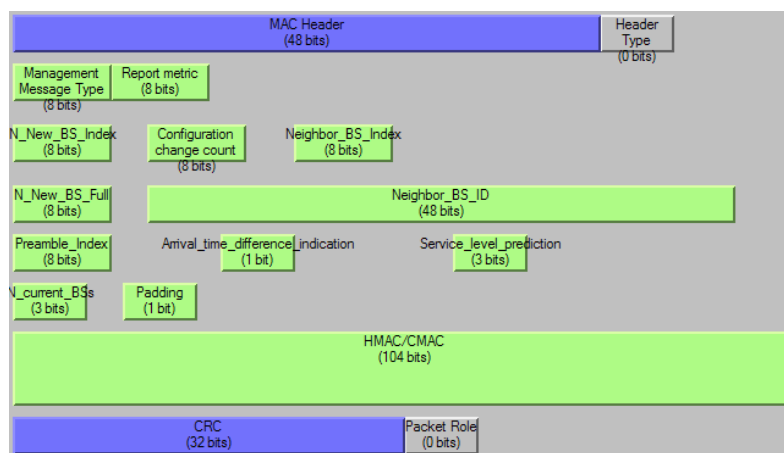


Figura 4.7. Formato de un paquete

4.7 Proceso de transmisión de un paquete de datos

El flujo de datos desde la BS hacia una MS y viceversa se canaliza a través de identificadores de conexión. Esto es implementado en el modelo de OPNET usado, una conexión es un conducto lógico a través del cual fluyen los paquetes y se referencia por un identificador de conexión (CID: *Connection ID*). En el modelo de procesos de la MS es donde se realiza el procesamiento de los paquetes y mensajes que son recibidos tanto de la MS como de la BS servidora aquí se clasifican de acuerdo a su tipo (control o datos).

El CID también sirve para clasificar y canalizar los paquetes de manera adecuada de acuerdo con el ToS (Tipo de servicio) especificado para cada uno. Cada CID se asocia con un flujo de servicio correspondiente a la QoS asignada al ToS designado para cada aplicación.

La transmisión de un paquete en el *uplink* se realiza de acuerdo con el algoritmo mostrado en la figura 4.8, que está basado en [20]. Sólo se analiza el *uplink* dado que nos interesa únicamente el envío de un mensaje desde la MS que es quien inicia el proceso de handover; aunque para el *downlink* sólo varía un poco.

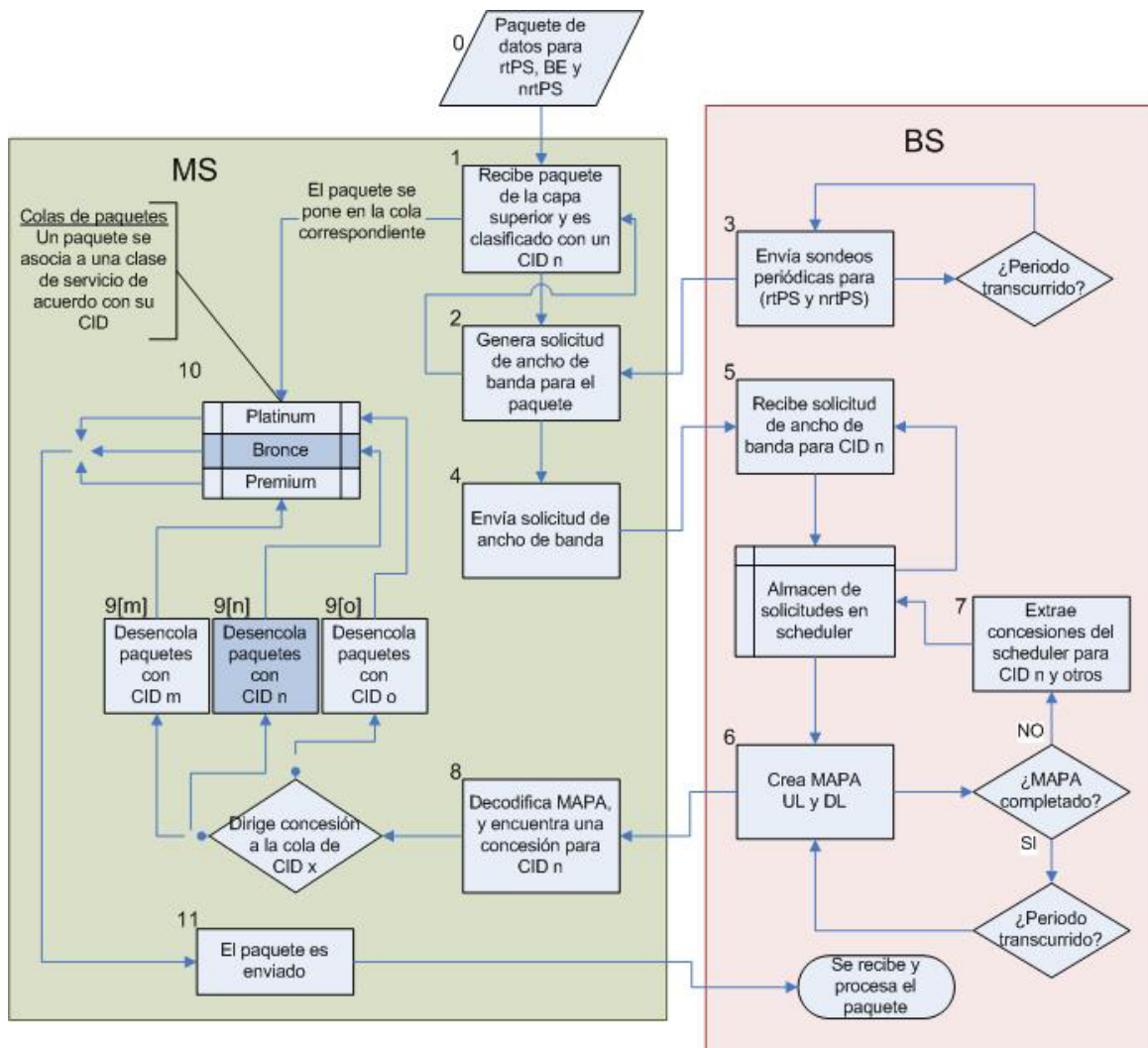


Figura 4.8. Transmisión de un paquete de datos en el canal UL

A continuación se detallan los pasos que sigue el diagrama de la figura 4.8:

0. Un paquete es generado en la capa de aplicación del modelo OSI y desciende hasta llegar a la capa MAC.
1. Se recibe un paquete de la capa superior, éste es clasificado de acuerdo a su tipo de servicio (ToS) y mapeado con un CID específico (en este caso CID n). Los CID son definidos de acuerdo a un flujo de servicio al cual el paquete pertenece y es metido en la cola de la conexión correspondiente en espera de una concesión para ser enviado. Un flujo de servicio está asociado con una clase de servicio.
2. Se genera una solicitud de ancho de banda para el paquete de datos y vuelve en espera de un nuevo paquete.
3. Crea y envía sondeos (*polls*) periódicos preguntando si la MS necesita realizar modificaciones en los recursos asignados a rtPS y nrtPS, luego espera hasta el próximo período.
4. El nodo comprueba sus conexiones para determinar si es necesario solicitar alguna modificación en la asignación de sus recursos a través del sondeo (*polling*). Entonces envía una solicitud de ancho de banda para el paquete con CID n y si es el caso las modificaciones a través del sondeo.
5. La BS recibe la solicitud de ancho de banda para el CID n, la pone en el *scheduler* para ser procesada y vuelve en espera de otra solicitud.
6. Se genera el MAPA con las regiones de *uplink* y *downlink*. Una vez creado se espera hasta la creación del próximo MAPA.
7. Mientras se crea el MAPA se extraen concesiones del *scheduler*, entre ellas, una para el CID n, este proceso se repite hasta que el MAPA se ha completado atendiendo a las solicitudes de ancho de banda de cada nodo.
8. La SS recibe el MAPA y lo decodifica, encuentra que el *scheduler* asignó una concesión para la transmisión del paquete con CID n.
9. La concesión es dirigida a la cola del CID n.
10. Se saca el paquete con CID n de la cola.
11. El paquete de datos es enviado dentro de los límites de tiempo que le fueron asignados.

El proceso anterior es para un paquete de datos, sin embargo. para el envío de un mensaje es muy similar; conociendo el proceso que sigue el envío de un paquete, la diferencia consta en que éste es generado en la misma capa MAC, es de un tamaño mucho menor y al ser recibido en la BS es clasificado y apartado para ser procesado.

Además, sabiendo que nuestros mensajes no pertenecen a ningún tipo de servicio como rtPS o UGS estos son enviados mediante BE.

4.8 Retardos en la transmisión de mensajes

El análisis de retardo en la transmisión de mensajes nos deja ver el incremento en tiempo que puede afectar el intercambio de mensajes. El retardo principalmente es producido por el tiempo que tarda la BS en obtener un espacio en el mapa para transmitir el mensaje.

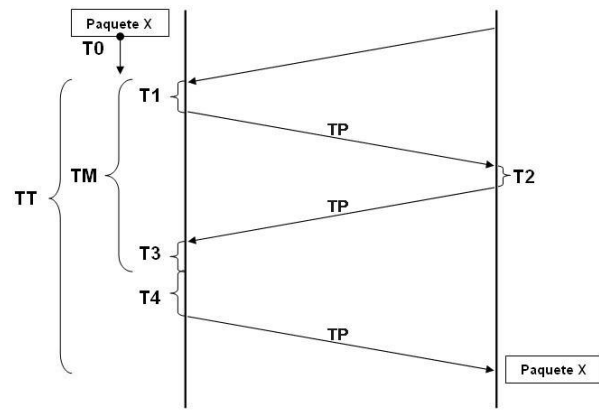


Figura 4.9. Tiempos de transmisión

De la descripción presentada en la sección 4.7 del proceso de transmisión de un paquete, obtenemos el diagrama de la figura 4.9 que indica los tiempos involucrados en la transmisión, y de este podemos obtener los tiempos que afectan al retardo, estos son mostrados en la tabla 4.3.

T0	Arribo del paquete
T1	Tiempo de permanencia en la cola del mensaje de solicitud de ancho de banda
T2	Tiempo de proceso de la solicitud de ancho de banda
T3	Tiempo de respuesta, concesión de ancho de banda para el envío de un paquete
T4	Tiempo de atención de paquetes, se atienden en primer lugar los que permanecían en la cola antes del arribo del Paquete X
TM	Tiempo de procesado de mensajes
TT	Tiempo total de atención del paquete
TP	Tiempo de propagación por el medio físico

Tabla 4.3. Tiempos de transmisión

Con referencia a la tabla 4.3, podemos observar que de T1 a T3 se realiza el procesado de mensajes, solicitudes y concesiones de ancho de banda tanto en la MS como en la BS. En T4 se asigna el tiempo en que el **Paquete X** será enviado, sin embargo hay que esperar la atención de los paquetes que estaban en la cola al arribo de éste. Una vez

atendidos los paquetes previos se genera el **Mapa** asignando *slots* donde se transmitirá el paquete. Por último TP es el tiempo que tarda en propagarse la señal a través de la interfaz aérea, así, el tiempo de procesamiento de mensajes queda como sigue:

$$TM = T1 + T2 + T3 + 2TP \quad (F4.1)$$

Donde

$$TP = R/c \quad (F4.2)$$

donde R representa el alcance de la antena y c la velocidad de la luz. Y puesto que el alcance para WiMAX con LOS es de 7km y para NLOS de 50km:

$$TP_7 = 7\text{km} / 3 \times 10^8 = 23.33\text{us} \quad (F4.3)$$

y

$$TP_{50} = 50\text{km} / 3 \times 10^8 = 166.66\text{us} \quad (F4.4)$$

Así, el tiempo de envío de un paquete o mensaje es:

$$TT = TM + TP + T4 \quad (F4.5)$$

Para obtener una mejora, se debe reducir alguno de estos tiempos; nos centraremos en la reducción del tiempo T1, el tiempo que el mensaje permanecerá en la cola de solicitud de ancho de banda. Es importante recordar que actualmente los mensajes deben ser enviados con la prioridad más baja, es decir, BE.

El análisis del retardo (*delay*) consiste en determinar qué beneficio se puede conseguir al insertar los mensajes de HO al principio de la cola de BE. Para lo cual fue necesario definir las aplicaciones con las características adecuadas que la MS usará, esto se describirá en el próximo capítulo.

4.9 Proceso de *Handover*

Ahora se requiere conocer el comportamiento de los nodos (BS y MS) involucrados en el proceso de HO mientras un MS se desplaza a lo largo de una trayectoria.

