



01170

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

POSGRADO EN INGENIERÍA

**DISEÑO DE PROCEDIMIENTOS HANDOFF EN REDES
INALÁMBRICAS DE BANDA ANCHA BASADO EN EL
ESTÁNDAR IEEE 802.16**

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN INGENIERÍA *ELECTRICA*
P R E S E N T A:

JOSÉ EDUARDO COTA GUAJARDO

DIRECTOR DE TESIS: DR. VICTOR RANGELLICEA

México, D.F.,

JUNIO DEL 2005

m345612



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.

DEDICATORIA

A mi padre José Eduardo Cota Sotomayor:
¿Quién sería sin sus consejos, sin su ejemplo..... sin su apoyo?

A mi madre Silvia Guajardo Peredo
Quien definió mis conceptos de entrega y bondad.

A mi hermana Silvia Cota Guajardo:
Sinónimo de carácter y confiabilidad.

Y a mi hermana Susana Cota Guajardo:
Ejemplo vivo de lucha y perseverancia.

Autorizo a la Dirección General de Bibliotecas de la
UNAM a difundir en formato electrónico e impreso el
contenido de mi trabajo recepcional.
NOMBRE: José Eduardo
Cota Guajardo
FECHA: 17/ Junio / 05
FIRMA: [Firma]

AGRADECIMIENTOS:

A todos los compañeros de generación y del laboratorio de redes, por su gran compañerismo.

A todos los profesores del posgrado en Telecomunicaciones, por su paciencia y disponibilidad.

A los Doctores Víctor Rangel Licea y Javier Gómez Castellano, por abrirme las puertas del laboratorio de redes inalámbricas y permitirme hacerme partícipe de sus proyectos.

A mi familia en México, por su apoyo en mis momentos de enfermedad y quienes siempre me brindaron una mano cuando la necesité.

A todos los compañeros que desfilaron por el departamento 4 del edificio 21 unidad atilillo, donde nacieron un sin número de amistades, y donde conocí las culturas del mundo sin salir de México.

Y un agradecimiento muy especial al Dr. Víctor Rangel Licea, mi director de tesis, por brindarme su conocimiento y horas y horas de su tiempo para poder sacar este proyecto adelante.

A todos ustedes, muchas gracias.

RESUMEN

Las actuales necesidades en materia de telecomunicaciones, han llevado al desarrollo de redes que son capaces de proveer grandes anchos de banda, y que además, tienen la capacidad de soportar QoS, como es el caso de IEEE 802.16 también conocido como WiMAX.

IEEE 802.16 es un estándar inalámbrico fijo de banda ancha que está buscando agregar movilidad entre sus usuarios. Sin embargo, primero se deben solucionar algunos obstáculos técnicos como es el caso de *handoff* (cambio de conexión que ejecuta un usuario en movimiento entre dos estaciones base).

Esta tesis aborda la problemática de *handoff* tratando de conservar la QoS de los usuarios. Una nueva propuesta de mecanismos y algoritmos para cambio de conexión son presentados. Además, a lo largo de la tesis, se encuentra una introducción a las alternativas de banda ancha así como una introducción al estándar IEEE 802.16.

También se presenta un modelo de programación basado en OPNET MODELER para simular y evaluar los mecanismos de *handoff* aquí presentados. De igual forma se presenta parte del código en lenguaje C utilizado para desarrollar dicho modelo.

Finalmente, esta tesis demuestra que es posible implementar mecanismos de *handoff* sobre el estándar IEEE 802.16 que sean confiables y que puedan mantener una QoS aún durante el cambio de conexión, incluyendo usuarios con aplicaciones exigentes como voz sobre IP. Todo esto, respetando usuarios que ya estén certificados para trabajar bajo el estándar IEEE 802.16.

ÍNDICE

LISTA DE FIGURAS	V
LISTA DE TABLAS	IX
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN	1-1
1.1 ANTECEDENTES	1-1
1.2 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	1-3
1.3 OBJETIVO Y METAS	1-4
1.4 CONTRIBUCIONES Y JUSTIFICACIÓN	1-5
1.5 ESTRUCTURA DE LA TESIS	1-6
CAPÍTULO 2: SISTEMAS DE BANDA ANCHA	2-1
2.1 INTRODUCCIÓN	2-1
2.2 REDES DE BANDA ANCHA	2-2
2.2.1 ATM	2-3
2.2.2 xDSL	2-3
2.2.3 FITL	2-4
2.2.4 CATV	2-6
2.3 SISTEMAS MÓVILES DE BANDA ANCHA	2-9
2.3.1 GSM	2-9
2.3.1.1 GPRS	2-10
2.3.1.2 EDGE	2-11
2.3.2 UMTS	2-11
2.3.3 CDMA2000	2-12
2.4 SISTEMAS INALÁMBRICOS DE BANDA ANCHA	2-12
2.4.1 REDES LAN: IEEE 802.11, HIPERLAN Y WATM	2-13
2.4.2 HIPERACCES & HIPERMAN	2-14
2.4.3 IEEE 802.16	2-14
2.5 CONCLUSIONES	2-14
CAPÍTULO 3: DESCRIPCIÓN DEL ESTÁNDAR IEEE802.16	3-1
3.1 INTRODUCCIÓN	3-1
3.2 FORMACIÓN DEL ESTÁNDAR	3-4
3.2.1 RESEÑA HISTÓRICA	3-5
3.2.2 NÚMERO DE VERSIONES	3-6
3.2.3 QUE DEFINE EL ESTÁNDAR	3-8
3.3 ARQUITECTURA	3-8
3.4 CAPA MAC	3-9
3.4.1 DIRECCIONAMIENTO Y CONEXIONES	3-10

3.4.2 FORMATO DE LOS PAQUETES DE TRANSMISIÓN A NIVEL CAPA MAC	3-11
3.4.2.1 FORMATO DE LOS ENCABEZADOS MAC	3-12
3.4.2.2 FORMATO DE SUBENCABEZADOS	3-13
3.4.2.3 MENSAJES DE CONTROL MAC	3-14
3.4.3 CONCATENACIÓN, FRAGMENTACIÓN, EMPAQUETAMIENTO, CRC Y ENCRIPCIÓN	3-15
3.4.4 SERVICIO DE PROGRAMACIÓN DE TRANSMISIÓN ASCENDENTE	3-16
3.4.5 MECANISMOS PARA SOLICITUD Y ASIGNACIÓN DE ANCHO DE BANDA	3-18
3.4.6 RESOLUCIÓN DE COLISIONES	3-20
3.4.7 PROCESO DE INICIALIZACIÓN	3-22
3.5 CAPA FÍSICA	3-27
3.5.1 CARACTERÍSTICA FÍSICAS DEL CANAL DOWNLINK	3-28
3.5.2 CARACTERÍSTICA FÍSICAS DEL CANAL UPLINK	3-32
3.6 CONCLUSIONES	3-35

CAPÍTULO 4: ANÁLISIS Y DISEÑO DE PROCEDIMIENTOS DE *HANDOFF* **4-1**

4.1 INTRODUCCIÓN	4-1
4.2 ESTUDIO DE MONITOREO Y ASOCIACIÓN DE BS VECINAS	4-2
4.3 ESTUDIO DE COMUNICACIÓN INTER-BS	4-5
4.4 ESTUDIO DE PROCEDIMIENTOS PARA <i>HANDOFF</i>	4-6
4.5 ESTUDIO DE PROCEDIMIENTO DE <i>HANDOFF</i> "BREAK BEFORE MAKE"	4-10
4.6 PROCEDIMIENTOS DE <i>HANDOFF</i> EN SISTEMAS CELULARES GSM	4-15
4.7 PROPUESTA DE PROCEDIMIENTO <i>HANDOFF</i> PARA EL ESTÁNDAR IEEE 802.16	4-17
4.7.1 MECANISMO Y FLUJO DE MENSAJES DURANTE LA ETAPA DE <i>HANDOFF</i> ACTIVADO DESDE EL MSS	4-19
4.7.2 MECANISMO Y FLUJO DE MENSAJES DURANTE LA ETAPA DE <i>HANDOFF</i> ACTIVADO DESDE LA BS	4-22
4.7.3 PROCESO DE RE-INICIALIZACIÓN CON LA NUEVA BS (BS OBJETIVO) DURANTE EL PROCEDIMIENTO DE <i>HANDOFF</i>	4-23
4.7.4 FORMATO DE LOS MENSAJES DE INTERCAMBIO DURANTE EL MECANISMO DE <i>HANDOFF</i>	4-25
4.7.5 PROCESO INTERNO EN EL MSS DURANTE EL MECANISMO DE <i>HANDOFF</i>	4-31
4.7.6 PROCESO INTERNO EN LA BS SERVIDORA DURANTE EL MECANISMO DE <i>HANDOFF</i>	4-33
4.7.7 PROCESO INTERNO EN LAS BSs VECINAS DURANTE EL MECANISMO DE <i>HANDOFF</i>	4-35
4.7.8 QOS	4-36
4.8 CONCLUSIONES	4-36

CAPÍTULO 5: MODELADO Y SIMULACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE *HANDOFF* PROPUESTO **5-1**

5.1 INTRODUCCIÓN	5-1
5.2 DESCRIPCIÓN DE OPNET MODELER	5-2
5.3 MODELADO DEL ESTÁNDAR IEEE802.16 CON OPNET MODELER	5-5
5.3.1 ESCENARIO	5-5
5.3.2 MODELADO DE LA ESTACIÓN BASE	5-7
5.3.3 MODELADO DE LOS NODOS FIJOS Y MÓVILES	5-10
5.3.3.1 NODOS FIJOS	5-10
5.3.3.2 NODOS MÓVILES	5-13
5.3.3.3 PARÁMETROS DE CONFIGURACIÓN DE LOS NODOS EN EL SIMULADOR	5-13
5.3.4 MODELADO DEL TRÁFICO	5-14
5.3.4.1 TRÁFICO TIPO INTERNET	5-14
5.3.4.2 TRÁFICO VoIP UTILIZANDO CODEC G723.1	5-16

5.3.5 MODELADO DE LA COMUNICACIÓN INTER-BS	5-18
5.3.6 MODELADO DEL PROCEDIMIENTO DE <i>HANDOFF</i>	5-19
5.4 MODELO ANALÍTICO	5-22
5.4.1 ANÁLISIS DEL RETARDO DE INICIALIZACIÓN	5-22
5.4.2 GRÁFICAS DE RETARDO BAJO DIFERENTES CONDICIONES DE OPERACIÓN	5-25
5.5 RESULTADO DE SIMULACIONES	5-28
5.5.1 SERVICIO BE	5-28
5.5.2 SERVICIO UGS	5-33
5.6 CONCLUSIONES	5-39
CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES	6-1
6.1 CONCLUSIONES	6-1
6.2 RESULTADOS	6-2
6.3 TRABAJOS A SEGUIR	6-3
REFERENCIAS	R-I
APÉNDICE A: GLOSARIO	A-I
APÉNDICE B: ANEXOS SOBRE ANÁLISIS <i>HANDOFF</i>	A-IV
APÉNDICE C: MODELO DE PROPAGACIÓN	A-VIII
APÉNDICE D: GRÁFICAS DE DESEMPEÑO DEL MECANISMO DE <i>HANDOFF</i> PROPUESTO	A-X
APÉNDICE E: ALGORITMO DE <i>HANDOFF</i>	A-XVI