El proceso completo de handover a partir de una operación normal en la MS se inicia realizando mediciones periódicas de SNR una vez que el nivel de éste está por debajo de

un valor previamente establecido. Cuando esto sucede, se seleccionan los parámetros de escaneo para comenzar a sondear y obtener los parámetros de las BS vecinas una vez completado el escaneo de las BS vecinas se evalúa si es preciso activar el mecanismo de *handoff*, en caso de que no, se vuelve a operar normalmente hasta el próximo período de escaneo de lo contrario si se activa el mecanismo, entonces el proceso de handover se inicia seleccionando la BS destino dentro del grupo de las vecinas que mejor puede proporcionar los servicios demandados. A continuación se verá el funcionamiento de un mecanismo básico implementado en el *Modeler*.

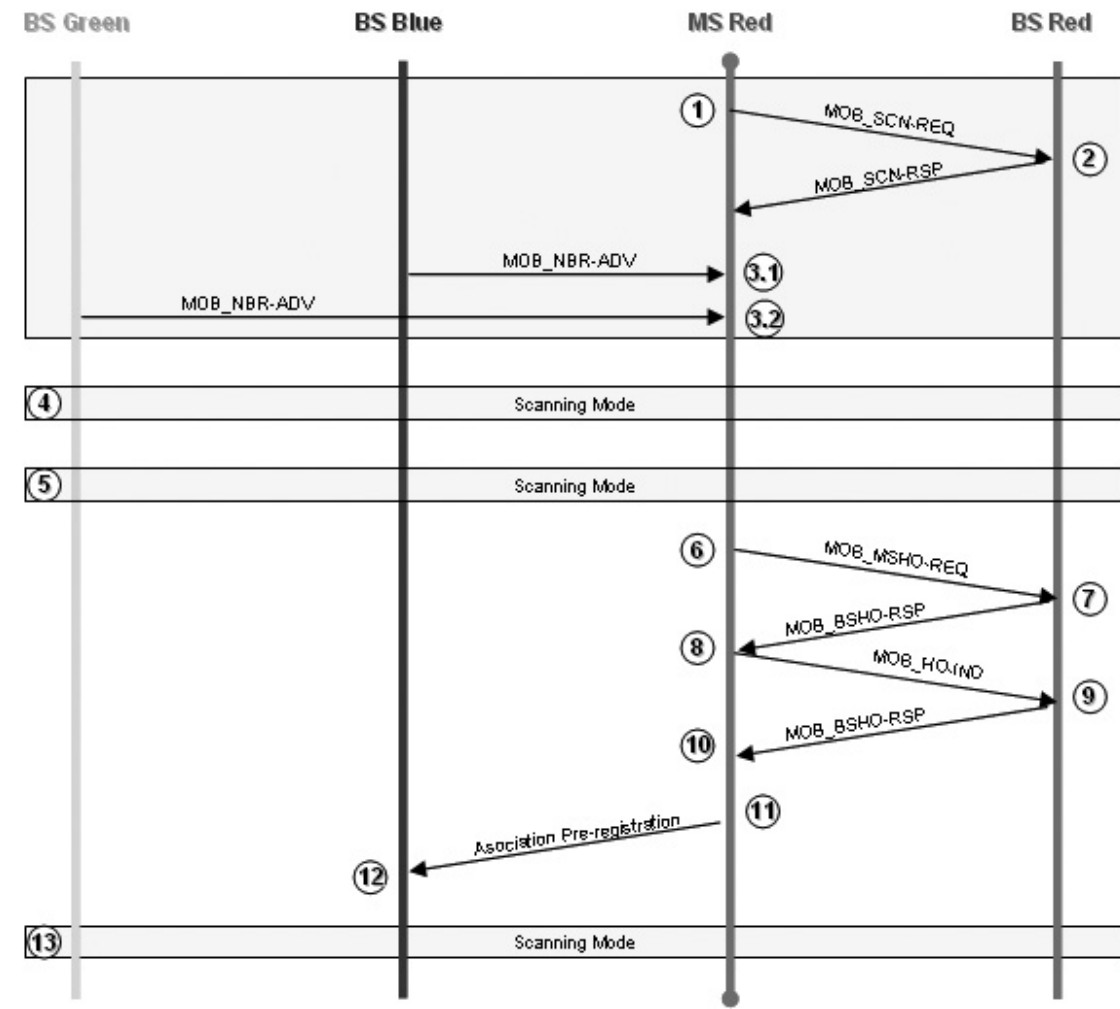


Figura 4.10. Procedimiento que sigue el mecanismo de HO

Para obtener el diagrama que define el mecanismo de HO integrado en el modelo WiMAX de OPNET *Modeler* hay que observar el flujo de mensajes de HO. Después de dar seguimiento a los mensajes correspondientes, se obtuvo el diagrama que describe el funcionamiento de este mecanismo dentro del *Modeler*, éste se muestra en la figura 4.10

y se tomará como base para la propuesta que se realizará más adelante en el próximo capítulo.

En la figura 4.10, se muestran los pasos realizados durante la operación del procedimiento de HO. Describiendo cada uno de los pasos, tenemos que, después de una operación normal en su conexión con su actual BS servidora la MS detecta una disminución en la calidad de la señal (paso 5) por lo que inicia el proceso de *handoff*, siguiendo los pasos que se mencionan a continuación:

1. La MS envía un MOB_SCN-REQ para poder realizar un sondeo de las BS vecinas.
2. La BS servidora responde con un mensaje MOB_SCN-RSP indicando el intervalo de escaneo y el tiempo en que debe comenzar.
3. La MS se pone en modo de escaneo y recibe un mensaje MOB_NBR-ADV proveniente de cada BS vecina, cada una de ellas transmite periódicamente estos mensajes en modo de *broadcast* a las MS próximas, estos mensajes sirven para que cada MS tenga conocimiento de las BS a su alcance, información sobre su configuración y características de conectividad obteniendo candidatas para un posterior handover.

La BS servidora verifica y actualiza el estado de las MS que se encuentran en proceso de escaneo.

4. La MS repite el proceso de escaneo completo para cada BS vecina como en el paso 3.
5. Nuevamente la MS escanea como en el paso 3 y paso 4, esto se repite hasta que las condiciones de señal cambian y se hace necesario cambiar de estación base.
6. La MS envía un mensaje MOB_MSHO-REQ indicando que la mejor candidata para el HO es la BS_blue, esto debido a que los valores de SNR son adecuados, puede ofrecer el ancho de banda y la QoS requeridos para cada servicio.
7. La BS servidora (BS_red) recibe y procesa el mensaje enviado por la MS en el paso anterior para responder con un mensaje MOB_BSHO-RSP donde se le indica que se ha hecho una evaluación final de los parámetros de conexión que deberá usar para comenzar con el proceso de HO con la BS destino.
8. Habiendo la MS recibido el mensaje MOB_BSHO-RSP, envía un MOB_HO-IND avisando a la todavía BS servidora que realizará un HO.
9. La BS recibe el mensaje de MOB_HO-IND y transmite un nuevo mensaje MOB_BSHO-RSP con las indicaciones necesarias.

10. La MS recibe el mensaje MOB_BSHO-RSP Indicando entre otras cosas, el número de frames que ha de esperar antes de que la BS candidata ofrezca una oportunidad para transmitir un RNG-REQ para iniciar el proceso de *ranging* de acuerdo con su DL-MAP.
11. Comienza el periodo de pre-registro y *ranging* según el tiempo indicado por la BS destino.
12. El proceso de *ranging* es realizado en la BS, se completa el proceso de conexión.
13. Ya operando normalmente la conexión y al igual que en el paso 3.

4.10 Conclusiones

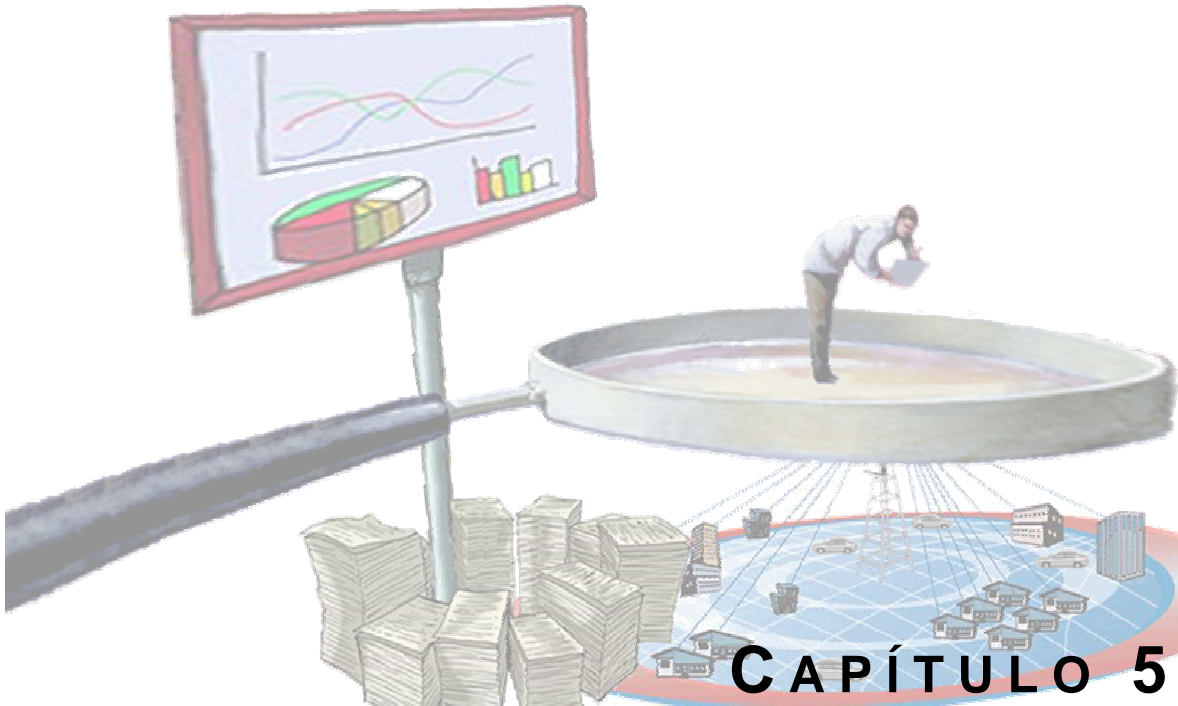
Después de un análisis de funcionamiento del simulador y el estudio del modelo WiMAX implementado que está basado en el estándar, pudimos observar que debido a lo extenso de éste, existen funcionalidades que aún no han sido completamente implementadas.

Uno de los obstáculos que se presentó fue que la implementación de envió de mensajes a través de la capa física no está completo. Y aun habiendo realizado el intento por complementar esta parte se observó que requiere un conocimiento más profundo del simulador principalmente de las funciones propias de OPNET. Por lo que se uso un modelo teórico.

Este aspecto era necesario para lograr uno de los puntos propuestos contando con los elementos necesarios por lo que en este caso sólo se trató de manera teórica. Se puede comenzar con el análisis de los resultados, que son tratados en el próximo capítulo.

En el aspecto de los escaneos, es necesario destacar que no es recomendable realizar escaneos durante todo el proceso de conexión, ya que esto afecta el desempeño en el envió de paquetes, así como también el rendimiento de la batería.

En el próximo capítulo se presentarán los resultados obtenidos de las pruebas realizadas.



CAPÍTULO 5

IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1 Introducción

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos en las simulaciones hechas sobre los cambios realizados en el modelo. Las pruebas realizadas se enfocaron en el plano de control de la estación suscriptora móvil y el módulo de movilidad WiMAX.

Puesto que nuestro interés se centra en el comportamiento del proceso de handover basta con que exista un área de intersección entre nuestra BS servidora y las BS candidatas con el fin de que se garantice mantener una conexión continua. En el escenario planteado el aspecto de alcance de una BS no es de mayor interés.

Otro aspecto de relevancia se centra en que las bandas de operación deben ser las mismas para que la MS pueda escuchar los mensajes de las BS vecinas (MOB_NBR_ADV), por eso todas operan con el mismo perfil a nivel físico.

En las transmisiones se utiliza modulación QPSK con una tasa de $\frac{1}{2}$ pues en la mayoría de los casos es la que se tendría en los bordes de una celda y es la más robusta con niveles de señal bajos y para la activación del mecanismo el valor de activación radica en que exista una diferencia de 6dB entre el SNR de la BS servidora y la BS destino.

5.2 Retardos en la transmisión de mensajes

Ya que mediante las simulaciones se observó que cuando la MS enviaba un mensaje, la respuesta era recibida al mismo tiempo en que era enviado y después de analizar el código se observó que no estaba completa esta parte de la implementación, se realizó un análisis teórico del retardo de transmisión, apoyado del retardo obtenido por el envío de paquetes de datos.

El retardo en la transmisión de mensajes nos deja ver el incremento en tiempo que puede afectar el intercambio de mensajes. En nuestro caso el retardo principalmente es producido por el tiempo que tarda la BS en obtener un espacio en el mapa para transmitir el mensaje.

Por lo que nos centraremos en la reducción del tiempo TM , ver [F4.1] página 73, es decir, el tiempo de permanencia en la cola de los mensajes de solicitud y concesión de ancho de banda de acuerdo con la figura 4.9. De aquí en adelante trabajaremos con los tiempos descritos en esa figura.

Puesto que nos estamos centrando solamente en el lado de la MS, respecto a la respuesta de la BS ($T2$), a partir de que ésta recibe la solicitud, la procesa y envía en el próximo MAPA definiremos a $T2$ como un valor constante. Sumando solamente el valor teórico calculado de acuerdo con [F4.2] ya que no está implementado el envío de mensajes a través de la capa física.

También, en la figura 5.1 podemos ver una gráfica que muestra los retardos sufridos por paquetes FTP que son tratados como BE tal como se ha indicado que son tratados los mensajes. La gráfica muestra el número de nodos contra el tiempo de retardo y vemos cómo entre más nodos, mayor es el retardo como era de suponer.

Ahora sí con la propuesta realizada, referente a los tiempos, donde:

$$TT = TM + TP + T4$$

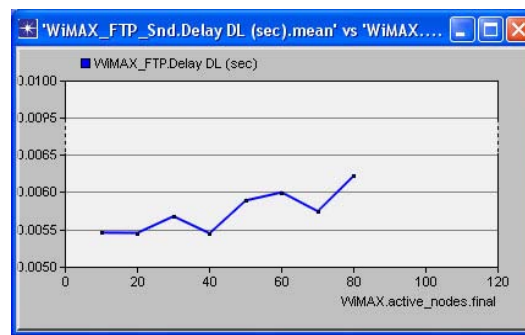


Figura 5.1. Delay BE

Dado que solo estamos tomando en cuenta el retardo producido por el procesado de los mensajes, no es necesario tomar en cuenta el retardo de propagación. Basados en este contexto podemos observar de la figura 5.1 que si evitamos el encolamiento de los mensajes críticos, de solicitud de ancho de banda, es decir, que éstos sean enviados con prioridad sobre el resto de los paquetes ya sea poniéndolos sobre los mensajes más próximos a ser atendidos en la cola o creando una cola especial que sea atendida en

primer lugar cuando una concesión sea recibida podemos obtener reducciones cercanas a los 5ms.

5.3 Activación del mecanismo

La razón de contar con un mecanismo de handover en una red inalámbrica no es sólo por cuestiones de movilidad. Como ejemplo podemos tomar el que una estación fija puede ser objeto de un handover si el uso de recursos de la BS crece demasiado, en este caso se puede implementar un procedimiento que se apoye del mecanismo de HO para liberar recursos y poder proveer mejor servicio e incluso poder aceptar más usuarios móviles o fijos que no tengan acceso a otra estación base. Sin embargo, nuestro interés se centra en realizar el *handover* por cuestiones de movilidad.

Una forma de determinar cuando es necesario realizar un handover es la medición de la calidad de la señal, para esto el SNR es un buen indicador. El SNR puede ser medido tanto en el *uplink* como en el *downlink*, en nuestro caso nos interesan solamente las mediciones de *downlink* ya que es la MS quien ha de comenzar el proceso de *handoff*.

Por lo anterior se definió como valor de activación para el mecanismo de HO que existiera una diferencia mayor a 6dB entre la señal de la BS servidora y la BS candidata destino.



Figura 5.2. Señal recibida de las 3 BS

En la gráfica de la figura 5.2 se muestra en tono más fuerte el nivel de señal que la MS mantiene con la que en ese momento es su BS servidora. Refiriéndonos al escenario 1,

figura 4.5, en primer lugar observemos cómo la forma de la curva en rojo crece al principio cuando la MS se aproxima a la BS y cuando esta comienza a alejarse la señal comienza a disminuir. También podemos apreciar cerca del segundo 97 la diferencia entre el SNR de la BS servidora y una de las BS vecinas es mayor a 6dB lo que determinaría que es el momento de activar el mecanismo de HO, pues así lo establecimos.

5.4 Proceso de escaneo

El proceso de escaneo como se mencionó en el capítulo anterior es un proceso que se repite continuamente y sin duda es un paso esencial para determinar la activación del mecanismo de handover. Durante éste, la MS solicita a su BS servidora un periodo para sondear la calidad de la señal que recibe de las BS vecinas. En este punto la MS indica el número de BS a escanear, el intervalo entre escaneos y el número de escaneos a realizar. La BS servidora responde dando un informe que incluye el período de escaneo.

En la figura 5.3 se muestra un diagrama del mecanismo que se propone en el presente trabajo, los puntos corresponden con los de la sección 4.9, especificando con más detalle el proceso de escaneo que describe el planteamiento.

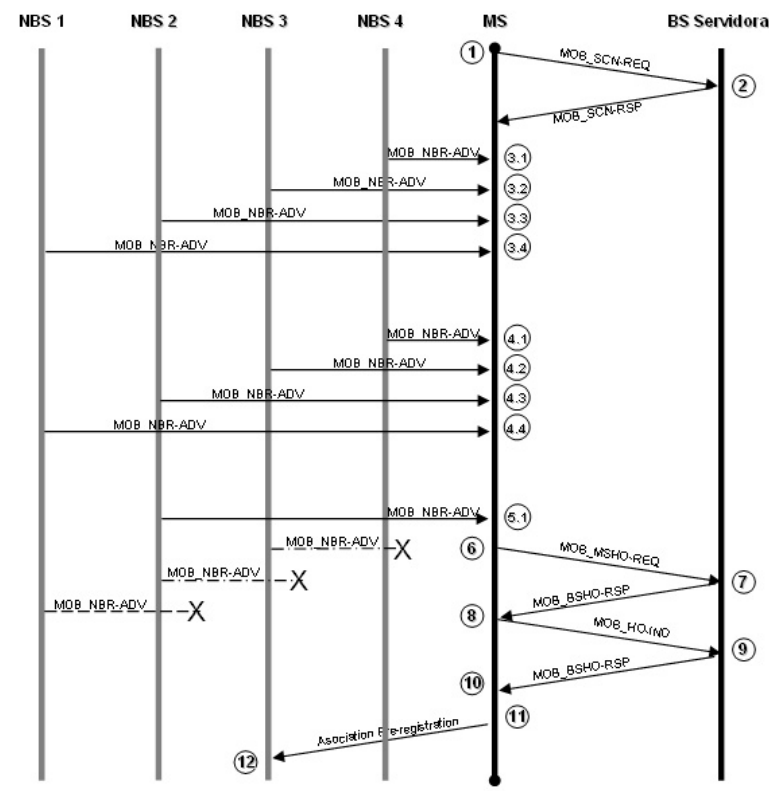


Figura 5.3. Mecanismo de HO propuesto

Lo que se plantea es intentar predecir cuál es la tendencia de la trayectoria para reducir el tiempo en que se inicie el mecanismo de HO al truncar el proceso de escaneo. Para esto, se creará una tabla que lleve el registro de los SNR de cada BS vecina y si se detecta que en más de tres ocasiones el SNR de alguna ha crecido constantemente, es muy probable que nos estemos acercando a ésta. Así, cuando se llegue el momento de realizar el handover se escaneara en primer lugar la BS vecina con mayor probabilidad debido a su tendencia y si su nivel de SNR es mayor, entonces se cancelará el proceso de escaneo y se iniciará inmediatamente el mecanismo de HO. En caso de haber dos BS que muestren el mismo comportamiento de crecimiento, siempre se tomará la que ofrezca una mejor señal, la estructura definida para esto se muestra en la tabla 5.1 y tabla 5.2.

Registro de una BS		
BS_scanning_record	double BS_id;	Identificador de la BS
	int is_major_count;	Número de mediciones de crecimiento continuo
	double SNR[5];	Registro de las 5 últimas mediciones

Tabla 5.1. Estructura para una BS

Registro de escaneo para las BS		
BS_scanning_record	BS_scanning_record candidate[10];	Registro que soporta hasta 10 BS
	int num_candidates;	Número de registros (BS)
	int n_medicion;	Número de mediciones realizadas para controlar el limite de 5

Tabla 5.2. Estructura general de escaneo

En este caso solo se guardan los 5 últimos registros de cada BS. El mecanismo propuesto se muestra en la figura 5.3.

Tomando en cuenta que en un principio se asigna un tiempo de escaneo fijo definido en número de *frames*. En el modelo se establecen previamente algunos parámetros que están relacionados con el escaneo. Los parámetros de escaneo pertenecen a los parámetros de movilidad, en la tabla 5.3 se muestran una definición de estos y en la tabla 5.4 los valores usados en el modelo para la mayoría de las simulaciones.

Parámetro	Función
Scanning Threshold (dB)	Dado en decibeles, cuando el nivel de la señal este por debajo de este valor la MS escaneará las BS vecinas.
Scan Duration (Frames)	Tiempo en <i>frames</i> que la MS escanea las BS vecinas.
Interleaving Interval (Frames)	Duración en <i>frames</i> entre un escaneo y otro, dentro del modo de escaneo [6.3.22.1.2, IEEE Std 802.16e-2005]
Scan Iterations	Número de intervalos de escaneo e <i>interleaving</i> durante el modo de escaneo.

Tabla 5.3. Parámetros de escaneo

Parámetro	Valor
Scanning Threshold (dB)	26dB
Scan Duration (Frames)	3
Interleaving Interval (Frames)	255Frames = 1.275segundos
Scan Iterations	5

Tabla 5.4. Valores usados para escaneo

En nuestro caso la duración de un *frame* es de 5ms que es la que corresponde a la configuración de OFDM de nuestro escenario, en la siguiente sección se muestran los resultados obtenidos.

5.5 Modelo de propagación

Como preámbulo hay que realizar unas consideraciones adicionales previas que afectan el desempeño general en un ambiente inalámbrico. Por lo que se dará una breve introducción al funcionamiento del modelo de propagación disponible en *OPNET Modeler*, que puede ser comparado con el modelo presentado en el apéndice B.

Para cada MS en un ambiente inalámbrico como el de WiMAX, es necesario definir el modelo que se aplica sobre el canal establecido entre el transmisor de una MS y el receptor de una BS. El modelo de canal especificado aplica tanto en las transmisiones *uplink* como en las de *downlink*. Cuando la MS cambia su conexión de una BS a otra después del handover, mantiene el modelo de canal que tenía en su anterior conexión.

Para el modelo de propagación se dispone de un atributo que define la ganancia de una antena en el que se puede establecer un valor en decibeles (dB) que está predeterminado en **-1dB** que es el usado a lo largo de todas las simulaciones, pero también se puede usar un valor predefinido denominado modelo de antena (**Antenna Model**) definido con una ganancia de **14dBi** que establece un comportamiento para equipos receptores con ganancia.

Antenna Gain. La ganancia de antena está definida como la razón entre la intensidad de la radiación en una dirección dada y la intensidad de la radiación obtenida al emitir con el mismo nivel de radiación en todas las direcciones.

Además de esto tenemos el *multipath* (definido en la sección 3.3.3), para modelar las múltiples trayectorias sufridas por la señal en un canal, y un atributo *pathloss* que define el ambiente de operación y sirve para modelar el *pathloss* que será aplicado a las señales que son recibidas por la MS. Cada modelo de *pathloss* es apropiado para cierto tipo de

ambiente, a través del cual la señal se propaga antes de llegar al receptor, en la tabla 5.5 se muestran los tipos disponibles.

Pathloss. Es la pérdida de potencia de una señal que se propaga a través del aire, expresada en decibeles (db). El pathloss depende de la distancia entre el transmisor y el receptor, los obstáculos que existan entre estos y la altura de la antena [21].

Modelo	Descripción
Free Space	Representa la propagación de una señal en espacio abierto y sin efectos ambientales.
Suburban Fixed (Erceg)	Para propagación en áreas urbanas con ambientes simples.
Pedestrian Environment	Modelo de propagación que representa el efecto que sufre un receptor móvil sometido a condiciones de desplazamiento de un peatón.
Vehicular Environment	Efecto sobre la propagación de la señal a velocidades vehiculares.

Tabla 5.5. Modelos de pathloss

En la tabla 5.6 se muestran las características para el modelo de *multipath* disponible en el *Modeler*.