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Configuraciones para FTTL. a) FTTH b) FTTB c) FTTC.	2-5
Figura 2.2 – Arquitectura de una red CATV.	2-6
Figura 2.3 – Red CATV utilizando HFC y cable MODEM.	2-8
Figura 3.1 – Clasificación de redes por su extensión de cobertura.	3-1
Figura 3.2 – Posible escenario de una red inalámbrica basada en el estándar IEEE 802.16.	3-2
Figura 3.3 – Servicios que puede proveer una red basada en el estándar IEEE 802.16.	3-3
Figura 3.4 – Hotspot (WiFi) conectado a Internet a través de una estación base IEEE 802.16.	3-3
Figura 3.5 – Formato de paquete básico MAC PDU.	3-11
Figura 3.6 – Ejemplos de subencabezados PDU.	3-13
Figura 3.7 – Formato de los mensajes de control MAC.	3-14
Figura 3.8 – Proceso de inicialización de un nuevo SS que se va a unir a la red.	3-23
Figura 3.9 – Estructura de un subframe en el canal <i>downlink</i> utilizando TDD.	3-29
Figura 3.10 – Estructura de un subframe en el canal <i>downlink</i> utilizando FDD.	3-29
Figura 3.11 – Estructura de un subframe en el canal <i>uplink</i> .	3-32
Figura 4.1 – Ilustración de <i>handoff</i> .	4-1
Figura 4.2 – Propuesta de procedimiento de <i>handoff</i> visto en el dominio de tiempo.	4-8
Figura 4.3 – Mensaje <i>BS-Host-Adv</i> para comunicación via <i>backbone</i> .	4-8
Figura 4.4 – Mensaje <i>SS-info-request</i> .	4-9
Figura 4.5 – Mensaje <i>SS-info-response</i> .	4-9
Figura 4.6 – Mensaje <i>Handoff-notification</i> .	4-9
Figura 4.7 – Mensaje <i>Handoff-notification-response</i> .	4-10
Figura 4.8 – <i>Handoff</i> “break before make”.	4-11
Figura 4.9 – Procedimiento de selección de célula.	4-12
Figura 4.10 – <i>Handoff</i> “break before make” en el dominio del tiempo.	4-13
Figura 4.11 – Arquitectura básica de GSM.	4-16
Figura 4.12 – Flujo de mensajes cuando el proceso de <i>handoff</i> es activado por el MSS.	4-19
Figura 4.13 – Número de BS vecinas que un MSS puede captar mediante los mensajes <i>ADV-MSG</i> .	4-21
Figura 4.14 – Flujo de mensajes cuando el proceso de <i>handoff</i> es activado por la BS.	4-22

Figura 4.15 – Proceso de re-inicialización con la BS objetivo.	4-23
Figura 4.16 – Formato del mensaje <i>HO-BS-REQ</i> .	4-25
Figura 4.17 – Formato del mensaje <i>HO-REQ</i> .	4-25
Figura 4.18 – Formato del mensaje <i>HO-REQ-NOT</i> .	4-26
Figura 4.19 – Formato del mensaje <i>HO-RSP-NOT</i> .	4-28
Figura 4.20 – Formato del mensaje <i>HO-RSP-MSS</i> .	4-29
Figura 4.21 – Formato del mensaje <i>HO-RSP-BS</i> .	4-30
Figura 4.22 – Formato del mensaje <i>ADV-MSG</i> .	4-31
Figura 4.23 – Proceso interno de <i>handoff</i> en el MSS.	4-32
Figura 4.24 – Proceso de <i>handoff</i> en la BS servidora. Comunicación con los MSSs.	4-33
Figura 4.25 – Comunicación inter-BS durante el proceso de <i>handoff</i> , visto desde la BS servidora.	4-34
Figura 4.26 – Proceso de <i>handoff</i> en las BSs vecinas.	4-35
Figura 5.1 – Forma de organización jerárquica de los editores en OPNET.	5-3
Figura 5.2 – Modelo de simulación en OPNET MODELER.	5-4
Figura 5.3 – Escenario de simulación de procedimientos de <i>handoff</i> .	5-6
Figura 5.4 – Diseño de la Estación Base.	5-8
Figura 5.5 – Proceso hijo (<i>child process</i>) <i>bwa_be_txctl</i> .	5-9
Figura 5.6 – Configuración de los Nodos.	5-11
Figura 5.7 – Configuración del proceso auxiliar <i>bwa_wm_child</i> .	5-12
Figura 5.8 – Distribución de probabilidad del tamaño de los paquetes generados en tráfico tipo Internet.	5-14
Figura 5.9 – Cálculo de la cantidad de minislots que un <i>Ethernet MAC frame</i> de 1024 bytes ocupa para su transmisión.	5-15
Figura 5.10 – Forma de operación del generador de tráfico tipo Internet de acuerdo a las 4 distribuciones de probabilidad implementadas.	5-16
Figura 5.11 – Codificación de una señal de voz mediante un codec G723.1.	5-17
Figura 5.12 – Cálculo de minislot que ocupa cada frame de 20 bytes, generado por un codec G723.1.	5-17
Figura 5.13 – Conexión inter-BS en el simulador.	5-19

Figura 5.14 - Tiempo estimado del proceso de inicialización de un nodo.	5-23
Figura 5.15 - Gráfica de retardo de proceso de inicialización considerando 4 colisiones.	5-26
Figura 5.16 - Gráfica de retardo de proceso de inicialización considerando 15 colisiones.	5-26
Figura 5.17 - Gráficas de retardo de proceso de inicialización considerando 1 y 5 <i>slots</i> .	5-26
Figura 5.18- Gráficas de retardo de proceso de inicialización considerando $T_{MAP} = 2$ ms.	5-27
Figura 5.19 - Retardo promedio del nodo móvil.	5-29
Figura 5.20 - Retardo promedio de todos los nodos.	5-29
Figura 5.21 - Retardo del nodo móvil durante el proceso de <i>handoff</i> con 40 usuarios.	5-30
Figura 5.22 - <i>Throughput</i> del nodo móvil durante el proceso de <i>handoff</i> con 40 usuarios.	5-30
Figura 5.23 - Retardos para un nodo móvil con tráfico G723.1 bajo BE.	5-31
Figura 5.24 - Retardo promedio para todos los nodos, con tráfico G723.1 bajo BE.	5-31
Figura 5.25 - Retardos de un MSS justo en el momento de <i>handoff</i> en una BS con 70 nodos bajo un servicio BE y tráfico G723.	5-32
Figura 5.26 - Retardos de un MSS en una BS con 70 nodos bajo un servicio BE y tráfico G723.1.	5-32
Figura 5.27 - Retardo de los paquetes justo en el momento de <i>handoff</i> para un MSS que opera bajo BE con tráfico G723.1 con 80 nodos.	5-33
Figura 5.28 - Retardo de un MSS durante el proceso de <i>handoff</i> con 80 nodos bajo BE y tráfico G723.1.	5-33
Figura 5.29 - Retardo instantáneo para un nodo que ejecuta <i>handoff</i> poco después del segundo 4.5.	5-34
Figura 5.30 - Ilustración del retraso fijo de aproximadamente 30 ms que sufren los nodos móviles, debido al proceso de <i>handoff</i> .	5-34
Figura 5.31 - <i>Throughput</i> instantáneo para un nodo que ejecuta <i>handoff</i> poco después del segundo 4.5119.	5-35
Figura 5.32 - Retardo instantáneo para un MSS que ejecuta el procedimiento de <i>handoff</i> hacia una BS que se encuentra a su máxima capacidad.	5-35
Figura 5.33 - <i>Throughput</i> del MSS con 80 nodos tráfico G723.1 servicio UGS tirando paquetes.	5-36
Figura 5.34 - Retardo del MSS con 80 nodos bajo UGS con tráfico G723.1 tirando paquetes.	5-36
Figura 5.35 - Retardo de nodo móvil con 95 usuarios, cuando se asignan más <i>slots</i> después del proceso de <i>handoff</i> .	5-37

- Figura 5.36 – *Throughput* del MSS con 95 nodos, cuando se asignan más *slots* después del proceso de *handoff*. 5-37
- Figura 5.37 – Retardos par un MSS que ejecuta el procedimiento de *handoff*, transmitiendo En ráfagas de 2 segundos. 5-38

LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1 – Estándares asociados con tecnologías xDSL.	2-4
Tabla 3.1 – Versiones del estándar IEEE802.16.	3-7
Tabla 3.2 – Formato del encabezado MAC.	3-12
Tabla 3.3 – Mensajes de control MAC.	3-14
Tabla 3.4 – Reglas para fragmentación.	3-15
Tabla 3.5 – Servicios básicos de asignación de ancho de banda.	3-18
Tabla 3.6 – Formato del mensaje DL-MAP.	3-30
Tabla 3.7 – Formato de los elementos de información (IE) dentro del mensaje DL-MAP.	3-31
Tabla 3.8 – Valores DIUC posibles dentro del mensaje DL-MAP.	3-31
Tabla 3.9 – Formato del mensaje UL-MAP.	3-33
Tabla 3.10 – Formato de los IE dentro del mensaje UL-MAP (UL-MAP_IE).	3-34
Tabla 3.11 – Valores UIUC dentro del mensaje UL-MAP.	3-34
Tabla 4.1 – SNR aceptado en el receptor para un BER menor a 1×10^{-6} [3.8].	4-18
Tabla 4.2 – Datos recopilados por el MSS de cada BS vecina que ha logrado captar.	4-20
Tabla 5.1 – Frecuencias centrales de transmisión y recepción de las estaciones base en el simulador.	5-9
Tabla 5.2 – Condiciones de cada uno de los estados del proceso auxiliar <i>bwa_wm_child</i> .	5-13
Tabla 5.3 – Frecuencias centrales de transmisión y recepción de los nodos (SS y MSS) en el simulador.	5-14
Tabla 5.4 – Parámetros para una simulación con ráfagas de transmisión de dos segundos.	5-38

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 ANTECEDENTES

Todos hemos tenido alguna vez la necesidad de comunicarnos urgentemente, aún cuando estamos en lugares donde no existen líneas telefónicas disponibles o cuando estamos en movimiento. Esta necesidad de una comunicación que nos pudiera mantener en contacto ininterrumpidamente, hizo posible el primer sistema de telefonía celular comercial, el cual, funcionó en los estados unidos por el año de 1983 y cuyo nombre fue AMPS (American Mobile Phone System) [11]. Este sistema celular que, fue totalmente analógico y funcionó con FDMA (Acceso Múltiple por División de Frecuencias), perteneció a lo que se le conoce como primera generación de los sistemas telefónicos celulares.

Sin embargo, la necesidad de dar un mejor servicio llevó, a lo que hoy se conoce como segunda generación de sistemas telefónicos celulares. Estos sistemas se caracterizan por ser digitales y alcanzar velocidades de transmisión de hasta 14.4 kbps. Entre los más conocidos tenemos los siguientes: TDMA (Acceso Múltiple por División de Tiempo), GSM (Global System for Mobile Communications) [32] desarrollado en Europa, CDMA (Acceso Múltiple por división de Código), entre otros más. Algunos de estos sistemas pueden alcanzar velocidades de hasta 19.2 kbps, y a diferencia de la primera generación que solo funcionaban como telefonía móvil básica, los de segunda generación se caracterizaron por ser digitales y prestar servicios como SMS (envío de mensajes cortos), 2Way (2 vías), prepago, etcétera.

Aunque por otro lado, GSM con ayuda de extensiones o parches, puede soportar transmisión de datos con el protocolo TCP (Transmission Control Protocol) para aplicaciones Web o e-mail, y pueden alcanzar velocidades de hasta 57.6 kbps.

Actualmente, la tercera generación que está entrando al mercado, tiene la capacidad de transmitir digitalmente voz y video. Utiliza conmutación de paquetes y en el caso de CDMA y GSM, se pretende

alcanzar velocidades de hasta 2Mbps para usuarios fijos (144 kbps para usuarios con alta velocidad de movimiento).

Pero antes de continuar con lo que se proyecta para cuarta generación, demos un repaso a otro tipo de redes que se han ido desarrollando en paralelo y cuyos caminos están destinados a encontrarse, “las redes de datos”.

En realidad, las redes de datos tienen una larga historia si se considera la telegrafía del siglo XIX o más aún si consideramos las primitivas señales de humo. Es sin embargo, a comienzos de los años cincuenta, cuando se empiezan a desarrollar las redes de datos como las conocemos hoy en día. Primero, comenzaron conectando una computadora central a un dispositivo periférico, que podía ser una impresora o inclusive otra computadora en modo remoto. El gran auge que tuvieron este tipo de conexiones, ocasionaron que durante los años sesentas, surgieran nuevos dispositivos para redes como multiplexores remotos y procesadores especiales para el control de enlaces. Durante las siguientes décadas se comenzaron a desarrollar nuevos protocolos y configuraciones con la finalidad de mejorar el desempeño de estas redes de datos.

Surgieron entonces, gran cantidad de redes con diferentes características y configuraciones, tales como: topología tipo estrella, topología tipo bus, topología tipo anillo, etcétera [21]. Redes tipo LAN (Local Area Network), PAN (Personal Area Network), MAN (Metropolitan Area Network) y WAN (Wide Area Network), así como protocolos de control de acceso al medio como Aloha, Aloha ranurado, CSMA (Carrier Sense Multiple Access), CSMA/CD (Carrier Sense Multiple Access/Collision Detect), CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoid), etcétera. Y finalmente, estándares como Ethernet [43] y Novell [54] por citar algunas, que especifican las características básicas para la transmisión de datos dentro de una red.