<i>Multipath</i> [22]	A	B
ITU Pedestre	Hasta 3 km/h	Hasta 10 km/h
Cobertura	40km ²	
ITU Vehicular	Hasta 30 km/h	Hasta 120 km/h
Cobertura	150km ²	

Tabla 5.6. Modelos *multipath*

Para conocer el comportamiento de los modelos de propagación disponibles en WiMAX para los ambientes vehiculares, se realizaron dos pruebas. En ambas una MS se mueve a una velocidad de alrededor de 30km/h.

Para *Pathloss* se utilizó el **Modelo Vehicular** con un *multipath channel* **ITU Vehicular A**, ya que con el ITU Vehicular B se obtuvieron los mismos resultados debido a la velocidad que se maneja. El desplazamiento se realiza a lo largo de una sola BS por lo que no se realiza ningún handover, se siguió una trayectoria horizontal de extremo a extremo cubriendo el diámetro de una sola BS a velocidad constante, por lo que al inicio la MS se aproxima a la BS una vez que llega a ésta, continua su trayectoria hasta llegar al extremo opuesto de la celda.

Una de las pruebas sirvió para conocer el comportamiento de la antena, para lo cual se usaron valores de *Antena Gain* de **-1dB** y otro para el valor predeterminado de **Antenna Model** de **14dBi**. En ésta se realizan escaneos durante toda la simulación para ambos casos; usando periodos de 128 escaneos (el valor máximo permitido en el estándar es de 255) con un *interleaving* de 20 frames (100ms), un *scan iterations* de 50 y un *threshold* de 40dB. Las gráficas de la figura 5.4 y figura 5.5. revelan el comportamiento descrito por cada uno durante la transmisión de tráfico continuo sobre una sola BS.

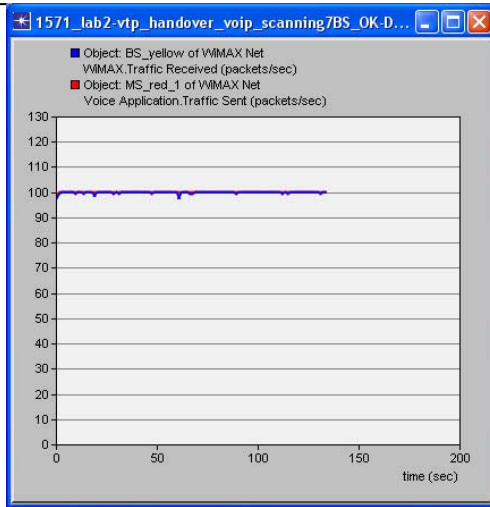


Figura 5.4. Antenna Gain = -1

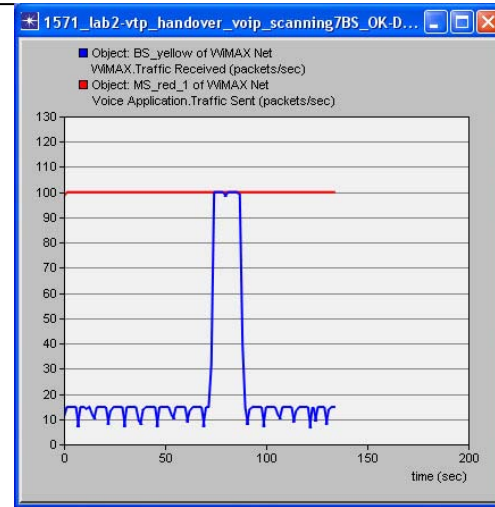


Figura 5.5. Modelo de antena = 14dBi

La gráfica muestra paquetes perdidos contra tiempo, a la izquierda se muestra el resultado con *Antenna Model = 14dBi* y a la derecha con *Antenna Gain = -1dB*. En ambos casos se muestra en rojo los paquetes enviados por la MS y en azul los recibidos en la BS. En la gráfica de la derecha se aprecia una disminución significativa en la recepción de paquetes excepto en los momentos en que la MS se encuentra cerca de la BS cuando la calidad de la señal es mejor, esto es debido tanto al efecto *multipath*, propio de ambientes móviles, como a la ejecución de los periodos de escaneo y la ganancia de la antena. Mientras que en la gráfica de la izquierda vemos un comportamiento muy parecido entre el envío y la recepción de los paquetes, esto se debe a que el modelo de antena de 14dBi es menos susceptible a los efectos *multipath* debido a la ganancia.

La segunda prueba sirvió para conocer el comportamiento del proceso de escaneo, para determinar los valores más apropiados para las simulaciones. Se examinaron dos esquemas, en ambos se usó *Antenna Gain = -1*.

De acuerdo a los resultados obtenidos en la prueba anterior. Para el primero se establecieron periodos de 255 escaneos, con un *interleaving* de 255 frames (1.275s), un scan iteration de 10 y un *threshold* de 40dB. Y para el segundo, periodos de 3 escaneos, con un *interleaving* de 255 frames, un scan iteration de 5 y un *threshold* de 26dB.

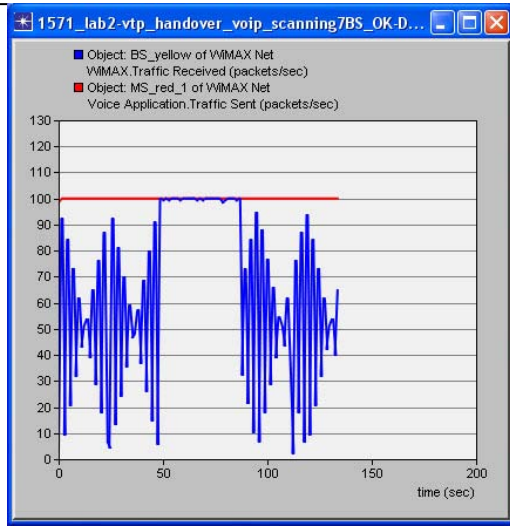


Figura 5.6. Escaneo

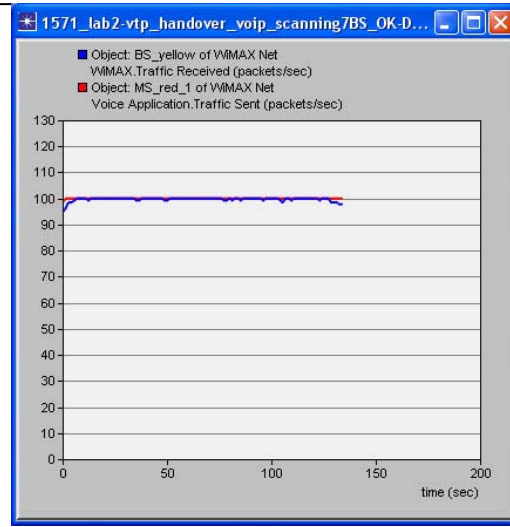


Figura 5.7. Análisis de los parámetros de escaneo

Por los resultados de las figuras anteriores vemos que realizar un número de escaneos grande afecta la transmisión de paquetes, figura 5.6. Mientras que en la figura 5.7 se puede apreciar que el número de paquetes perdidos disminuye en gran manera al realizar menos escaneos. Por lo que es mejor realizar un número de escaneos pequeño buscando que sólo sean realizados cuando se está en los bordes de la celda, lo que es indicado por mediciones bajas en el nivel de la señal.

De acuerdo a los resultados obtenidos, en las simulaciones posteriores se utilizará para el modelo de propagación, un *Pathloss Vehicular* con un *multipath channel ITU Vehicular A* y un *Antenna Gain* de **-1dB** ya que determina un resultado más realista. Y para los escaneos los parámetros variarán para mostrar mejor el comportamiento del mecanismo de *handoff*.

5.6 Análisis de la implementación del mecanismo de handover

En primer lugar, como se ha mencionado anteriormente no es recomendable realizar escaneos durante todo el proceso de conexión, ya que esto afecta el desempeño en el envío de paquetes, así como también el rendimiento de la batería, por lo que basta con definir un patrón que determine los puntos en que es necesario realizarlos para minimizar la afectación sobre el desempeño de la red.

En este caso se definieron 12 escaneos, un *interleaving* de 255 *frames*, un *scan iteration* de 5 y un *threshold* de 35dB, así sólo se realizarán escaneos cuando el SNR esté por debajo de los 35dB.

Por su parte, la implementación de la mejora propuesta requiere recursos adicionales en cuanto a memoria por las estructuras requeridas para llevar el registro y poder realizar la predicción que ayuda a mejorar el rendimiento. Sin embargo como veremos más adelante se obtiene una mejora en el inicio del proceso de *handoff*.

Podemos notar en primer lugar al reducir el proceso de escaneo cuando se encuentra una BS que provea una mejor señal, eliminando así la realización de escaneos que ayudan a incrementar el retardo en el handover y a la pérdida de paquetes como ya se ha demostrado. En este caso se obtuvo una mejora, con la reducción de tiempos en el inicio del proceso de 5.0ms por cada BS no escaneada (que corresponde a la duración de un *frame*), como se muestra en la figura 5.8 y figura 5.9.

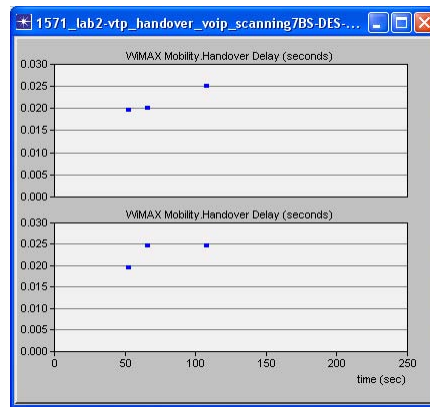


Figura 5.8. Comparativa delay de handover

En la figura 5.9 que muestra una comparativa del tiempo de inicio del proceso de Ranging durante el handover, la gráfica superior es con el mecanismo activado mientras que la inferior con el mecanismo desactivado. Aquí se puede apreciar el beneficio logrado en la ejecución del ranging realizado durante el handover. Podemos ver reflejada la mejora lograda en la reducción del retardo de handover.

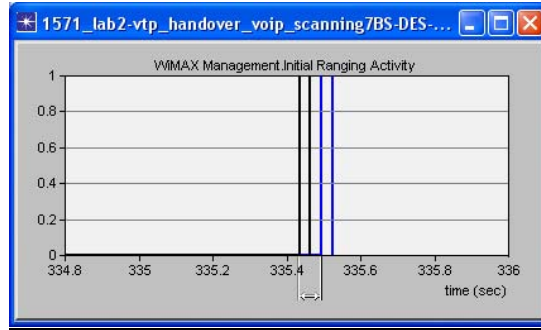


Figura 5.9. Inicio del proceso de Ranging durante el handover

En la figura 5.9 se muestra en azul la activación del mecanismo sin la implementación en el segundo **335.4912** y en negro el comportamiento una vez realizada la implementación en el segundo **335.4315**. Después de varias pruebas se observó que se obtiene en promedio una mejora similar en cada caso. Así podemos observar que dicha mejora ofrece una anticipación de aproximadamente **59.7ms**, en los que no se pierden paquetes debido a los escaneos.

Habiendo obtenido el resultado de mejora del tiempo de inicio del *handoff*, se procede a comprobar el efecto que el mecanismo tiene sobre el tráfico, para este caso una MS realiza un recorrido siguiendo la trayectoria indicada por la flecha amarilla de acuerdo con el escenario 1 de la figura 4.5.



Figura 5.10. Trafico enviado y recibido

En la prueba realizada para ver el efecto que la implementación produce sobre el flujo de datos, mostrando el comportamiento durante el intercambio de datos para tráfico continuo, con la finalidad de apreciar la pérdida de paquetes durante el handover. En la gráfica de la figura 5.10 se muestra el resultado obtenido para esta prueba.

Como se observa se inicia con un tráfico continuo línea verde tráfico enviado por la MS_red_1, las líneas roja y azul indican el tráfico recibido por la BS servidora en ese momento, al principio la BS_red y una vez realizado el handover la conexión cambia a la BS_blue. Y como se aprecia, durante el handover se produce una disminución en la recepción de paquetes correspondiente al 68% de un paquete como se muestra en la figura 5.11, lo que equivale aproximadamente a 0.8Kbits incluyendo encabezados.

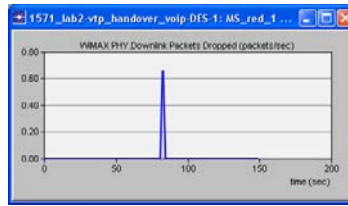


Figura 5.11. Paquetes perdidos

Como última prueba para el mecanismo propuesto se crea un escenario mayor mostrado en la figura 5.12, en esta figura se identifica cada BS por su nombre indicando el índice que le corresponde como referencia para las gráficas de resultados que serán obtenidas. La velocidad del nodo se incrementa a 60km/h.