Hoy en día, las redes de datos son indispensables en muchos aspectos de la vida, las usamos en video juegos, en el hogar, en las empresas, centros educativos, instituciones públicas y privadas e incluso, juegan un papel crucial en la economía de un país y hasta en la economía mundial.

Por todo lo anterior y aunado a una fuerte tendencia a convertir todo lo alámbrico en inalámbrico, la necesidad cada día más apremiante de transmitir más datos a la vez y la llegada del protocolo IP

(Internet Protocol) ampliamente extendido gracias a Internet, ha surgido la necesidad de nuevas tecnologías que combinen las tres características.

Es por eso, que las tecnologías de acceso inalámbrico de banda ancha (BWA) suenan como las más viables para un futuro no muy lejano e inclusive para establecer lo que será la cuarta generación de sistemas telefónicos celulares. Entre sus muchas bondades están las de ofrecer un servicio de conexión a Internet de alta velocidad (de 1 a 134 Mbps) y una capacidad de cobertura de hasta 50 km para usuarios fijos (1-8 km para usuarios móviles), lo cual le da el soporte para transmitir imágenes, video, teleconferencias, servicios multimedia, datos IP, datos ATM (Asynchronous Transfer Mode), voz, inclusive se pretende que soporte calidad y servicio, televisión celular, televisión interactiva y muchos otros servicios más.

Existen varias propuestas para este tipo de tecnología y entre los más sobresalientes están ETSI BRAN (Broadband Radio Access Network) [15] el cuál pretende estandarizar tecnologías que alcancen velocidades de 25 a 54 Mbps, y el protocolo propuesto por la organización IEEE [60] cuyo nombre es IEEE 802.16 [23]. Sin embargo, el estándar IEEE 802.16 ya se vislumbra como el más popular, ya que cuenta con un gran soporte de compañías líderes en el mercado (a través de forum WiMAX [67], organización creada para promover el uso de dicho estándar) que le da una considerable ventaja con respecto a su homólogo Europeo, además de ser compatible con otros estándares como ATM [56] e IEEE 802.11 (WiFi) [33, 69], proveer un gran ancho de banda (con el cual se pueden alcanzar hasta 134 Mbps de transferencia en la primera etapa y hasta 310 Mbps en la segunda etapa, para lo cuál, primero se deben mejorar los sistemas de antenas y técnicas de transmisión que incrementen los bits por segundo por hertz y que logren mantener una tasa de errores baja) y estar en continuo estudio, con lo que se mantiene mejorando constantemente.

1.2 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

Los sistemas BWA son una realidad. Actualmente el protocolo existente conocido con el nombre de IEEE 802.16 [23], soporta usuarios inalámbricos fijos que no pueden moverse libremente a pesar de

tener una conexión inalámbrica, debiendo permanecer fijos en un mismo lugar mientras dure la sesión para no romper la conexión establecida.

El paso de esta tecnología a un modo inalámbrico fijo y **móvil**, es decir, que el usuario pueda moverse libremente dentro de la cobertura de la red (en donde exista una estación que le pueda proveer de una conexión) manteniendo una conexión constante y sin el peligro de perderla en un instante determinado, implica superar retos que conlleva la movilidad.

Entre los problemas más reconocidos están los que residen en la capa MAC “Control de Acceso al Medio” (donde se define principalmente como ha de compartirse el medio físico de transmisión), capa física (donde se deben solucionar problemas como retardos por dispersión, multi-trayectoria, etcétera), y el cambio de estación base (*handoff*), este último exclusivo de los sistemas inalámbricos móviles. Para poder superar estos problemas, se deben hacer las modificaciones pertinentes y en el caso de *handoff*, diseñar un procedimiento completo cuidando siempre no interferir con usuarios fijos que ya estén en operación.

Por lo tanto, esta tesis aborda el mecanismo de *handoff* inherente a la movilidad y el cual es indispensable para que un usuario pueda pasear libremente sin perder su conexión en la red.

1.3 OBJETIVO Y METAS

El cambio de conexión de una estación base a otra estación base, conlleva la acción de muchos mecanismos. Se pretende establecer un algoritmo que regule dichos mecanismos con el fin de minimizar el tiempo por cambio de conexión al máximo posible y poder así, garantizar un grado de calidad y servicio en las conexiones para aplicaciones de voz y tráfico multimedia, mantener la confiabilidad de la conexión, no perjudicar la eficiencia de uso del canal e incluir todos los escenarios posibles para evitar situaciones no previstas.

Además, se pretende hacer aportaciones con los resultados y llevar esta investigación más allá de una tesis al presentar propuestas con los resultados obtenidos al grupo de trabajo de la IEEE 802.16e

[63], que fue abierto con el fin de establecer las normas y condiciones para este tipo de tecnología que apenas está en desarrollo.

Se pretende además, publicar los resultados obtenidos en medios de divulgación científica, como podría ser alguna revista o congreso.

También, para comprobar los resultados de los procedimientos de *handoff* propuestos, se pretende desarrollar un modelo de simulación basado en el software especializado OPNET MODELER [65], con el cual, se pueda analizar a detalle la fiabilidad y eficiencia del mecanismo propuesto.

1.4 CONTRIBUCIONES Y JUSTIFICACIÓN

Actualmente, como ya hemos mencionado, existe un estándar para sistemas BWA con usuarios fijos. Sin embargo, a pesar de que ya se están haciendo esfuerzos por establecer un estándar que soporte tanto usuarios fijos como móviles, los estudios sobre *handoff* aún no son claros y se limitan a propuestas sobre temas muy específicos sin llegar a establecer procedimientos completos. Además, no cuentan con un respaldo analítico o con justificaciones sustentadas con simulaciones confiables.

Por lo tanto, con este estudio se pretende contribuir a establecer y mejorar las propuestas sobre los procedimientos de cambio de conexión de una estación base a otra *-HANDOFF-* en los sistemas BWA basados en el estándar la IEEE 802.16 [23] no solo en etapas específicas, sino sobre todo el proceso y especificando cada uno de los detalles implicados.

Esta tesis es también, una respuesta a los llamados en introducir movilidad en los sistemas BWA particularmente en el estándar IEEE 802.16.

En este caso en particular, se tiene un problema nunca antes enfrentado debido a que los sistemas BWA tienen mecanismos especiales que exigen un mecanismo de *handoff* más detallado y especializado que los actuales, que además, debe soportar QoS "Quality of Service" (calidad de servicio), así como diferentes tipos de aplicaciones.

I.5 ESTRUCTURA DE LA TESIS

Capítulo dos Tiene por objeto explicar en forma general los sistemas BWA y sus orígenes. Se hace una breve descripción de lo más reconocidos y se hace un esfuerzo por responder a las preguntas ¿cómo son?, ¿para que sirven? y “como funcionan”.

Capítulo tres Se puede encontrar una descripción detallada del funcionamiento del sistema BWA basado en el estándar IEEE 802.16 en los niveles de capa física y capa MAC.

También se encuentra una descripción de los mecanismos que se utilizan para acceder al medio como los son: TDMA (Acceso Múltiple por División de Tiempo), FDD (Duplexaje por División de Frecuencias), TDD (Duplexaje por División de Tiempo) y el uso de regiones de tiempo para establecer distintos niveles de calidad, usuarios privilegiados y preferencia hacia las aplicaciones más exigentes.

Capítulo cuatro Es un estudio de los esfuerzos que ya se han hecho para mejorar los mecanismos de *handoff* en los sistemas BWA, rescatando los puntos a favor y marcando sus puntos débiles. También se hace un estudio de mecanismos de *handoff* utilizados en otros sistemas móviles inalámbricos distintos a los sistemas BWA, de los cuales, igualmente se rescatan aquellos puntos convenientes que puedan resultar de utilidad.

Además, se hace la descripción del mecanismo de *handoff* propuesto. Se muestra el formato de los mensajes que se intercambian durante el procedimiento de *handoff*, el algoritmo implementado para llevar a cabo el cambio de conexión, los tiempos a seguirse y otros detalles técnicos relativos al mismo.

Capítulo cinco Se hace la descripción del modelo por ordenador implementado para evaluar y analizar el mecanismo de *handoff*. Se muestra los resultados obtenidos y las distintas gráficas que nos ayudarán a entender mejor el desempeño de nuestro sistema durante la etapa crítica de *handoff*.

Capítulo seis Tenemos la resolución final acerca de la implementación de mecanismos de *handoff* en sistemas BWA basados en el estándar 802.16, así como lo que podemos esperar de dichos sistemas en este rublo. Finalmente se presenta un esbozo de más investigaciones que se pueden seguir dentro de esta misma línea de investigación.

CAPÍTULO 2

SISTEMAS DE BANDA ANCHA

2.1 INTRODUCCIÓN

No hace mucho tiempo, el usuario promedio que deseaba conectarse a Internet, tenía que hacerlo a través de módems telefónicos que proporcionaban velocidades de transferencia de datos de 14.4 kbps, 28.8 kbps y finalmente 56.6 kbps [10]. Sin embargo, hemos visto que en los últimos años la demanda ha crecido a niveles insospechados, algunos autores incluso lo comparan con la revolución industrial del año mil ochocientos. La necesidad entonces, de mejores conexiones con más capacidad de transferencia, que pudieran dar más agilidad y más rapidez al usuario, hizo que se fueran desarrollando poco a poco las redes con capacidad de banda ancha.

Hoy podemos ver que han surgido una gran cantidad de tecnologías, como ejemplo, podemos citar sistemas de acceso de banda ancha como WITL (Wireless In The Loop) que incluye WATM (Wireless ATM), LEO (Low Earth Orbit), DECT (Digital Enhanced Cordless Telecommunication Standard), o FITL (Fiber In The Loop) que incluye FTTB (Fiber To The Building), FTTC (Fiber To The Curb), FTTH (Fiber To The Home), o xDSL (Digital Subscriber Line) que incluye HDSL (High Bit Rate DSL), ADSL (Asymmetrical Digital Subscriber Line), y VDSL (Very High Digital Subscriber Line), tecnología Cable Modem, entre muchos otras más [18].

A lo largo de este capítulo, iremos repasando el avance de las tecnologías de banda ancha a modo que nos ayude a tener una idea global de los mismos pero sin profundizar demasiado en ninguno de ellos, salvo del estándar DOCSIS, donde indagaremos un poco más ya que representa la base de partida de otro estándar de banda ancha inalámbrico que nos atañe en gran medida (IEEE 802.16).

2.2 REDES DE BANDA ANCHA

Como se acaba de mencionar, existen gran cantidad de tecnologías de banda ancha, por lo que resulta fácil confundirlas. En esta tesis, se establecen tres grandes características que un sistema de banda ancha puede poseer, pero que veces solemos ubicarlos más como el sistema en sí.

En primera, tenemos el medio físico que utilizan para su propagación. Están aquellos que utilizan el par de cobre como los sistemas telefónicos como medio físico de propagación, los que utilizan F.O. (fibra óptica), cable coaxial, el aire, o una combinación de los anteriores como: HFC (fibra óptica y cable coaxial), fibra óptica y par de cobre, o aire y fibra óptica. Los sistemas que utilizan el aire como medio de propagación de denominan sin excepción, inalámbricos.

En segunda, tenemos la técnica para acceder al medio físico. Hoy en día, debido a que el espectro electromagnético está saturado, se ha vuelto de vital importancia buscar técnicas que nos permitan utilizar al máximo el ancho de banda disponible. Las técnicas más conocidas son: FDMA (Acceso Múltiple por división de frecuencias), TDMA (Acceso Múltiple por División de tiempo), CDMA (Acceso Múltiple por División de Código), DAMA (Acceso Múltiple por Asignación de Demanda) y OFDMA (Acceso Múltiple por División de Frecuencias Ortogonales). Esta última técnica había sido más teórica que práctica debido a que técnicamente resultaba difícil su implementación, sin embargo, los adelantos tecnológicos actuales ya permiten la fabricación de circuitos OFDM (Multiplexaje por División de Frecuencias Ortogonales) como el chip DM256 (anunciado el 13 de diciembre del 2004) fabricado por la empresa canadiense wavesat [66] que hace posible pensar en OFDMA como una realidad.

Y finalmente tenemos el estándar. Un estándar define las técnicas de acceso al medio, las características del medio físico de propagación, las frecuencias de transmisión, y por lo general, todos aquellos parámetros que incumben a la capa física y a la subcapa MAC (control de acceso al medio), con el fin de garantizar compatibilidad entre equipos de diferentes firmas, establecer una competencia más sana y asegurar un mínimo de beneficios para los usuarios.