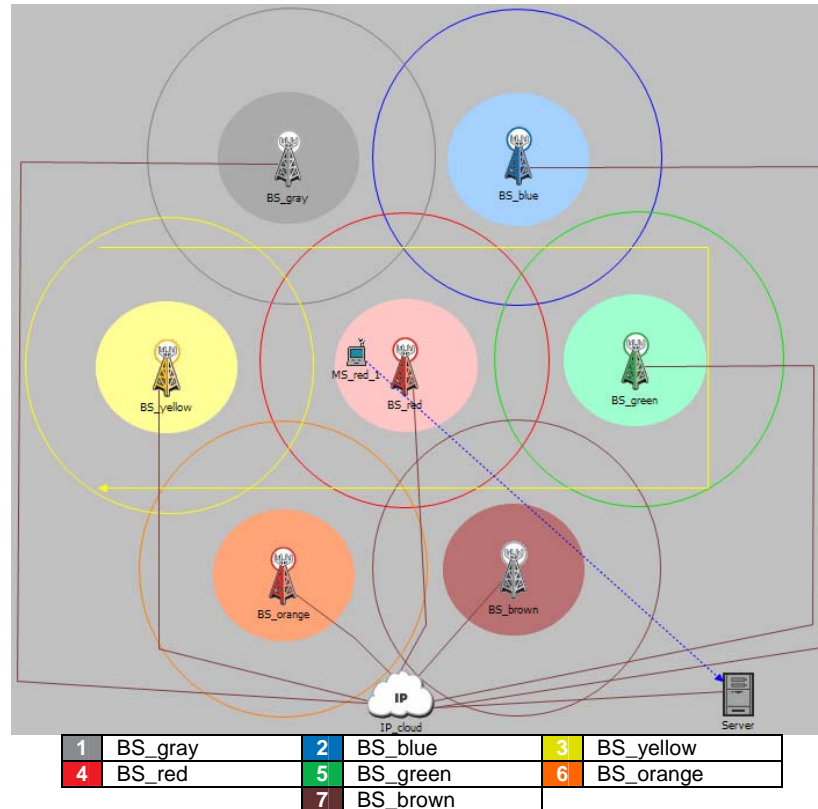
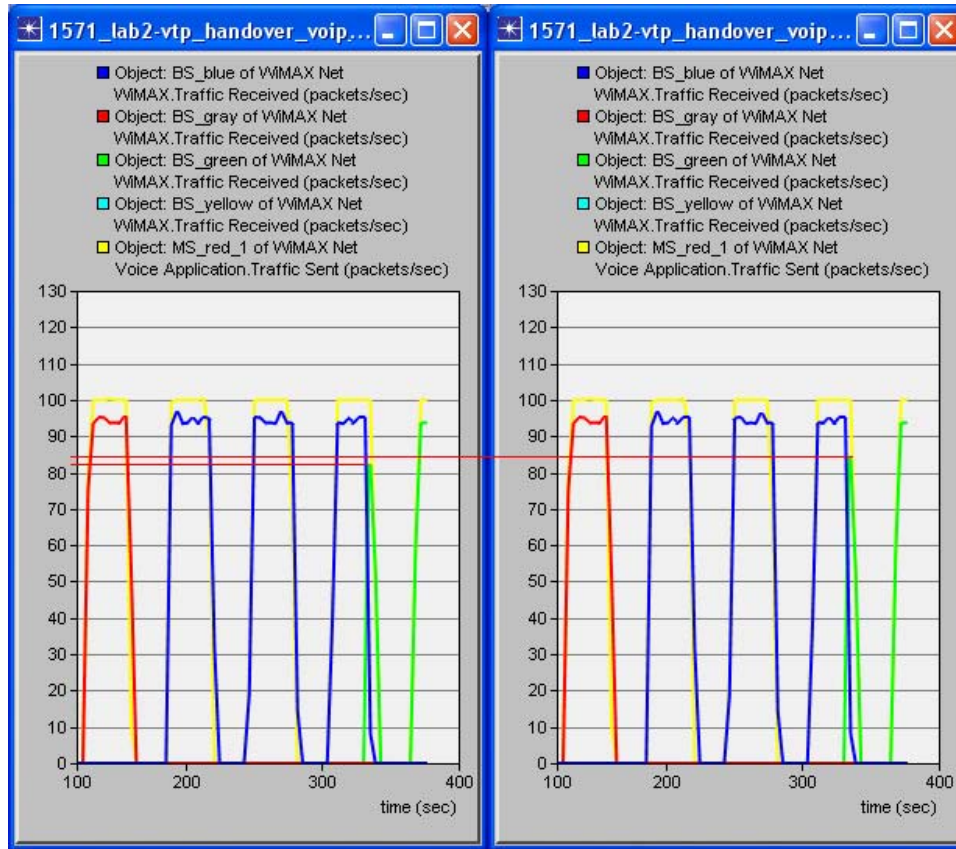


Figura 5.12. Escenario para escaneos y desempeño del mecanismo de *handoff*

Si bien para obtener los resultados de la sección anterior se requiere recursos adicionales en aspectos de memoria durante la simulación es notable que el tráfico no se ve severamente afectado en cuanto a la anticipación del proceso de *handoff*, a diferencia del beneficio que se puede apreciar en la figura 5.13 con respecto al efecto que tiene el mismo mecanismo sobre la transmisión-recepción de tráfico de voz en un ambiente un tanto más completo.

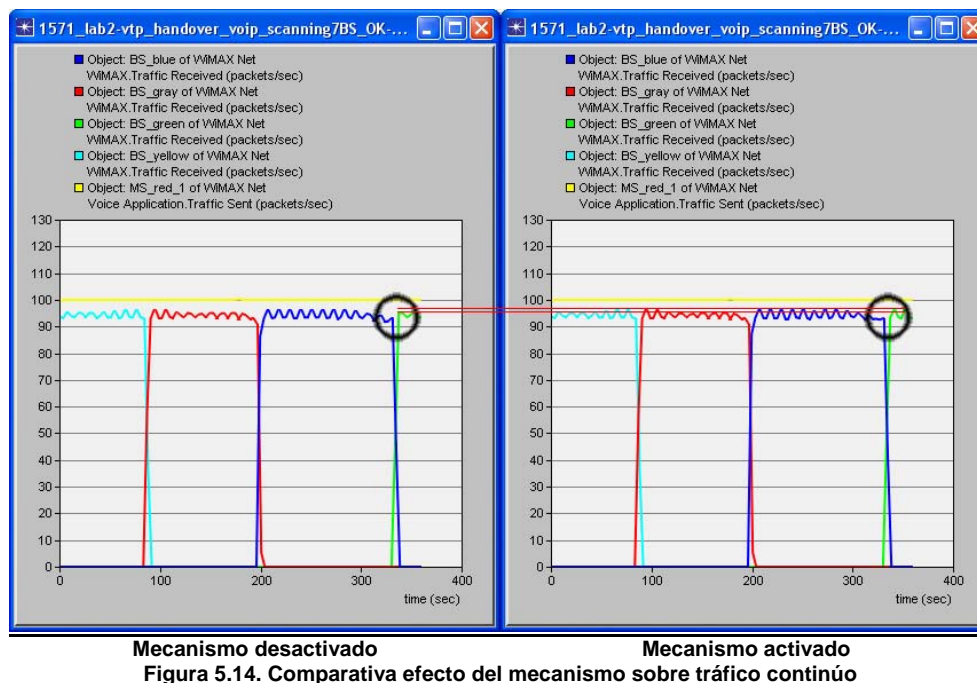


Mecanismo activado Mecanismo desactivado
 Figura 5.13. Comparativa efecto del mecanismo sobre tráfico de voz

En la figura 5.13, la gráfica de la izquierda representa el comportamiento de tráfico de voz con el mecanismo desactivado y a la derecha se muestra con el mecanismo activado. Entre las dos se aprecia una pequeña diferencia mostrada por las líneas rojas horizontales en donde se ve que con el mecanismo activado hay un pequeño incremento en el número de paquetes recibidos por la BS.

En la figura 5.14 se muestra el tráfico enviado por la MS_red_1 y el recibido por cada BS a la que se conecta, en la gráfica de la izquierda se muestra el resultado con el

mecanismo desactivado y a la derecha el mecanismo activado y encerrada en un círculo la parte en ambas gráficas donde se aprecia el mayor efecto debido al mecanismo.



Mecanismo desactivado Mecanismo activado

Figura 5.14. Comparativa efecto del mecanismo sobre tráfico continuo

Las pruebas realizadas hasta ahora no reflejan el comportamiento completo del handover ya que sólo se está probando el mecanismo a nivel de enlace MAC y físico. Así aunque se realiza exitosamente el proceso de handover este no se efectúa totalmente pues es necesario completar el proceso con el reingreso a la red, para esto se hará uso de la implementación de **Mobile IP** que se encuentra en el *OPNET Modeler*.

5.7 Mobile IP

Como se ha mencionado anteriormente, parte del proceso de *handoff* consiste en el reingreso a la red. En las pruebas anteriores, se hace un enfoque sobre la capa MAC y física, en esta sección se mostrarán los resultados obtenidos sobre las pruebas hechas incluyendo **Mobile IP**.

Para incorporar **Mobile IP** al comportamiento de nuestros nodos, (MS y BS), se usó el escenario 2 (ver figura 5.12), y se realizaron cambios en la configuración en la MS para soportar el protocolo de **Mobile IP** y en las BS por su parte para que la BS_yellow actuará como *Home Agent* y como BS servidora en primer lugar, mientras que el resto fungiera

como *Foreign Agent*. Dentro de los cambios realizados se asignaron direcciones IP a cada BS tanto para su conexión interna (MS conectadas a ella) como externa (Backbone o nube IP), la IP asignada a la MS (Home Address) corresponde a la de su conexión con la BS_yellow que es su BS servidora en un principio y en consecuencia su *Home Agent*.

Para las simulaciones la MS siguió la misma trayectoria del escenario. Transfiriendo la conexión a cada BS mediante la creación de túneles para el envío de los paquetes. En la figura 5.15 vemos tres gráficas, la superior indica el tráfico de voz enviado por la MS, la gráfica inferior indica con que BS tiene establecida una conexión en cada momento de acuerdo con las relaciones de la figura 5.12 y finalmente la gráfica central muestra el tráfico recibido por cada *Foreign Agent* a través del túnel.

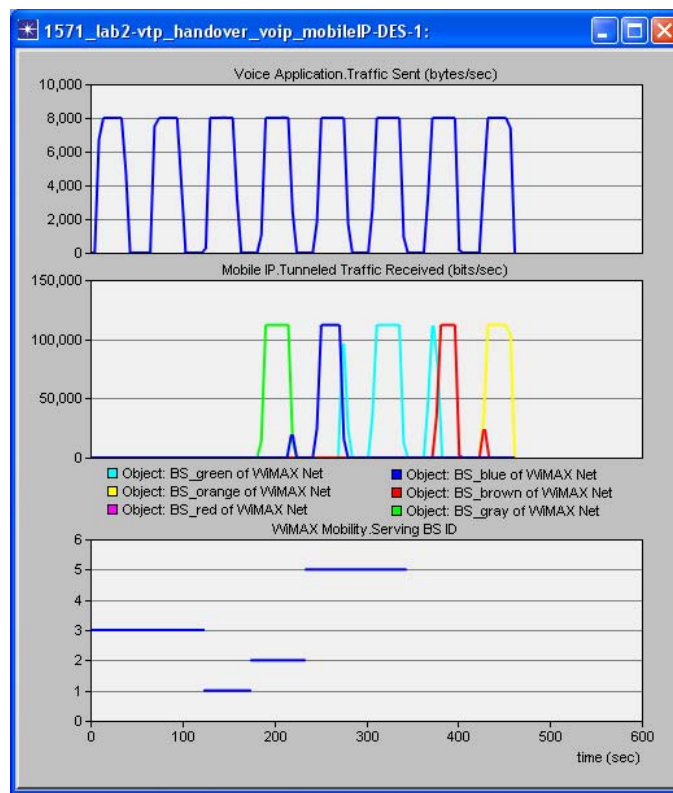


Figura 5.15. Tráfico y Movilidad con *Mobile IP*

En las gráficas de la figura 5.16 se muestra con más detalle el flujo de tráfico a través de cada uno de los *Foreign Agents* para el tráfico generado por la MS_red_1. En la primera gráfica se muestra el tráfico enviado a través de un túnel creado por *Mobile IP*; como se aprecia, el túnel se crea alrededor de los 180 segundos después del primer HO donde la MS pierde conectividad con su *Home Agent* antes de eso el tráfico le es enviado directamente por su *Home Agent*.