A continuación, se presentan las tecnologías de banda ancha de más renombre.

2.2.1 ATM (Asynchronous Transfer Mode)

A principios de los años noventas, ATM era sumamente mencionado y muchos conocedores le vaticinaban un gran futuro, sin embargo, la llegada del protocolo IP apartó a ATM de su destino. Hoy en día, ATM sigue funcionando, pero está muy lejos de tener la popularidad de las redes que funcionan bajo el protocolo IP.

ATM, es una tecnología que puede proveer un gran ancho de banda, está diseñado para soportar tasas de transmisión variables y fijas para aplicaciones como video, voz, imágenes, multimedia y por supuesto datos [38], es orientado a conexión y utiliza la celda como base. Una celda es un *frame* de tamaño fijo.

En ATM, se requiere una gran cantidad de encabezados para establecer una conexión, pues hay que asegurar que se pueda llevar a cabo antes de comenzar a transmitir datos. Pero una vez que la conexión se ha establecido, se ocupa tan solo una pequeña cantidad fija de encabezados en cada celda (paquete de datos) para guiar el paquete a través de la red hasta su destino (ruteo).

2.2.2 xDSL (Digital Subscriber Line)

xDSL es una tecnología desarrollada pensando en las centrales telefónicas que usan como medio de transmisión las líneas de cobre. Por supuesto, estas líneas de transmisión se diseñaron para un ancho de banda de 4 kHz, solo suficiente para transmitir voz. Es por eso, que las primeras versiones de xDSL proveían de poca capacidad, debido principalmente a que las líneas telefónicas son medios de transmisión no aptos del todo para transmitir grandes tasas de velocidades. Las grandes distancias que en ocasiones cubren, lo viejo de las instalaciones, el ruido térmico, pequeños desacoplo en las impedancias, atenuaciones, interferencias entre llamadas (cross talk), interferencias electromagnéticas generadas por otra fuentes, son algunos inconvenientes que están constantemente presentes en este tipo de líneas.

xDSL fue desarrollado en su primera etapa por Bell Communications Research en el año de 1987 para suministrar video bajo demanda y aplicaciones de televisión interactiva sobre el par de cobre. La

arquitectura típica en xDSL consta de una central telefónica, interfaz para conmutación de circuitos y líneas dedicadas tendidas a cada uno de los usuarios (casa). Las principales tecnologías desarrolladas en xDSL son: ADSL, VDSL, HDSL y SDSL.

En la tabla 2.1 se puede apreciar una tabla con las principales características de la familia xDSL. Actualmente se están desarrollando otras tecnologías para la misma familia como HDSL2 y RADSL entre otras. Más acerca de estas tecnologías se puede encontrar en la página web de ETSI [59].

Tecnología	Tasa (kbps)	Líneas	Aplicaciones	Distancias
HDSL	1,544 2,048	2	T1 (Internet, LAN, etc.) E1 (Internet, LAN, etc.)	4 km
CAP-ADSL	1,500 cb 512 cs	1	Internet, LAN, video, Multimedia	4 km
DMT-ADSL	1,500 cb 512 cs	1	Internet, LAN, video, Multimedia	4 km
VDSL	12,960 cb 25,920 cb 51,840 cb 6.5-25.9 Mbps cs	2	Internet, LAN, Video, Multimedia, HDTV	1.5 km 1 km 0.3 km
SDSL	384, 768, 1000, 1500, 2000	1	T1 (Internet, LAN, etc.) E1 (Internet, LAN, etc.)	3 km

Tabla 2.1 – Estándares asociados con tecnologías xDSL.
cs = canal de subida, cb = canal de bajada,

2.2.3 FITL (Fiber In The Loop)

FITL no es un estándar de redes o un protocolo. Más bien es una opción para el transporte de datos digitales a través de fibra óptica. La fibra óptica presenta muchas ventajas y en los últimos años sigue siendo de gran consideración para redes basadas en ATM o en sistemas de distribución de televisión digital.

Existen tres posibles configuraciones que varían según donde sea colocado la ONU (unidad óptica de red). En una red de fibra óptica, ONU y OLT (Optical Line Termination) son términos utilizados

para referirse a las terminaciones físicas dentro de una red de distribución óptica. Un OLT se localiza del lado de la central, mientras que un ONU puede ser localizado directamente en la casa (FTTH "Fiber To The Home"), en un edificio (FTTB "Fiber To The Building"), o en el vecindario (FTTC "Fiber To The Curb") tal y como se muestra en la figura 2.1.

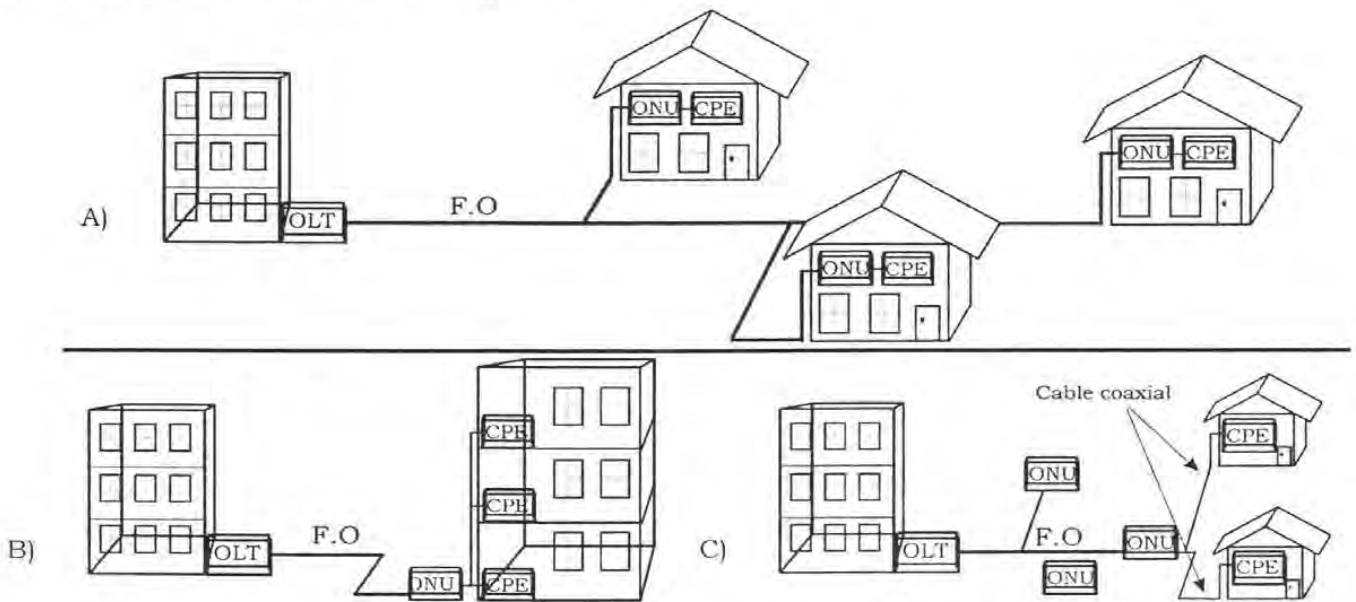


Figura 2.1 - Configuraciones para FTTL. a) FTTH b) FTTB c) FTTC.

En las tres configuraciones, la señal tiene que ser transmitida por broadcast hacia los usuarios finales (*downstream*), pero si se trata de una red de fibra óptica pasiva, tiene que utilizarse alguna técnica de acceso al medio para el camino de regreso (*upstream*), especialmente en el proceso de registro del usuario.

Para el caso de FTTB y FTTC, se puede utilizar cable coaxial o el par de cobre para completar la "última milla" del tramo desde el ONU hasta el usuario final. Para cubrir la "última milla" xDSL puede ser una buena opción y estándares como DOCSIS están diseñados para trabajar perfectamente sobre una configuración FTTC o FTTB pasiva, utilizando VDSL sobre par de cobre para el último tramo. También se han desarrollado conceptos como SDH/SONET (Synchronous Digital Hierarchy), PDH (Plesiochronous digital hierarchy) [53], sistemas APON (Asynchronous transfer mode over passive optical network) entre otros, para trabajar sobre fibra óptica.

El criterio para seleccionar FTTH, FTTB o FTTC, depende principalmente de los costos considerados por usuario final, que a su vez, depende de la densidad de usuarios por central y por supuesto, también depende del tipo de servicio que se ofrecerá al usuario.

2.2.4 CATV (Community Antenna Television)

Las redes CATV surgieron por el año de 1948 para distribuir señales de T.v. y radio, especialmente en aquellos lugares en donde por algún motivo, la señal normal de T.v. por radiodifusión no es de buena calidad. Sin embargo, debido a que este tipo de redes solían desperdiciar mucho ancho de banda, se empezaron a considerar para proveer distintos servicios de comunicación como: Internet de banda ancha, VoIP (telefonía sobre IP), T.v. interactiva, etcétera.

Una red CATV está formada principalmente de los siguientes componentes: Central (headend), troncal (trunk cables), amplificador (amplifier), alimentador (feeder), divisor (splitter), cable de bajada (drop cables), bifurcador (tap) y equipo Terminal (Terminal equipment). Todos estos componentes se combinan muy comúnmente en una arquitectura de tipo árbol, tal y como se muestra en la figura 2.2.

La central recolecta canales de T.v. por medio de diferentes tecnologías, ya sea vía satélite, por radiodifusión o incluso produciéndolos internamente. Después, para hacer llegar estos canales de T.v. hasta los usuarios finales, primero se manda por medio de troncales hasta las zonas residenciales, donde por medio de divisores la señal puede dividirse en varias ramificaciones. El cable que se tira alrededor de una zona residencial se conoce como alimentador (feeder). La interfaz entre troncales y alimentadores se hace mediante *bridge*. Finalmente se utilizan bifurcadores (tap) para conectar varios

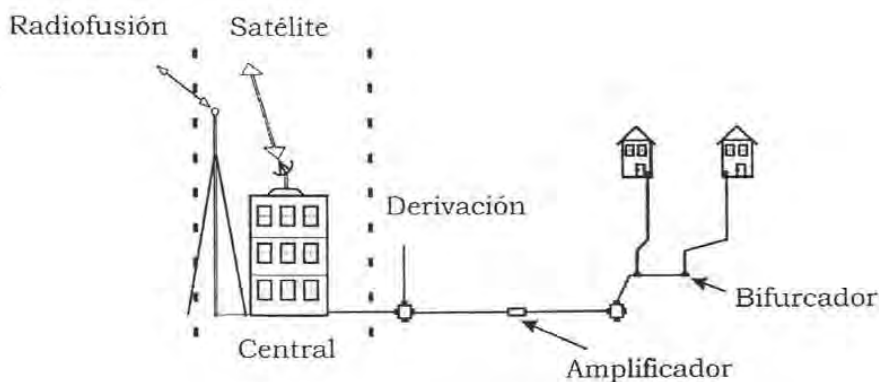


Figura 2.2 – Arquitectura de una red CATV.

usuarios a la red, y el cable que va desde un *tap* hasta el usuario final, es conocido como cable de bajada (drop cable).

Como se menciona en [35], las redes CATV han ido sufriendo constantes modificaciones y además de la topología de árbol, se desarrollaron las topologías de estrella y de anillo, cada una con sus ventajas y desventajas. Después, se desarrolló la tecnología HFC (Hybrid Fiber Coaxial), donde se utiliza fibra óptica para alimentar grupos que pueden ir de 500 hasta 2000 usuarios [44] y cable coaxial para llevar la señal hasta el usuario final. Hoy se prefiere una topología tipo árbol en la porción de red de fibra óptica, y una topología de tipo estrella desde el nodo óptico hasta el usuario final. Finalmente, surgió la tecnología cable modem, dispositivo que además de convertir señales analógicas en señales digitales, permitió el manejo de señales bidireccionales, Internet de banda ancha, y sobre todo, el uso de conmutación de paquetes, permitiendo así el transporte eficiente de datos como multimedia, video, etcétera. Paralelamente, se desarrollaron técnicas de acceso al medio para permitir conexiones punto a multipunto así como técnicas que permitieran mejorar el desempeño de la red como técnicas de modulación, códigos correctores, algoritmos de registro, seguridad, QoS, etcétera. En la figura 2.3, puede apreciarse una red CATV utilizando HFC y cable modem en el usuario final.

Finalmente, surgió la necesidad de estandarizar estos nuevos servicios y obtener las ventajas que esto conlleva. Muchos grupos propusieron sus propios estándares y otros tantos surgieron de la combinación de algunos de ellos. En las siguientes páginas se hace una breve descripción de los más sobresalientes y de entre los cuales destacan: DVB/DAVIC y DOCSIS. En [50] se puede encontrar información sobre grupos que han hecho trabajos al respecto como: ATM forum, IETF (Internet Engineering Task Force) y SCTE (Society of Cable Telecommunications Engineering).

DVB/DAVIC

DVB (Digital Video Broadcasting) es un proyecto que surgió en el año de 1992 y que desde entonces ha desarrollado varios estándares. Uno de ellos "ETSI ES 200 800" [14], mejor conocido como DVB/DAVIC surgió de la adopción de las recomendaciones de DAVIC (Digital Audio Visual Council) con respecto a redes CATV.

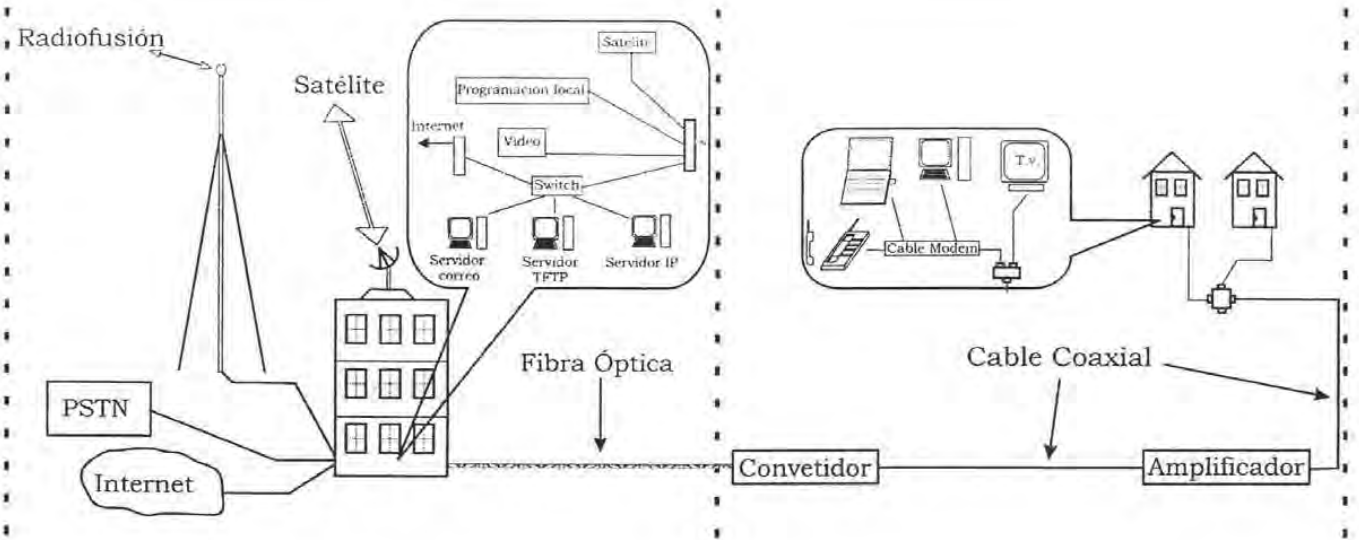


Figura 2.3 – Red CATV utilizando HFC y cable MODEM.

DOCSIS

DOCSIS de sus siglas en inglés “Data Over Cable Service Interface Specifications” es un estándar que se creó para tecnologías que entregan datos a alta velocidad sobre redes híbridas (fibra óptica y cable coaxial) conocidas como HFC (Hybrid Fiber-Coax) [34]. DOCSIS define los procedimientos a seguir en los niveles de capa física y capa MAC (Medium Access Control).

Para lograr que DOCSIS fuera más eficiente, este heredó de otros protocolos características como fragmentación (permite dividir paquetes grandes en varios paquetes pequeños que se pueden transmitir con más facilidad), concatenación (junta varios paquetes muy pequeños en uno solo), *piggybacking* (método para solicitar más tiempo de transmisión usando cabeceras extendidas, sin necesidad de entrar en contención). Además, DOCSIS soporta QoS, encriptación (incluso en multicast), diferentes clases de servicios (incluyendo servicios en tiempo real), seguridad, VoIP (Voz sobre IP), datos ATM, supresión de encabezados, etcétera. Se puede consultar [17, 20, 34, 51 y 57] para una descripción más detallada del protocolo DOCSIS.

2.3 SISTEMAS MÓVILES DE BANDA ANCHA

Cuando hablamos de sistemas móviles, comúnmente estamos refiriéndonos a sistemas celulares. En la sección 1.1, hay una pequeña introducción a los mismos, por lo que aquí nos enfocaremos a repasar aquellos sistemas celulares actuales que son capaces de transmitir y recibir datos a una tasa de transferencia que varía según el estándar.

Hoy en día, los sistemas móviles o sistemas celulares, no pueden compararse con las tecnologías alámbricas en lo que respecta a su capacidad de transmisión, ya que es baja en comparación. Sin embargo, se están haciendo grandes esfuerzos para mejorar las tasas de transmisión y actualmente los sistemas celulares pueden proveer de mayor ancho de banda que la que soportaban las compañías telefónicas convencionales en un principio.

2.3.1 GSM (Global System for Mobile Communication)

GSM ha tenido un espectacular crecimiento desde que surgió en junio de 1982 en Viena bajo la dirección de CEPT (Conférence Européene des Administrations des Postes et des Télécommunications) [58] con el nombre de Groupe Spéciale Mobile "GSM" [2].

En GSM, se utilizan tanto FDD (Frequency Division Duplex) como TDD (Time Division Duplex) basado por supuesto en el concepto de células (que implica planeación geográfica por medio de células hexagonales y rehúso de frecuencias). También se permite salto de frecuencias (Frequency Hopping) a velocidades muy bajas [52] para evitar interferencias en la señal o para incrementar la capacidad efectiva de la red. Cada canal en GSM es de 200 kHz y un *frame* consta de 4.62 (120/26) ms que comprende 8 *slots*. A su vez, cada *slots* consiste de 316 bits, de los cuales 260 son usados para voz o 120 y 240 bits para datos.

GSM utiliza el concepto de canales lógicos que es la asignación de *slots* a un usuario. Utiliza también CRC (Cyclic Redundancy Check) y códigos convolucionales para corrección de errores, ecualización adaptativa, y soporta por estándar el uso de codec con tasas de 6.5 kbps ó 12.2kbps [2].

Para la transmisión de datos, GSM como tal utiliza una adaptación de ISDN "C.C.I.T.T V.110" [19] que le permite reducidas tasas de transmisión de máximo 9.6 kbps. Aunque existen tres opciones para implementar nuevas tasas de transmisión de datos que son:

- 1) *High bit rate circuit switched data services*: El cual se basa en el uso de varios canales en paralelo alcanzando velocidades de hasta 57.6 kbps.
- 2) *Packet oriented data services with variable bit rates*: El cual alcanzaría velocidades de hasta 115 kbps con el inconveniente de tener que realizar sustanciosos cambios en la red, ya que GSM se basa en conmutación por circuitos. Sin embargo, esta técnica está comercialmente disponible con UMTS (Universal Mobile Telecommunications system) del cual, se verá una breve descripción más adelante.
- 3) *Multimedia data service*: Se basa en conmutación por paquetes y es técnicamente compatible con GSM. El estándar se denomina EDGE (Enhanced Data rates for GSM Evolution) y también haremos una breve descripción en las siguientes líneas.

Finalmente está GPRS (General Packet Radio Service) el cual se podría decir que es un anexo para redes GSM y que está diseñado únicamente para transmisión de datos. Una muy breve descripción se hace en las siguientes líneas.

2.3.1.1 GPRS (General Packet Radio Service)

Con GPRS se intenta mejorar el uso del canal físico y representa la primera implantación de conmutación por paquetes sobre GSM. La cantidad de usuarios en el sistema dependerá de las aplicaciones de cada uno y de la cantidad de datos que estén intercambiando, para poder tener una tasa de transferencia flexible, GSM puede asignar uno o más canales físicos a un solo usuario. GSM, es ideal para aplicaciones de e-mail o Internet y soporta protocolos como TCP/IP o X.25.

GPRS también utiliza códigos convolucionales para codificar y Viterby para decodificar. Soporta concatenación de datos, utiliza FDD, TDM y TDMA para establecer conexiones. Con GSM se pueden enviar datos mientras se utiliza el servicio de voz. El canal de bajada es controlado por la central y para que un usuario pueda utilizar el canal de subida primero debe hacer reservaciones por medio de

peticiones, las cuales deben entrar en contención (pueden colisionar). Para resolver colisiones GPRS utiliza Aloha ranurado.

Finalmente, la tasa real de transferencia es difícil de determinar, puesto que no hay un límite definido y este puede variar de acuerdo a la cantidad de usuarios en el momento, por lo que tampoco se puede garantizar una tasa fija máxima de transferencia en todo momento. *Picos variables de velocidades pueden ir desde unos cuantos bits hasta arriba de 171.2 kbps* [42], en condiciones reales, se calcula una tasa máxima por encima de los 100 kbps, en [16] se hace un buen estudio de desempeño sobre GPRS.

2.3.1.2 EDGE (Enhanced Data rates for GSM Evolution)

Se podría decir que EDGE es una implementación más completa que GPRS, soporta tanto conmutación de circuitos (ECSD “Enhanced Circuit Switched Data”) como conmutación de paquetes (EGPRS “Enhanced General Packet Radio Service”). La implementación de EDGE sobre una red GSM es más difícil que en GPRS debido a que se ocupan más cambios, incluyendo cambios en las estaciones base y en los dispositivos móviles (celulares).

EDGE utiliza mejores esquemas de modulación (QPSK) y codificación para alcanzar tasas de transmisión de hasta 69 kbps por cada canal físico de GSM, y si utiliza los ocho *slots* máximos disponibles en paralelo, se alcanzarían velocidades de hasta 384 kbps.

2.3.2 UMTS (Universal Mobile Telecommunications System)

El término de UMTS surgió por primera vez del grupo RACE (1984-1994) (Research and Development in Advanced Communications Technologies in Europe). La responsabilidad de desarrollar el estándar UMTS fue asignada en un principio al grupo ETSI (European Telecommunications Standards Institute) aunque después, en diciembre del año 1998, surgió otro grupo llamado 3GPP (Third Generation Partnership Project) con la finalidad de juntar las principales organizaciones mundiales en la materia para definir un solo estándar, pero en el 2001, 3GPP se dividió en dos grupos: UTRAN (UMTS Terrestrial Radio Access Network) apoyado por Europa en conjunto con Asia, y cdma200 desarrollado por los Estados Unidos.

UMTS ofrece capacidades de transmisión comparables a ISDN, ofrece servicio de texto, voz, datos e imágenes sobre una sola conexión, se pretende dar cobertura a casas, negocios, peatones, automóviles, trenes e incluso vehículos aéreos. Realizar cambios de conexión entre operadores distintos es fácil para UMTS. Las tasas máximas de transferencia para UMTS según se indica en [47] son: 144 kbps para macrocélulas, arriba de 384 kbps para microcélulas y 2 Mbps para picocelulas o interiores.

En UTRA (UMTS Terrestrial Radio Access) se puede tener más de un enlace con diferentes células simultáneamente (para *handoff*), maneja TDD y FDD y por el caso de TDD, también se utiliza un híbrido de TDMA con CDMA conocido como TD-CDMA [47], lo que significa que más de una transmisión puede realizarse dentro de un mismo *slots* usando diferentes códigos de dispersión. Un *frame* tiene 10 ms de duración y existen 15 *slots* de tiempo por frame.

2.3.3 CDMA2000

Cdma2000 es una evolución de cdma one (y es compatible con IS-95B, quien también posee tecnología CDMA) desarrollado por 3G PP2 (Third Generation Partnership Project 2) y apoyado por Japón, China, Corea y Estados Unidos. Lanzado por primera vez en Octubre del 2000 en Corea, alcanza velocidades de transferencia de 144 kbps y se espera que en un futuro alcance velocidades de 307 kbps.

2.4 SISTEMAS INALÁMBRICOS DE BANDA ANCHA

En lo últimos años, se ha suscitado un gran interés por las redes inalámbricas de banda ancha. Quizá debido al gran auge de laptop y de numerosos dispositivos móviles como PDA (Personal Digital Agend) que demandan el uso de redes que permitan cierta movilidad y capacidad para transferir grandes cantidades de información (multimedia).