Una vez que la MS pierde conectividad con su *Home Agent* el tráfico es enviado a los *Foreign Agents* a través del túnel conforme la MS va estableciendo conexiones con cada uno de estos. Las gráficas hacen referencia a la gráfica 2 la figura 5.15 en orden descendente corresponden en primer lugar a la *Home Agent* (BS_yellow), BS_gray, BS_blue, BS_red, BS_green, BS_orange y BS_brown. Aquí se ve el tráfico enviado por el túnel y en detalle como es recibido por cada *Foreign Agent* a través del mismo túnel de acuerdo a la conexión que la MS tiene establecida en cada momento. Por ejemplo, vemos que la MS tiene una conexión con la BS_green (BS5) del segundo 180 al segundo 280 aproximadamente, correspondiente a la gráfica 5 en la figura 5.16, durante ese tiempo ésta actúa como *Foreign Agent* recibiendo tráfico por el túnel.

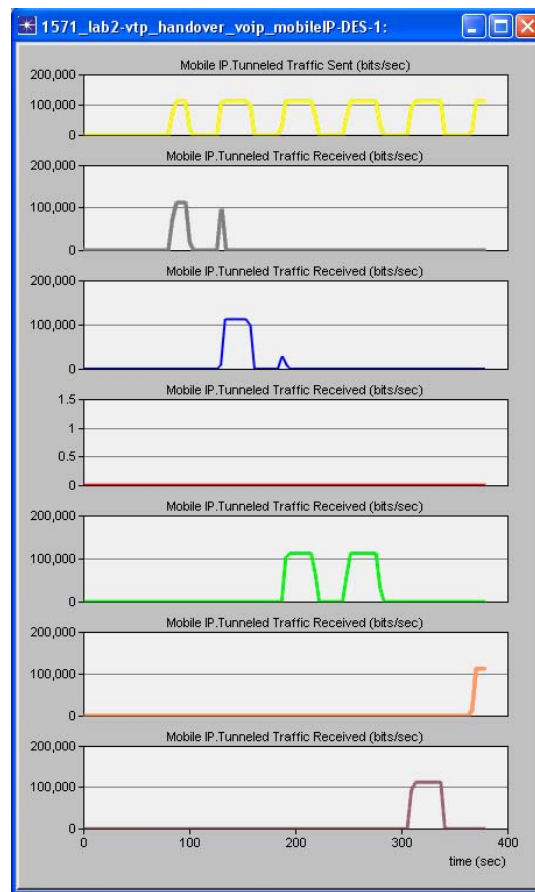


Figura 5.16. Tráfico enviado por Túneles de *Mobile IP*

Estos resultados muestran la cantidad de tráfico que el *Home Agent* envía a través del túnel comparado con la cantidad de tráfico que cada *Foreign Agent* recibe.

Al igual que en las pruebas del mecanismo de *handoff*, el tráfico de voz tuvo que modificarse para transmitir paquetes de manera continua sin interrupciones de modo que

se pudieran apreciar mejor las pérdidas de paquetes durante el proceso de handover en un escenario con *Mobile IP*, los resultados se muestran en la figura 5.17, en la gráfica superior se ve la transmisión de tráfico continuo, en la gráfica central se aprecia quien realiza la transmisión de los paquetes en cada momento y la inferior con quien mantiene conexión la MS de acuerdo con las correspondencias de la figura 5.12.

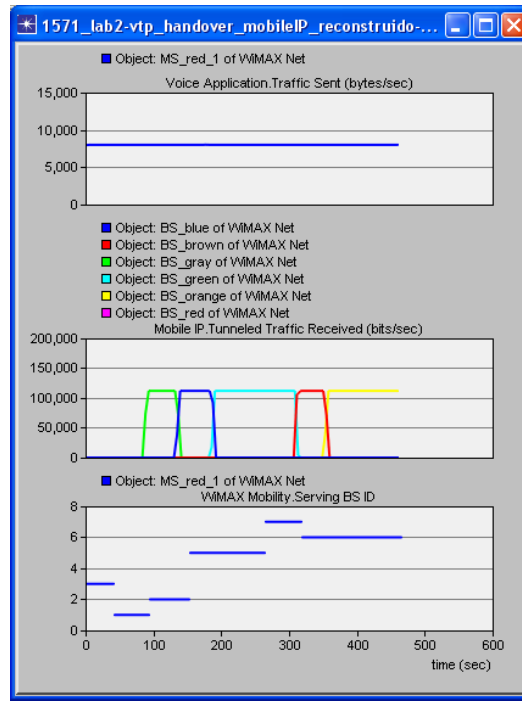


Figura 5.17. *Mobile IP* con tráfico continuo

Para el escenario de *Mobile IP* con tráfico continuo, vemos un comportamiento similar al de la figura 5.15 donde se ve que el tráfico es canalizado a uno de los *Foreign Agent* a través del túnel a medida que la MS se va desplazando realizando los handover correspondientes.

Por último, se realizó una prueba sobre el escenario anterior con tráfico continuo, para comprobar el comportamiento de pérdida de paquetes al integrar el mecanismo de handover propuesto con *Mobile IP*.

A continuación observamos el número de paquetes perdidos en este caso, en la figura 5.18 se uso un escenario normal con *Mobile IP* y el proceso de escaneo simple, mientras que en la y figura 5.19 se realizó la misma prueba con el mecanismo de *handoff* propuesto activado.

En ambos casos se realizaron 5 escaneos, *interleaving* de 255 frames, *scan iterations* de 5 y un *threshold* de 35dB observamos que la pérdida de paquetes se redujo del 64% al 44%.

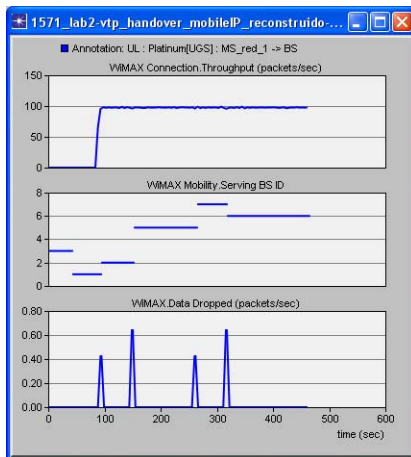


Figura 5.18. Pérdida de paquetes con tráfico continuo con *Mobile IP* y mecanismo de HO activado

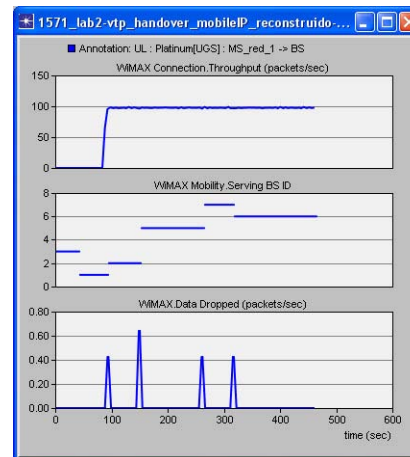


Figura 5.19. Pérdida de paquetes con tráfico continuo considerando el mecanismo de HO propuesto

Los resultados de la figura 16 muestran que con *Mobile IP* la pérdida de paquetes no es mayor al 70% mientras que con el mecanismo activado se producen menos pérdidas cuando el número de escaneos es grande.

5.8 Conclusiones

Como vimos en este capítulo a través del análisis de los resultados obtenidos. Con la implementación del mecanismo de handover mediante la predicción de mejor candidata, se aprecia una mejora cuando se disminuye el tiempo de escaneo, reduciendo la pérdida de paquetes. Esto debido a que durante el proceso de escaneo se pierden paquetes y dado que no se realiza completo el proceso de escaneo, el número de paquetes perdidos disminuye, esta disminución varía de acuerdo a la configuración de los parámetros de escaneo.

Para establecer un número de escaneos óptimo, es necesario determinar un valor de SNR para *threshold* adecuado. Este valor no se puede generalizar debido a que el comportamiento puede ser muy diferente de una BS a otra debido a las condiciones ambientales y demás.

Vemos también que aunque el proceso no siempre tiene la misma duración, la activación del mecanismo requiere menos tiempo para.

También se observa que **Mobile IP** se obtiene el comportamiento esperado al lograr enviar el tráfico al destinatario sin importar su ubicación.

Por otra parte, debido a que no es posible probar la mejora que se puede lograr con el mecanismo propuesto al modificar el envío de los mensajes con una prioridad más alta, debido a la falta de soporte en capa física para el envío de mensajes, el estudio en este sentido no se pudo completar como se esperaba, no obstante, alguien podrá realizar el trabajo más adelante una vez este disponible esta característica en el modelo.

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES

6.1 Conclusiones

Tomando en cuenta que el modelo de WiMAX en OPNET *Modeler* se encuentra todavía en desarrollo y hay funcionalidades que aún no se han implementado o su implementación es incompleta.

Ya sea que los mensajes sean puestos al inicio de la cola para ser atendidos lo casi inmediatamente o que se cree una cola especialmente para mensajes de HO para que así no tengan que competir contra el resto de paquetes de datos. Obtendríamos una mejora de T1 de 5.5ms para el caso de 20 MS o incluso poco más de 6ms en el caso de 80MS.

Por otra parte, en el caso de reducir el número de escaneos realizados al predecir la tendencia de la trayectoria, solo se logra un beneficio considerable en especial cuando el número de BS vecinas es grande.

Otro aspecto que debemos notar acerca del handover es la dependencia que hay entre el cambio de conexión físico y lógico ya que no es suficiente con tener un mecanismo en capa física que funcione perfectamente si el reingreso a la red finalmente no es lo suficientemente óptimo como para lograr un handover transparente para el usuario por lo que sería adecuado que existiera una comunicación entre ambas capas L2 y L3 (crosslayer) para que el mecanismo fuera lo más óptimo posible, quizá negociando una dirección IP aún antes de comenzar con el proceso de handover para que el ingreso a la red sea mucho más rápido.

Como hemos visto últimamente la tecnología ha ido evolucionando rápidamente para ajustarse a las crecientes necesidades por estar comunicados. Sin embargo, para lograr esto se han tenido que superar diferentes obstáculos, realizando innumerables estudios y pruebas muchos de los cuales no han sido viables. No obstante, estos trabajos han de servir como referencia para futuros estudios, indicando los caminos que no se deben seguir o incluso tratar de eliminar los obstáculos que se han presentado para hacer una propuesta que no ha sido lograda se haga posible.

Debido a que el handover es un proceso que opera en tres capas Física, MAC y RED es necesario acoplar las capas involucradas con el fin de lograr un mejor comportamiento del mecanismo de handover.

Los protocolos de Internet no fueron originalmente diseñados para el intercambio de información en tiempo real. Por lo que representa un gran reto la integración de tecnologías que requieren comunicación en tiempo real para aprovechar el enorme beneficio que estas redes ofrecen.

Finalmente como complemento al proceso de handover en un sistema inalámbrico el uso de Mobile IP es una buena propuesta para lograr ofrecer servicios VoIP de calidad.

6.2 Trabajos futuros

Usando la modulación adaptiva para que cada vez que se pase de un nivel mayor a uno menor se realice el escaneo de BS vecinas para saber si existe una que pueda proveer una mejor tasa de transferencia que la que provee la BS servidora actual. Este análisis no fue realizado debido a que en la versión de Modeler utilizada todavía no esta implementada esta funcionalidad.

Tomando en cuenta que en el estándar considera la modulación adaptiva, especificando distintos tipos de modulación que son brindados de acuerdo con la calidad de la señal recibida, es decir, entre mejor sea la calidad de la señal se puede usar una tasa de codificación mayor y entre menor la calidad de la señal, menor la tasa de codificación ya que es mas susceptible a interferencias. Sería conveniente considerar esto como forma de complementar el servicio de handover para no caer en una tasa transmisión baja. Es decir, se podría utilizar el proceso de escaneo para sondear si alguna de las BS vecinas puede proveer condiciones de transmisión iguales o incluso mejores, en los casos en que se detecte la necesidad de bajar la tasa de codificación. Pero en el modelo de OPNET utilizado aún no se encuentra implementada esta característica, se uso OPNET Modeler v14.0.

Se puede completar el modelo para realizar el proceso de HO completo implementando el envío de mensajes a través de la capa física.

Así como también es necesario realizar más investigaciones para complementar el trabajo de capa 3 mediante tecnologías como Mobile IP o ASN.

6.3 Nota final

La movilidad hoy en día se ha convertido en algo primordial, tanto es así, que se ha creado un campo de desarrollo específicamente para el estudio del handover. Por eso surge el estándar 802.21 que pretende estandarizar los procedimientos que deben seguir los mecanismos de handover para que exista la compatibilidad entre distintas tecnologías. El estándar 802.21 también denominado Media Independent Handover (MIH) plantea la coexistencia de distintas tecnologías inalámbricas (Handover Vertical) ampliando esta idea para crear una interoperabilidad entre redes heterogéneas.

APÉNDICE A

MODELO DE PROPAGACIÓN INALÁMBRICA EN AMBIENTES MÓVILES

A.1 Modelo de propagación para un canal inalámbrico móvil

Para un medio de comunicación inalámbrico la señal se propaga a través del espacio o aire. En el caso de WiMAX el medio de propagación es la interfaz aérea.

Al propagarse una señal, sufre efectos como atenuación, desvanecimiento, refracción, ruido, reflexión, interferencia, difracción, dispersión. Los factores que causan éstos efectos pueden ser la distancia entre el nodo emisor y el receptor, obstáculos entre ellos, características ambientales, entre otros. Debido a su naturaleza difícilmente predecible, las características ambientales son complejas de modelar. Sin embargo, existen modelos matemáticos basados en la teoría electromagnética que permiten realizar un modelado con cierto grado de precisión.

Los modelos de propagación definen las pérdidas en la calidad de la señal al ser transmitida en el medio.

A.2 Modelo de propagación vehicular

El modelo de propagación vehicular en el presente trabajo está basado en el M.1225 establecido por la ITU-R [22]. Usado en células grandes con potencias de transmisión altas. Aplicable a escenarios de zonas urbanas y suburbanas con construcciones de poca altura y uniformes. Está definido por el modelo siguiente.

$$L = 40(1 - 0.004h_{bs})\log_{10}(R) - 18\log_{10}(h_{bs}) + 21\log_{10}(f) + 80 \text{ (dB)}$$

Lo anterior determina las pérdidas en la calidad de la señal debido a los efectos que ésta puede sufrir. Donde la distancia R está dada en km, la frecuencia de la portadora f en MHz y h_{bs} es la altura de la BS en metros, medida a partir de la altura media de las construcciones.

A.3 Modelo de propagación pedestre

El modelo de propagación pedestre también basado en M.1225 de la ITU-R [22], especificado para células pequeñas y con baja potencia de transmisión, está definido por el siguiente modelo.

$$L = 40\log_{10}(R) + 30\log_{10}(f) + 49 \text{ (dB)}$$

Donde R es la distancia entre transmisor y receptor en km y f la frecuencia de la portadora en MHz. Este modelo es válido solamente para casos sin visibilidad directa (NLOS).

APÉNDICE B

PARTES DE CÓDIGO INDLUIDO EN EL MODELO DE OPNET

En esta sección se presentan fragmentos de código que fueron programados dentro de OPNET *Modeler* para poder implementar el modelo, estas modificaciones y adiciones se realizaron tanto en el plano de control como en los módulos de movilidad externos para el modelo WiMAX móvil. El código base es C con código Proto-C que define funciones específicas para OPNET.

Dentro de las modificaciones que se hicieron dentro del modelo para el proceso de *handoff* esta la mostrada en la figura 7.1, estas modificaciones se muestran subrayadas en color azul.

Dentro de la ejecutiva `collect_measurement` (circulo en azul) se agrego el siguiente código:

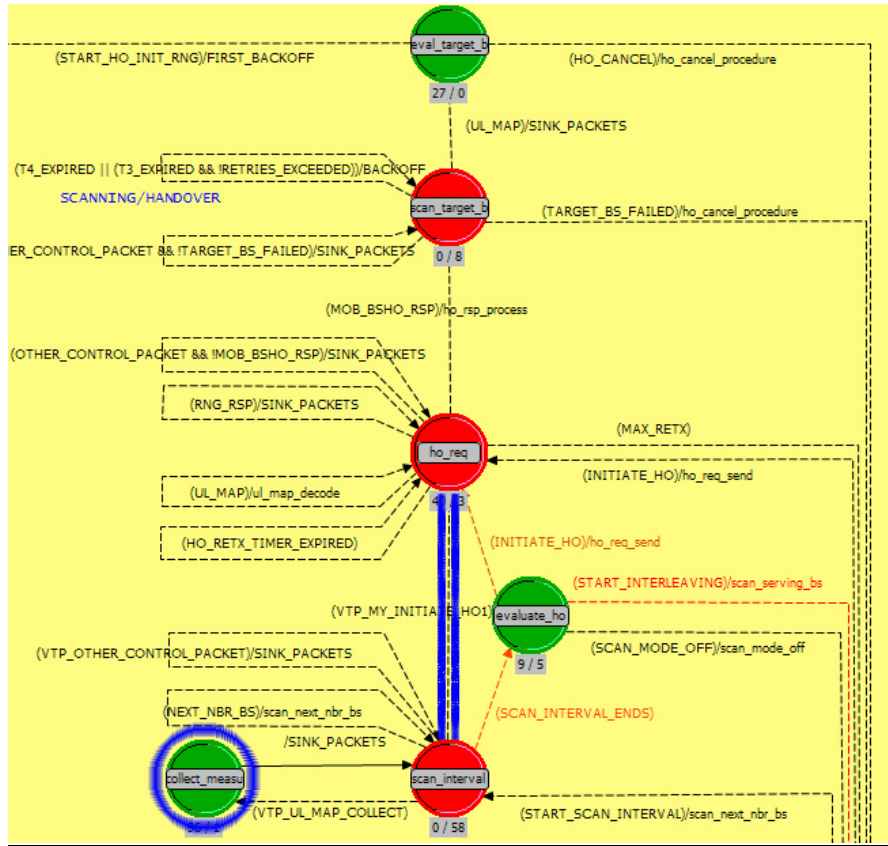


Figura 7.1. Modificaciones al Plano de control

B.1 Código en collect_measurement dentro del plano de control

```
// File: opnk_1571_wimax_support.h
#define CALCULATE_DISTANCE      (medir_distancia == 1)

// File: opnk_1571_wimax_ss_control.pr.m
// Control Plane

my_serving_bs_id = wimax_mob_scan_serving_bs_id_get (data_plane_config_ptr);

if(CALCULATE_DISTANCE)
{
    op_ima_obj_pos_get (2, &lat, &lat, &lat, &bs_x, &bs_y, &bs_z);
    // Serving BS[BS_blue]
    op_ima_obj_pos_get (my_node_objid, &lat, &lat, &lon, &ss_x, &ss_y, &ss_z);
    // Compute the distance between the nodes.
    dx = (double)(bs_x - ss_x);
    dy = (double)(bs_y - ss_y);
    dz = (double)(bs_z - ss_z);
    // Compute the square distance within the two nodes.
    distance = (double)sqrt((dx * dx) + (dy * dy) + (dz * dz));
    op_stat_write(ms_to_bs_distance, (float)distance);

    op_ima_obj_pos_get (7, &lat, &lat, &lat, &bs_x, &bs_y, &bs_z);
    // Serving BS[BS_red]
    op_ima_obj_pos_get (my_node_objid, &lat, &lat, &lon, &ss_x, &ss_y, &ss_z);
    // Compute the distance between the nodes.
    dx = (double)(bs_x - ss_x);
    dy = (double)(bs_y - ss_y);

```

```

dz = (double)(bs_z - ss_z);
// Compute the square distance within the two nodes.
distance = (double)sqrt((dx * dx) + (dy * dy) + (dz * dz));
op_stat_write(ms_to_bs_distance, (float)distance);

op_ima_obj_pos_get (8, &lat, &lat, &lat, &bs_x, &bs_y, &bs_z);
// Serving BS[BS_green]
op_ima_obj_pos_get (my_node_objid, &lat, &lat, &lon, &ss_x, &ss_y, &ss_z);
// Compute the distance between the nodes.
dx = (double)(bs_x - ss_x);
dy = (double)(bs_y - ss_y);
dz = (double)(bs_z - ss_z);
// Compute the square distance within the two nodes.
distance = (double)sqrt((dx * dx) + (dy * dy) + (dz * dz));
op_stat_write(ms_to_bs_distance, (float)distance);
}

/* Update the measurement for the neighbor BS being scanned. */
/* Handover is also evaluated here. */
my_start_handover_f = my_wimax_mob_scan_nbr_bs_measurement_update (data_plane_config_ptr, &candidate_bs_status, &MyVar);

```

B.2 Código en el módulo de movilidad

Para esto se tuvo que definir la estructura mostrada a continuación.

```

// File: opnk_1571_wimax_support.h
// Sort scanning structure

typedef struct sort_scanning
{
    int initialized;           // 0: Sin inicializar, 1: Inicializado
    int total_nbr;           // Numero total de BS vecinas
    int nbr_counter;         // BS escaneada en el intervalo actual
    double valor[10];        // Medicion de SNR para cada BS vecina
    int sorting[10];         // Orden para el escaneo de las BS vecinas
} sort_scanning;

```

Dentro del módulo de movilidad se trabajo sobre una copia de la función `wimax_mob_scan_nbr_bs_measurement_update` sobre la cual se realizaron las modificaciones necesarias, como se muestra a continuación.

```

// File: opnk_1571_wimax_mobility_support.ex.c

Boolean my_wimax_mob_scan_nbr_bs_measurement_update
(WimaxT_Data_Plane_Config* data_plane_config_ptr, sort_scanning* MyVar)
{
    WimaxT_Ms_Mobility_Config*      ms_mob_info_ptr;
    WimaxT_Ms_Scan_Module_Info*     ms_scan_module_ptr;
    WrlsT_Rx_State_Info*            rx_state_info_ptr;
    double                           value_measured;
    double                           serv_bs_value_measured;
    WimaxT_Nbr_Bs_Scan_List_Element* nbr_list_elem_ptr;
    WimaxT_Ms_Ho_Parameters*         ms_ho_module_ptr;
    int                               vtp_cntMyVar, vtp_s1, vtp_s2, vtp_swap, actual_scanning;
    double                           BS_SNR_values_bk[10];

    FIN (my_wimax_mob_scan_nbr_bs_measurement_update ());

    ms_mob_info_ptr = wimax_ms_mobility_config_get(data_plane_config_ptr);
    ms_scan_module_ptr = wimax_ms_scan_module_get(ms_mob_info_ptr);
    ms_ho_module_ptr = wimax_ms_ho_module_get(ms_mob_info_ptr);

    if(MyVar->total_nbr == 0) {MyVar->total_nbr=ms_scan_module_ptr->nbr_count; MyVar->nbr_counter = 0;}

```

```

if(MyVar->initialized == 0)
{
    for(vtp_s1=0; vtp_s1<10; vtp_s1++) *(MyVar->sorting+vtp_s1)=vtp_s1;
    MyVar->initialized = 1;
}

actual_scanning = ms_scan_module_ptr->nbr_currently_scanned_index;
ms_scan_module_ptr->nbr_currently_scanned_index = *(MyVar->sorting+MyVar->nbr_counter);

/* Obtain the NBR BS's CINR measurement. */
rx_state_info_ptr = wimax_sup_rx_state_from_data_plane_get(data_plane_config_ptr);

if(wimax_support_measurement_by_type_read (WimaxC_CINR, (int) rx_state_info_ptr->wrls_phy_info_ptr->group_id, \
    rx_state_info_ptr, &value_measured) == OPC_FALSE)
{
    FRET (OPC_FALSE);
}

nbr_list_elem_ptr = (WimaxT_Nbr_Bs_Scan_List_Element*) op_prg_list_access \
    (ms_scan_module_ptr->nbr_list_lptr, ms_scan_module_ptr->nbr_currently_scanned_index);
nbr_list_elem_ptr->measurement.time_average_value = value_measured;
nbr_list_elem_ptr->measurement.time_of_collection = op_sim_time ();

/* Read the latest Serving BS measurement. */
wimax_support_measurement_by_type_read (WimaxC_CINR, (int) ms_scan_module_ptr->servicing_bs_id, rx_state_info_ptr, \
    &serv_bs_value_measured);

/* Every time the MS enters scanning mode the NBR BS with */
/* the highest measurement is cleared assuming that all */
/* NBR BSs' measurements are about to be refresh. */

/* The NBR BS with the highest measurement is kept so in */
/* case the HO descision is taken after a serving BS */
/* measurement update there is no need for looping through */
/* the list of NBR BSs. */

/* If there is a NBR BS index stored already, then */
/* another NBR BS is already a HO candidate. */
if (ms_scan_module_ptr->nbr_candidate_list_index != WIMAXC_INVALID_VALUE)
{
    /* Evaluate which NBR BS is better. */
    if (ms_scan_module_ptr->nbr_candidate_measurement < value_measured)
    {
        ms_scan_module_ptr->nbr_candidate_list_index = ms_scan_module_ptr->nbr_currently_scanned_index;
        ms_scan_module_ptr->nbr_candidate_measurement = value_measured;
        ms_scan_module_ptr->nbr_candidate_id = *(nbr_list_elem_ptr->nbr_bs_info_ptr->nbr_info_ptr->bs_id_ptr);
    }
}
else
{
    /* No previous BS candidate has been selected. */
    /* Select this one. */
    ms_scan_module_ptr->nbr_candidate_list_index = ms_scan_module_ptr->nbr_currently_scanned_index;
    ms_scan_module_ptr->nbr_candidate_measurement = value_measured;
    ms_scan_module_ptr->nbr_candidate_id = *(nbr_list_elem_ptr->nbr_bs_info_ptr->nbr_info_ptr->bs_id_ptr);
}

/* Check if the current measure may trigger HO. */
if (value_measured - 6.0 > serv_bs_value_measured)
{
    /* Either this or a previous NBR has triggered HO. */
    ms_scan_module_ptr->start_handover = OPC_TRUE;
    MyVar->initialized=0;

    FRET (OPC_TRUE);
}

// Saving SNR measurements
*(MyVar->valor+actual_scanning) = value_measured;