Al igual que en los sistemas telefónicos celulares, han surgido una gran cantidad de grupos con propuestas diferentes, surgiendo así una gran variedad de estándares. En los renglones de abajo, se incluyen solo los principales estándares o aquellos que tengan aportación como objeto de estudio (WLAN) ha este trabajo.

2.4.1 REDES WLAN: IEEE 802.11, HIPERLAN y WATM

IEEE 802.11 ya establecido en el mercado desde hace tiempo, puede proveer 11 Mbps en su versión 802.11b, utiliza espectro disperso y CSMA/CA (Collision Avoid/Carrier Sense Multiple Access) para acceder al medio. Utiliza RTS/CTS (Request To Send/Clear To Send) para resolver el problema de terminales ocultas y el algoritmo *exponential backoff* para resolver colisiones [8]. No soporta calidad y servicio (aunque utiliza esquemas de prioridad) y los retardos son impredecibles, utiliza las bandas libres del espectro ISM (Industrial, Scientific and Medical bands) y puede configurarse en modo Ad Hoc (DCF "Distributed Coordination Function") es decir punto a punto, o en modo con infraestructura (PC "Point Coordination Function") que es igual que punto a multipunto. Utiliza el concepto de *beacons* (Avisos) y hoy en día está disponible la versión 802.11g en el mercado, el cual utiliza OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) con lo que puede soportar tasas de hasta 54 Mbps.

HIPERLAN es muy similar a IEEE 802.11, quizá la principal diferencia es que el primero fue desarrollado en Europa por ETSI. Transmite a tasas de 24 Mbps y opera a frecuencias cercanas a los 5 GHz. Una nueva versión llamada HiperLAN2, opera con tasas de transmisión de 54 Mbps y permitirá conexiones con redes UMTS, ATM y redes basadas en IP con coberturas de hasta 200 metros [2].

WATM es una tecnología que provee de una conexión inalámbrica de banda ancha con ayuda de un nodo de una red ATM fija. Fue creada en 1996 por el grupo ATM working group. Permite conexiones con QoS. Trabaja a frecuencias en el rango de los 5 GHz (coberturas de 80 metros, 30 MHz de banda disponible para tasas de transmisión de 25 Mbps), o a frecuencias de 59-64 GHz (coberturas de 15 metros, 150-700 MHz de banda disponible para tasas de transmisión de 155-700 MHz. En [46] se puede encontrar una breve descripción de arquitecturas WATM.

Las tres tecnologías pueden considerarse inalámbricas de banda ancha, sin embargo, como puede verse en la figura 3.1 ambas redes pertenecen al dominio de redes WLAN con coberturas aproximadas de 100-150 metros, lo cual significa que lejos de competir con tecnologías WMAN como HIPERMAN ó IEEE 802.16, éstas pueden complementarse.

2.4.2 HIPERACCES & HIPERMAN

HIPERACCESS es un estándar de tipo WMAN sobre sistemas de acceso inalámbrico de banda ancha, diseñado como una alternativa a redes de acceso con cable. Ha sido diseñado para trabajar óptimamente en frecuencias entre 40.5-43.5 GHz y 31.8-33.4 GHz.

HIPERMAN ha sido desarrollado para trabajar a frecuencias entre los 2 y 11 GHz. Está diseñado para proveer acceso inalámbrico fijo de banda ancha.

Ambos estándares han sido desarrollados por la comunidad Europea ETSI BRAN (European Telecommunications Standards Institute / Broadband Radio Access Networks) [59] en muy cercana colaboración con IEEE 802.16, especialmente HIPERMAN, al grado de ser este último totalmente compatible con la versión IEEE 802.16a-2003.

2.4.3 IEEE 802.16

IEEE 802.16 es un estándar que permite conexiones con banda ancha a coberturas de varios kilómetros por lo que entra en el dominio de WMAN. Debido a que se trata del estándar que nos ocupa en este trabajo, dedicamos el siguiente capítulo exclusivamente para su descripción.

2.5 CONCLUSIONES

Actualmente podemos ver que las tecnologías con más capacidad, son aquellas que necesitan de un medio físico como fibra óptica o cables para proveer sus servicios, por lo tanto, tienen la gran limitante de necesitar mucha infraestructura, lo que hace difícil, lento y caro su implementación.

Las redes inalámbricas cuentan con buen desarrollo pero con coberturas pequeñas, lo que le da el inconveniente de necesitar que otra red les de un punto de acceso. Finalmente, los sistemas celulares no cuentan aún con un desarrollo lo suficientemente bueno como para proveer un ancho de banda de acuerdo a las necesidades y cantidades de usuarios en materia de transmisión de datos a precios accesibles.

Por eso, los sistemas BWA (Broadband Wireless Access) son la solución idónea. Su interfaz inalámbrica lo hace de fácil despliegue y crecimiento. Su gran ancho de banda permite satisfacer necesidades familiares, de oficinas e incluso de industrias. Las posibles aplicaciones de tener una red (o Internet) con conexión inalámbrica y grandes coberturas, da paso a un sin fin de aplicaciones, limitado prácticamente solo por la imaginación.

Por todo esto y más, los sistemas BWA prometen ser grandes protagonistas durante las siguientes décadas.

CAPÍTULO 3

DESCRIPCIÓN DEL ESTÁNDAR IEEE802.16

3.1 INTRODUCCIÓN

Como ya hemos mencionado anteriormente, el estándar IEEE 802.16 se refiere a una red tipo MAN (Metropolitan Area Network) inalámbrica de gran ancho de banda y diseñado para soportar el protocolo IP. En la figura 3.1 podemos apreciar las distintas clasificaciones de redes según su extensión de cobertura. Como podemos ver, el estándar IEEE802.16 también puede clasificarse como una red tipo WAM sin ningún problema.

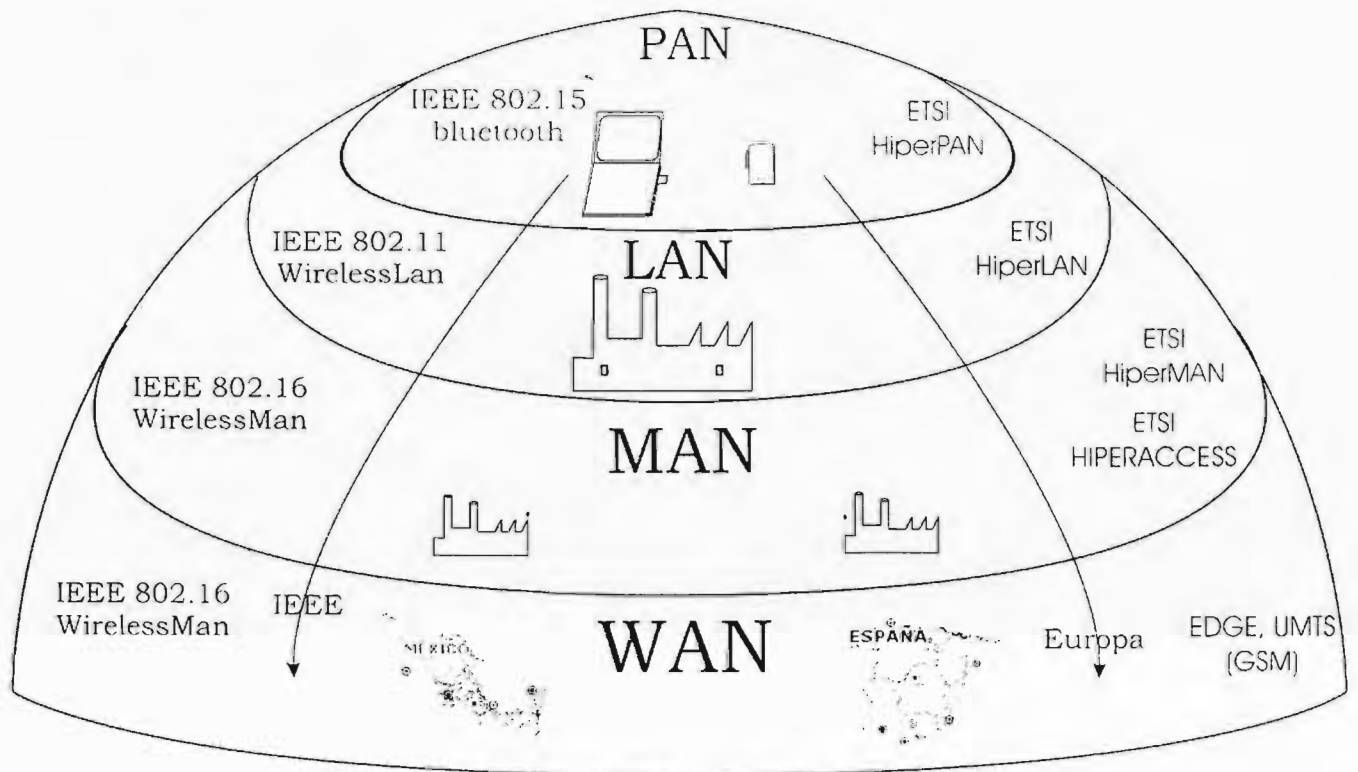


Figura 3.1 - Clasificación de redes por su extensión de cobertura.

La gran versatilidad de diseño del estándar IEEE 802.16, permite que se pueda utilizar en gran cantidad de escenarios diferentes, en la figura 3.2, se muestra la forma de proveer de una conexión, a usuarios dentro de una misma ciudad cuyos requerimientos difieren en gran medida. Por otro lado, en un ambiente rural donde seguramente sería difícil introducir una red de fibra óptica o de cable coaxial, IEEE 802.16 sería una solución rápida, económica y de muy fácil despliegue para banda ancha.

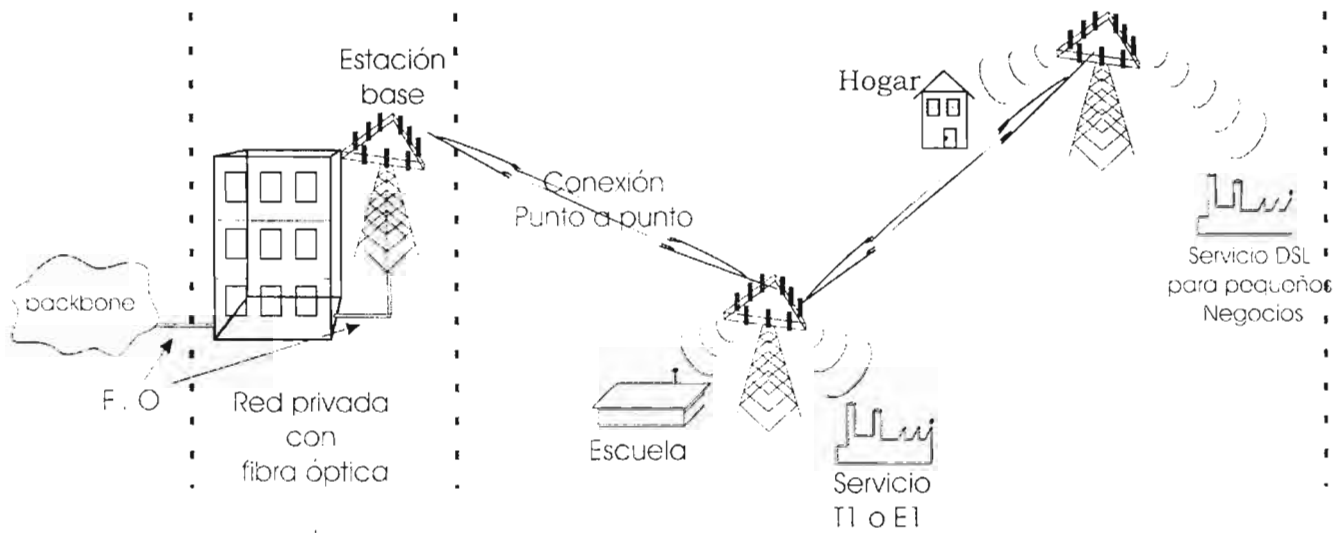


Figura 3.2 – Posible escenario de una red inalámbrica basada en el estándar IEEE 802.16.

Por otra parte, en una ciudad, tal y como se muestra en la figura 3.3, la gran cantidad de servicios que podemos proveer es simplemente incontable. Incluso, al contrario de lo que piensan muchos técnicos que desconocen el verdadero funcionamiento del estándar IEEE 802.16, combinado con IEEE 802.11 sería un gran complemento (ver figura 3.4).

Los sistemas BWA (Broadband Wireless Access) basados en el estándar IEEE 802.16, proveen de una comunicación de banda ancha a negocios, hogares o cualquier tipo de usuario (En los Estados Unidos se usa el término SOHO (Small Office/Home Office) para definir este tipo de usuario). IEEE 802.16 es una alternativa inalámbrica a los sistemas de banda ancha en “la última milla”, es decir, a los sistemas que utilizan en el último tramo del enlace, fibra óptica o cable coaxial para llegar al usuario final.

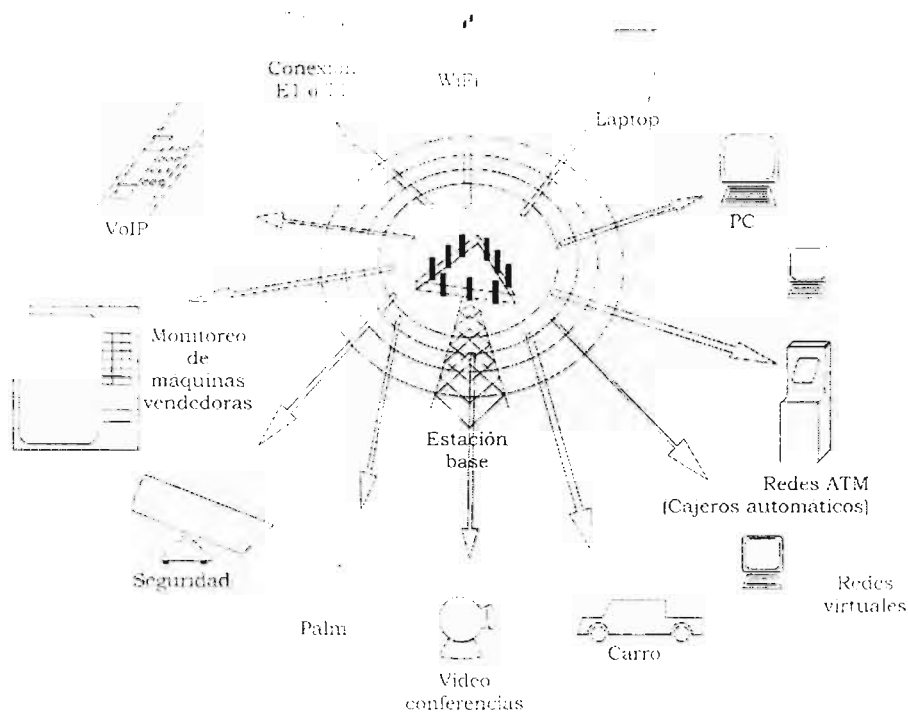


Figura 3.3 – Servicios que puede proveer una red basada en el estándar IEEE 802.16.

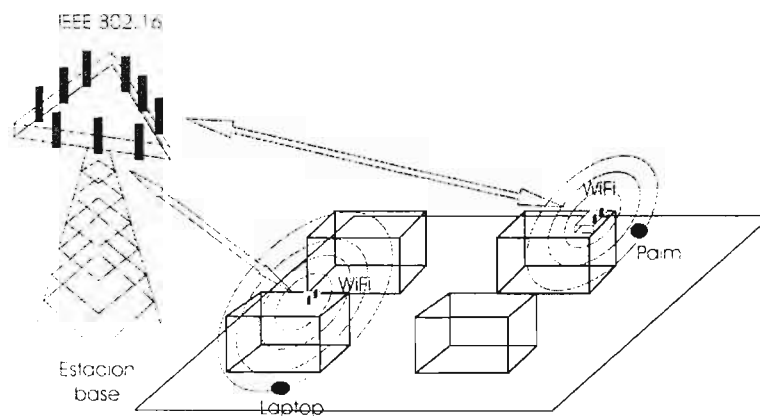


Figura 3.4 – Hotspot (WiFi) conectado a Internet a través de una estación base IEEE 802.16.

Como podemos ver, IEEE 802.16 soporta una gran variedad de servicio y puede ser configurado para distintos escenarios según sea la necesidad. Esto se debe en gran medida a la gran variedad de técnicas como son: TDD, FDD, TDMA, DAMA, OFDM, QoS, etcétera, los cuales describiremos con más detalle en la sección 3.3.

3.2 FORMACIÓN DEL ESTÁNDAR

La alta demanda que se ha dado en los últimos años por una conexión de alta velocidad a Internet, comunicación con voz, transferencia de datos, video teleconferencia, etc. Ha propiciado el constante crecimiento de las redes de banda ancha. *Debido a que estos resultan fáciles de desplegar, y con un bajo costo de infraestructura [1], muchos países comenzaron a desarrollar soluciones BWA como una alternativa a las técnicas de acceso de banda ancha. Además, los sistemas BWA son fáciles de expandir, son de gran escalabilidad, no tienen limitación por distancia debido al cable, su mantenimiento es de bajo costo, son fáciles de actualizar, son de rápida instalación y proveen gran cantidad de servicios entre otras ventajas más.*

Muchos países habilitaron bandas del espectro para los sistemas de banda ancha, *Actualmente existen bandas disponibles en los 3.5 GHz para BWA en América de sur, Asia, Europa y Canadá. La banda de 10.5 GHz se está usando en América central y del sur así como en Asia [9].*

Los sistemas BWA han recibido distintos nombres, por ejemplo en los Estados Unidos recibe varios nombres: LMDS (Local Multipoint Distribution Service), IEEE 802.16, sistemas BWA (Broadband Wireless Access), entre otros términos más. En Europa se conoce como BRAN (Broadband Radio Access Networks). En Canadá y algunos otros países, se conoce como LMCS (Local Multipoint Communications System) [4].

Sin embargo, la necesidad de un estándar que unificara criterios, se hacia cada vez más apremiante. Un estándar global permitiría hacer compatibles a los distintos sistemas BWA para una posible conexión entre diferentes compañías, permitiría a las distintas industrias fabricar el mismo tipo de componentes abaratando los costos. Además, lograría unificar esfuerzos y lograr un mejor y más eficiente desarrollo de los sistemas BWA.

3.2.1 RESEÑA HISTÓRICA

En abril de 1998, la N-WEST (National Wireless Electronic System Testbed) empezó los primeros intentos de estandarizar los sistemas BWA, en Julio de ese año, se celebró una reunión con tan solo diez miembros, para Agosto, se contaba con 40 miembros. En la actualidad existen más de 200 miembros entre los que se encuentran organizaciones, fabricantes de semiconductores, dispositivos y componentes electrónicos, compañías importantes en comunicaciones, grupos de investigadores, laboratorios, operadores, consultores etcétera.

En Noviembre de 1998, la junta de IEEE 802 presentó un documento llamado "Broadband Wireless Access Technology and Standarts" (Tecnología y estándar para sistemas de banda ancha inalámbricos). En el que fijaron los siguientes objetivos:

- a) Usar enlaces inalámbricos con microondas o con ondas de rango milimétricas.
- b) Usar bandas del espectro con licencia de uso libre (en lo posible).
- c) Que fueran redes de cobertura Metropolitana (Metropolitan Area Network).
- d) Proveer servicios con cuotas accesibles (en lo posible).
- e) Usar arquitectura de Punto-Multipunto.
- f) Proveer tráfico de datos heterogéneos y proveer QoS.
- g) Soportar tasa de datos mayores a 2 Mbps.

En marzo de 1999, el comité ejecutivo de la IEEE 802 aprobó el documento BWA PAR (Project Authorization Request) y el grupo "802.16 Working Group on Broadband Wireless Access".

En Noviembre del 2001 se aprobó el estándar inicial IEEE 802.16, y finalmente el 11 de noviembre del 2002, se aprobó el proyecto 802.16e [27], el cual pretende lograr que los sistemas BWA soporten movilidad en los usuarios. Precisamente es en esta área, donde se está trabajando con esta tesis.

Otros organismos han intentado establecer sus propios estándares para sistemas BWA, por ejemplo, ETSI -BRAN que es un proyecto Europeo o ITU-R e ITU-T. Aunque el estándar IEEE 802.16 es el que más ha sobresalido y por ende, prácticamente se ha consolidado. Esto ha sucedido debido a la

gran robustez y mayor eficiencia que confiere al sistema, además, como ya se ha mencionado, por contar con el apoyo de más de 70 empresas líderes en el ramo de las telecomunicaciones.

En el mes de junio del año 2001, se creó una organización de nombre WiMAX forum [67] ,cuyo propósito es acelerar la introducción y promover el uso de tecnologías BWA (broadband Wireless Access) así como certificar la compatibilidad de productos de acuerdo con los estándares IEEE 802.16 y ETSI HIPERMAN. Según estimaciones de esta organización, los primeros CPE (Customer Premises Equipment) que serán externos y en forma de plato (como los de televisión por satélite), estarán disponibles a finales del año 2005 o principios del 2006 con un costo estimado de 350 dólares. La segunda generación de CPE que serán internos y similares a un modem, estarán disponibles en el año 2006 y con un costo aproximado de 250 dólares. La tercera generación de CPE, a un costo de 100 dólares y disponibles a finales del 2006 o comienzos del 2007, serán portátiles y podrán estar integrados dentro de laptop.

3.2.2 NÚMERO DE VERSIONES

Desde la aparición de la primera versión del estándar IEEE802.16 en abril del 2002 se han ido desarrollando mejoras y adaptaciones que han sido registradas como nuevas versiones dentro del mismo estándar. En la tabla 3.1 se tiene un resumen de las principales versiones. Por supuesto, la naturaleza de este trabajo nos obliga a ahondar un poco más en el proyecto 802.16e que aún no pasa a formar oficialmente parte de la familia IEEE802.16 como un estándar.

En Julio del 2002, el "IEEE Working Group 802.16 on Broadband Wireless Access" inició un grupo de trabajo denominado "IEEE 802.16 Mobile Wireless MAN Study Group" el cual a su vez logró, el 12 de diciembre del año 2002, la autorización del proyecto número **802.16e** [61] el cual lleva como título: *Amendment to IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks - Part 16: Air Interface for Fixed and Mobile Broadband Wireless Access Systems - Amendment for Physical and Medium Access Control Layers for Combined Fixed and Mobile Operation in Licensed Bands.*

El objetivo del proyecto **802.16e**, es modificar y mejorar los estándares 802.16/802.16a para que puedan:

	TIPO	COMENTARIO
Estándar aprobados		
IEEE estándar 802.16-2004	Interface aérea	Interface aérea para sistemas BWA para soportar servicios multimedia en la frecuencias de 10-66 GHz (Revisión del Std. 802.16-2001) [24]
IEEE estándar 802.16.2-2004	coexistencia	Recomendaciones para facilitar coexistencia en sistemas BWA fijos en las bandas 2-66 GHz con énfasis en fr. 3.5, 10.5 y 23.5-43.5 GHz [26]
IEEE estándar 802.16/conformance01-2003	Interface aérea	Parte 1: PICS para ISO/IEC 9346-7(1995) y ITU-T X.296 en frecuencias de 10-66 GHz
IEEE estándar 802.16/conformance02-2003	Interface aérea	Parte 2: presenta TSS y TP para ISO/IEC 9646-1:1994, 9646-2:1995 y ITU-T X.290 y X.291 en las frecuencias de 10-66 GHz
IEEE estándar 802.16/conformance03-2004	Interface aérea	Parte 3: Presenta RCT para estaciones base y estaciones subscriptoras en frecuencias de 10-66 GHz
Estándar obsoletos		
IEEE estándar 802.16-2001	Interface aérea	Interface aérea para sistemas bwa fijos
IEEE estándar 802.16.2-2001	Coexistencia	Recomendaciones para coexistencia de bwa en la banda 10-66 GHz
IEEE estándar 802.16c-2002	Interface aérea	Mejora Std. 802.16-2001 para desarrollar sistemas en la banda 10-66 GHz
IEEE estándar 802.16a-2003	Coexistencia	Mejora Std. 802.16-2001 para soportar frecuencias entre 2-11 GHz Reemplazado por 802.16.2-2004
Proyectos en desarrollo		
IEEE draft 802.16e		Enmienda para combinar usuarios fijos y móviles en bandas con licencia
IEEE draft 802.16f		Anexo a Std. 802.16-2004 para definir MIB en las capas física y MAC, y en procedimientos de administración asociados
IEEE draft P802.16-2004/Cor1		Errata para Std. 802.16-2004
IEEE draft P802.16/Conformance04		Parte 4: PICS para frecuencias por debajo de los 11 GHz

PICS: Protocol Implementation Conformance Statement.