```

```

if((MyVar->initialized) == 1 && *(MyVar->sorting+ms_scan_module_ptr->nbr_currently_scanned_index) == -1)
{
    *(MyVar->sorting+ms_scan_module_ptr->nbr_currently_scanned_index) = \
        ms_scan_module_ptr->nbr_currently_scanned_index;
}

vtp_cntMyVar=0;
if(MyVar->nbr_counter == MyVar->total_nbr-1)
{
    for(vtp_cntMyVar=0; vtp_cntMyVar < MyVar->total_nbr; vtp_cntMyVar++)
    {
        *(MyVar->sorting+vtp_cntMyVar) = vtp_cntMyVar;
        BS_SNR_values_bk[vtp_cntMyVar] = *(MyVar->valor+vtp_cntMyVar);
    }

    // Sorting BS according to its SNR level for future scannings
    for(vtp_s2=1; vtp_s2 < MyVar->total_nbr; vtp_s2++)
    {
        for(vtp_s1=0; vtp_s1 < MyVar->total_nbr-1; vtp_s1++)
        {
            if(BS_SNR_values_bk[vtp_s1] <= BS_SNR_values_bk[vtp_s1+1])
            {
                vtp_swap=*(MyVar->sorting+vtp_s1);
                *(MyVar->sorting+vtp_s1)=*(MyVar->sorting+vtp_s1+1);
                *(MyVar->sorting+vtp_s1+1)=vtp_swap;

                vtp_swap=BS_SNR_values_bk[vtp_s1];
                BS_SNR_values_bk[vtp_s1]=BS_SNR_values_bk[vtp_s1+1];
                BS_SNR_values_bk[vtp_s1+1]=vtp_swap;
            }
        }

        MyVar->nbr_counter = 0;
    }

    MyVar->nbr_counter++;

    // Restoring nbr_currently_scanned_index value
    ms_scan_module_ptr->nbr_currently_scanned_index = actual_scanning;

    FRET (OPC_FALSE);
}

```

GLOSARIO DE ACRÓNIMOS

3GPP	<i>(3rd Generation Partnership Project)</i> Acuerdo de colaboración para el proyecto de tercera generación
AAS	<i>(Advanced Antenna Systems)</i> Sistema de antenas avanzado
ADSL	<i>(Asymmetric Digital Subscriber Loop)</i> Línea de Suscripción Digital Asimétrica
AWGN	<i>(Additive White Gaussian Noise)</i> Ruido Blanco Gaussiano Aditivo
BE	<i>(Best Effort)</i> Mejor esfuerzo
BS	<i>(Base Station)</i> Estación Base
BWA	<i>(Broadband Wireless Access)</i> Acceso inalámbrico de banda ancha
BW	<i>(BandWidth)</i> Ancho de banda
CDMA	<i>(Code Division Multiple Access)</i> Múltiple Acceso por División de código
CID	<i>(Connection Identifier)</i> Identificador de conexión
CPE	<i>(Customer Premises Equipment)</i> Equipo local del cliente
DL	<i>(Downlink)</i> Canal de comunicación de la BS hacia la SS o MS

DL-MAP	<i>(Downlink MAP)</i> Mapa que describe el uso del canal de la BS hacia la SS o MS
EDGE	<i>(Enhanced Data rate for GSM Evolution)</i> Tasa de datos mejorada para la evolución de GSM
ETSI	<i>(European Telecommunications Standards Institute)</i> Instituto Europeo para la estandarización de las Telecomunicaciones
FDD	<i>(Frequency Division Duplex)</i> Duplexado por división de frecuencias
FEC	<i>(Forward Error Correction)</i> Corrección de errores hacia adelante
FSHO	<i>(Fast Switching Handoff)</i> Handoff de cambio rápido
HHO	<i>(Hard Handoff)</i> Handoff Duro
HiperMAN	<i>(High Performance Radio Metropolitan Area Network)</i> Acceso Inalámbrico de Alto Rendimiento para redes de área metropolitana
HO	<i>(Handover)</i> también conocido como Handoff Cambio de conexión de una estación base a otra
IEEE	<i>(Institute of Electrical and Electronics Engineers)</i> Instituto de Ingenieros eléctricos y electrónicos
IETF	<i>(Internet Engineering Task Force)</i> Fuerza de trabajo de la Ingeniería de Internet
ITU	<i>(International Telecommunications Union)</i> Unión internacional de telecomunicaciones
LAN	<i>(Local Area Network)</i> Red de área local
LOS	<i>(Line Of Sight)</i> Línea de vista
LTE	<i>(Long Term Evolution)</i>
MAC	<i>(Media Access Control)</i> Control de Acceso al Medio
MDHO	<i>(Macro Diversity Handoff)</i> Handoff con Macro diversidad
MIMO	<i>(Multiple Input Multiple Output)</i> Múltiples Entradas Múltiples Salidas
MPDU	<i>(MAC Protocol Data Unit)</i> Protocolo de unidad de datos de la capa MAC
MS	<i>(Mobile Station)</i> Estación móvil
NLOS	<i>(Non-Line Of Sight)</i> Sin línea de vista
nrtPS	<i>(non real-time Polling Service)</i> Servicio por sondeo (sin tiempo real)
OFDM	<i>(Orthogonal Frequency Division Multiplexing)</i> Multiplexado por división de frecuencias ortogonales
OFDMA	<i>(Orthogonal Frequency Division Multiple Access)</i> Acceso múltiple por división de frecuencias ortogonales
PDU	<i>(Protocol Data Unit)</i> Protocolo de unidad de datos









Glosario de Acrónimos

QoS	<i>(Quality of Service)</i> Calidad de Servicio
rtPS	<i>(real-time Polling Service)</i> Servicio en tiempo real por sondeo
SDU	<i>(Service Data Unit)</i> Servicio de unidad de datos
SNR	<i>(Signal to Noise Ratio)</i> Relación señal a ruido
SOFDMA	<i>(Scalable Orthogonal Frequency Division Multiple Access)</i> OFDMA escalable
SS	<i>(Subscriber Station)</i> Estación suscriptora
TDD	<i>(Time Division Duplex)</i> Duplexado por división de tiempo
TDM	<i>(Time Division Multiplexing)</i> Multiplexado por división de tiempo
TDMA	<i>(Time Division Multiple Access)</i> Acceso múltiple por división de tiempo
TKIP	<i>(Temporal Key Integrity Protocol)</i> Protocolo de clave de integridad temporal
UGS	<i>(Unsolicited Grant Service)</i> Servicio Garantizado no solicitado
UL	<i>(Uplink)</i> Canal de comunicación de la SS o MS hacia la BS
UL-MAP	<i>(Uplink MAP)</i> Mapa que describe el uso del canal de la SS o MS hacia la BS
VoIP	<i>(Voice over IP)</i> Voz sobre el protocolo IP
WiFi	<i>(Wireless Fidelity)</i>
WiBro	<i>(Wireless Broadband)</i> Banda Ancha Inalámbrica
WMAN	<i>(Wireless Metropolitan Area Network)</i> Red Inalámbrica de área metropolitana
WiMAX	<i>(Worldwide Interoperability for Microwave Access)</i> Interoperabilidad Mundial para Acceso por Microondas

Bibliografía

- [1] Matthew S. Gast, "802.11® Wireless Networks: The Definitive Guide", O'Reilly, 2nd Edition
- [2] IEEE Std 802.16™-2004, "IEEE Standard for Local and metropolitan area networks Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems"
- [3] Yan Zhang, Hsiao-Hwa Chen, "Mobile WiMAX, Toward Broadband Wireless Metropolitan Area Networks", Auerbach Publications, 2008
- [4] IEEE Std 802.16e™-2005 and IEEE Std 802.16™-2004/Cor1-2005, (Amendment and Corrigendum to IEEE Std 802.16-2004)
- [5] V. Rangel, J. Cota, J. Castellanos, J. Reyes, "Diseño de Procedimientos Handoff en Redes Inalámbricas de Banda Ancha basado en el Estándar IEEE 802.16", 14 páginas, enero 2006
- [6] D.H.Lee, Kyandoghene Kyamakya, Jean Paul Umondi, "Fast Handover Algorithm for IEEE 802.16e Broadband Wireless Access System", 6 páginas, 2006
- [7] V.Rangel, J.Gomez, E.Cota, "Performance Analysis of a Reliable Handoff Procedure for IEEE 802.16e based networks", 7 páginas, 2006
- [8] Jenhui Chen, Chih-Chieh Wang and Jiann-Der Lee, "Pre-Coordination Mechanism for Fast Handover in WiMAX Networks", 7 páginas, 2007
- [9] Ian Poole, "Cellular Communications Explained: From Basics to 3G", Editorial Elsevier, 2006
- [10] William C. Y. Lee, "Wireless and Cellular Telecommunications", Mc GrawHill, 3rd Edition
- [11] Duangporn Aphiraksatyakul, Boon-Chong Seet and Chiew-Tong Lau, "Evaluation of Terrain Effects on Mobile WiMax in a Vehicular Environment", 5p, 2008
- [12] Mike Meyers, "Network+Certification All-in-One Exam Guide", Mc Graw Hill, Third Edition
- [13] G.S.V. Radha Krishna Rao, G. Radhamani, "WiMAX: a Wireless Technology Revolution", Auerbach Publications, Octubre 2007
- [14] Yang Xiao, "WiMAX MobileFi: Advanced Research and Technology", Auerbach Publications, Diciembre 2007
- [15] Vijay K. Garg, "Wireless Communications and Networking", Editorial Elsevier, 2007
- [16] K.R.Santhi, G. Senthil Kumaran, "Migration to 4G: Mobile IP based Solutions", 16 págs, 2006
- [17] Daniel Sweeney, "WiMAX Operator's Manual: Building 802.16 Wireless Networks", APress 2nd Edition
- [18] Loutfi Nuaymi, "WiMAX:Technology for Broadband Wireless Access", John Wiley & Sons, 2007
- [19] ITU-T Blue Book Recommendation G.711, "Pulse Code Modulation (PCM) of Voice Frequencies", 1993
- [20] Official OPNETWORK 2007 presentation: Session 1571, "Understanding WiMAX Model Internals and Interfaces: Discrete Event Simulation for R&D", OPNETWORK 2007
- [21] V. Erceg et al., "An empirically based path loss model for wireless channels in suburban environments", IEEE JSAC, vol.17, no.7, July 1999, pp. 1205-1222. Erceg's model is also referenced in IEEE802.16a-03/01 document.
- [22] ITU-R M.1225, "Guidelines for Evaluation of Radio Transmisión Technologies for IMT-2000", 60 páginas, 1997

Internet

- [23] **WiMAX Forum**®, <http://www.wimaxforum.org> , Última consulta: 15/03/2009
- [24] http://www.opnet.com/solutions/network_rd/modeler.html , Última consulta: 12/05/2009
- [25] <http://www.protocols.com/pbook/cellular.htm> , Última consulta: 12/06/2008
- [26] http://www.wimaxforum.org/regulators/WiMAX_Overview/mobile , Última consulta: 7/06/2009
- [27] <http://tools.ietf.org/html/rfc2003> , Última consulta: 6/05/2009
- [28] <http://tools.ietf.org/html/rfc1853> , Última consulta: 6/05/2009
- [29] <http://tools.ietf.org/html/rfc1256> , Última consulta: 6/05/2009
- [30] <http://www.protocols.com> , Última consulta: 10/05/2009
- [31] **ITU: About mobile technology and IMT-2000**, Consultado el 23/05/2008
<http://www.itu.int/osg/spu/imt-2000/technology.html#Introduction%20-%20Evolution>
- [32] 3rd Generation Partnership Project, Consultado el 23/05/2008
<http://www.3gpp.org/About/about.htm> 