TSS & TP: Test Suite Structure & Test Purposes.

RCT: Radio Conformance Test.

MIB: Management Information Base.

Tabla 3.1 – Versiones del estándar IEEE 802.16.

- I. Soportar usuarios móviles a velocidades de automóvil.
- II. Soportar también a los anteriores usuarios fijos (802.16a), sin que estos tengan que sufrir modificaciones.
- III. Soportar *Handoff* entre las estaciones base o entre sectores definidos.
- IV. Limitarse a bandas con licencia ideales para movilidad, en el rango de [2-6] GHz.

Con esto se pretende incrementar el mercado para los sistemas BWA considerando el nuevo servicio de movilidad, y unir los servicios de “redes LAN de alta velocidad” y “sistemas celulares de alta movilidad” inexistente hasta ahora.

Como hemos mencionado anteriormente, este proyecto aún no ha sido terminado y sigue bajo investigación.

3.2.3 QUE DEFINE EL ESTÁNDAR

Cada una de las versiones del estándar IEEE 802.16 difieren un poco entre sí. Pero básicamente todos definen con algunas variantes la interfaz aérea de sistemas inalámbricos de banda ancha BWA (Broadband Wireless Access) en la capa física y en la capa de control de acceso al medio MAC (Medium Access Control).

3.3 ARQUITECTURA

La mayor parte de los sistemas de ancha banda inalámbricos fijos FBWA (Fixed Broadband Wireless Fixed), utilizan una arquitectura MP (Multi-Punto) que incluye PMP (Punto Multi-Punto) y mesh. Igualmente, por lo general, se incluyen los siguiente elementos: Estación base (Base station “BS”), Estación Suscriptora (Subscriber Station “SS”), equipo terminal (Terminal Equipment “TE”), equipo para el núcleo de la red, estaciones repetidoras (repeater station “RS”), enlaces entre celdas, y otros más.

Para los enlaces entre celdas, se pueden utilizar fibras ópticas, microondas, cables de cobre o inclusive un enlace de radio que provea de una conexión entre BS DS-3 (45 Mbps) y OC-3 (155 Mbps).

Los sistemas PMP contienen BS, SS y en algunos casos RS. Las BSs pueden utilizar una o varias antenas para cubrir los 360° de cobertura y se pueden usar más de una BS para cubrir el área geográfica. Los enlaces entre BS pueden en algunos casos, utilizar la misma frecuencia que el mismo sistema FBWA, dejando al núcleo de red la responsabilidad del ruteo. Los SSs deberán compartir siempre el medio, utilizando métodos de acceso como OFDM, TDMA o CDMA.

Los sistemas MESH funcionan de modo parecido a los sistemas PMP. En una dirección establecen una conexión con el núcleo de la red y en la otra dirección una conexión por radio con otra BS. El tráfico de datos, puede pasar por varias BSs para alcanzar un SS.

El subsistema de antenas dependerá mucho de las frecuencias utilizadas. En el orden de las microondas, se ocupan antenas altamente directivas para los SSs y es muy recomendable utilizar línea de vista (LOS). Para ondas milimétricas, las BSs pueden utilizar antenas adaptivas para mejorar el desempeño de las mismas y para los SSs se recomienda que utilicen antenas directivas, aunque menos que para el caso de microondas, para poder establecer una conexión NLOS (sin línea de vista) o Near-LOS si es necesario.

3.4 CAPA MAC

Para el caso de topologías PMP, el canal *downlink* o enlace de bajada (dirección BS a SS) es manejado por la BS, el cual puede definir múltiples sectores independientes entre sí con antenas sectorizadas. Dentro de un mismo sector y dentro de la misma frecuencia, todos los SSs reciben la misma señal y dado que solo una BS puede transmitir a la vez, no requiere coordinación con otras BSs en este sentido. Este enlace es en la mayoría de las veces es de tipo broadcast.

Para el caso de canal *uplink* (dirección SS a BS) todos los SSs deberán compartir el mismo canal y por lo tanto, deberán utilizar un protocolo de transmisión que controle las colisiones entre ellos y que

reparta los requerimientos de ancho de banda de acuerdo a los retardos y aplicaciones que cada usuario necesite. Esto se lleva a cabo a través de cuatro diferentes tipos de programación de servicio de subida, los cuales a su vez, pueden utilizar los procedimientos de *Polling* (consulta), *contention* (contención), y *unsolicited bandwidth grants* (asignación de ancho de banda sin solicitarlo). Un proveedor puede utilizar o mezclar estos mecanismos como mejor le convenga para obtener el mejor rendimiento de su sistema.

Para el caso de topologías MESH, la principal diferencia es que el flujo de tráfico no solo se da entre una BS y los SSs, sino que el tráfico puede ser ruteado hacia otros SSs, o incluso, el tráfico se puede dar directamente entre dos SSs. Dependiendo de que protocolo sea usado para transmitir, se puede utilizar un esquema distribuido basado en la igualdad, o un esquema centralizado.

3.4.1 DIRECCIONAMIENTO Y CONEXIONES

Cada estación subscriptora tiene una dirección MAC universal asociada, la cual consta de 48 bits y es utilizada durante el proceso de inicialización y de autenticación. Durante el proceso de inicialización, la dirección MAC sirve para que la BS pueda establecer todas las conexiones apropiadas que se asociaran con un usuario en particular. Durante el proceso de autenticación, la dirección MAC es utilizada para la identificación mutua de la BS y el SS.

Cada conexión es identificada por medio de identificador de conexión (CID) de 16 bits de tamaño que permite hasta 65 536 conexiones asociadas a un canal, ya sea *uplink* o *downlink*.

Durante el proceso de inicialización (sección 3.4.7), se establecen por lo menos dos pares de conexiones (una en enlace ascendente y otra en enlace descendente) entre la BS y el SS. Opcionalmente, se puede establecer un tercer par de conexiones para administración. Cada par de conexiones cuenta con una QoS diferente para manejo de tráfico entre la BS y el SS.

El primer par, conocido como conexión básica (Basic connection) es utilizado para intercambio de mensajes cortos y mensajes de administración urgentes. El segundo par de conexiones es conocido como conexión primaria (primary management connection) y se utiliza para el intercambio de

mensajes MAC más largos y no tan urgentes. El tercer par de conexiones, conocido como conexión secundaria (secondary management connection) se establece para el intercambio de mensajes de control que pueden ser muy largos y que pueden resultar con un retardo muy grande. Como en el caso de intercambio de mensajes basados en los protocolos DHCP, TFTP, SNMP, etcétera. En una conexión secundaria, los mensajes pueden ser empaquetados o fragmentados (sección 3.4.3).

Los CIDs para las conexiones son establecidos durante el proceso de inicialización (sección 3.4.7) y son usadas como un apuntador hacia el destino de la conexión, por lo que un CID proporciona información como el tipo de servicio que se está brindando a través de la misma y también del ancho de banda que se le está asignando, por lo que cada conexión podrá tener un ancho de banda disponible diferente. Finalmente, una sola conexión puede soportar tráfico proveniente de distintas sesiones de las capas superiores.

3.4.2 FORMATO DE LOS PAQUETES DE TRANSMISIÓN A NIVEL CAPA MAC

El transporte de información necesaria que se lleva a nivel de la capa MAC, se lleva a cabo mediante el procesamiento de paquetes provenientes del Punto de Acceso al Servicio (SAP) de la subcapa de convergencia. Durante este procesamiento se agregan encabezados. Cada MAC PDU (paquete en este nivel) deberá comenzar con un encabezado fijo llamado "Encabezado MAC", después seguirá la carga útil, la cual puede consistir de uno, ninguno o varios subencabezados, y de uno, ninguno, varios o fragmentos de datos provenientes de la subcapa superior. La carga útil puede variar en tamaño, lo que permite a la capa MAC transportar mensajes de capas superiores sin tener la necesidad de conocer los formatos. En la figura 3.5 se muestra el formato MAC PDU, como se ve, también existe la opción de agregar CRC (Cyclic Redundancy Code) al final.

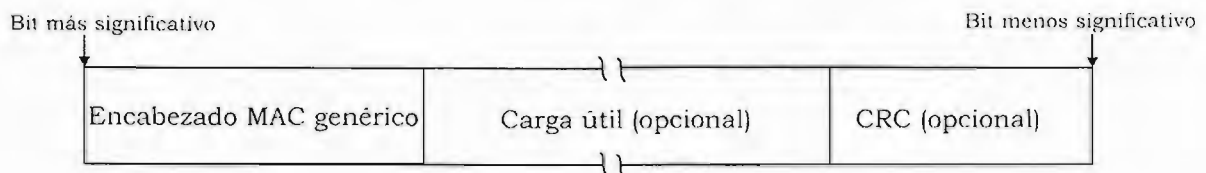


Figura 3.5 - Formato de paquete básico MAC PDU.

3.4.2.1 Formato de encabezados MAC

Existen dos tipos de encabezados MAC. El “encabezado MAC genérico” usado para mandar mensajes de administración o datos de capas superiores, y el “encabezado de requerimiento de ancho de banda” usado para pedir más ancho de banda (en este encabezado no se puede agregar carga útil). Dentro de los encabezados, existe un campo como se ve en la tabla 3.2, llamado HT (Header Type) en el cual se indica si se trata de un encabezado MAC genérico (0), o de un encabezado para requerimiento de ancho de banda (1).

Sintaxis	Tamaño	Notas
MAC header () {		
HT	1 bit	0 = Encabezado MAC genérico 1 = Encabezado de requerimiento de ancho de banda
EC	1 bit	If HT = 1, EC = 0 (indica si la carga útil va encriptada)
If (HT) = 0 {		Si “tipo de cabecera” = 0, entonces:
Type	6 bits	Tipo del subencabezado
Reserved	1 bit	Deberá ser cero
CI	1 bit	Deberá ser = 1 si se incluye CRC
EKS	2 bits	Secuencia de la llave de encriptado
Reserved		Deberá ser cero
LEN	11 bits	Tamaño en bytes del MAC PDU
}		
Else {		Si “tipo de cabecera” no es = 0, entonces:
Type	3 bits	Tipo del subencabezado para solicitar ancho de banda
BR	19 bits	Número de bytes que se están solicitando
}		
CID	16 bits	Identificador de conexión
HCS	8 bits	Para corrección de errores en el encabezado (HT)
}		

Tabla 3.2 – Formato del encabezado MAC.

3.4.2.2 Formato de Subencabezados

Existen cinco tipos de subencabezados, los cuales, deberán ser colocados inmediatamente después del encabezado MAC genérico. Los cinco subencabezados son: Fragmentación (se utiliza para descomponer un paquete proveniente de la subcapa superior (SDU) en varios paquetes MAC PDU), empaquetamiento (se utiliza para empaquetar varios paquetes provenientes de la subcapa superior (SDU) dentro de un mismo paquete MAC PDU), solicitud de ancho de banda (sirve para que el SS pueda comunicar a la BS que necesita más ancho de banda), retroalimentación rápida (cuando se utiliza OFDMA) y Mesh (utilizado cuando se está trabajando dentro de una topología Mesh).

Si los subencabezados de fragmentación y solicitud de ancho de banda son colocados al mismo tiempo, primero deberá ir el subencabezado de solicitud de ancho de banda. Si el subencabezado Mesh está presente junto con otros subencabezados, éste deberá preceder a todos, en cambio, si el subencabezado de retroalimentación rápida está presente, éste deberá ir hasta el último de los mismos. Los subencabezados de fragmentación y empaquetamiento son mutuamente excluyentes y nunca deberán estar juntos. En la figura 3.6 se muestran como se ven los subencabezados dentro del paquete MAC PDU.

Ejemplo A)	Encabezado MAC genérico	Subencabezado de Fragmentación	Carga útil (SDU fragmentado)			
Ejemplo B)	Encabezado MAC genérico	Subencabezado de Solicitud de ancho de banda	Subencabezado de empaquetamiento	Carga útil (Un SDU)	Subencabezado de empaquetamiento	Carga útil (Un SDU)

Figura 3.6 - Ejemplos de subencabezados PDU.

3.3.2.3 Mensajes de control MAC

Los mensajes de control MAC se tienen que colocar en el campo correspondiente a la carga útil del MAC PDU (figura 3.5) y cuentan con un campo que especifica el tipo de mensaje de control, tal y como se muestra en la figura 3.7.

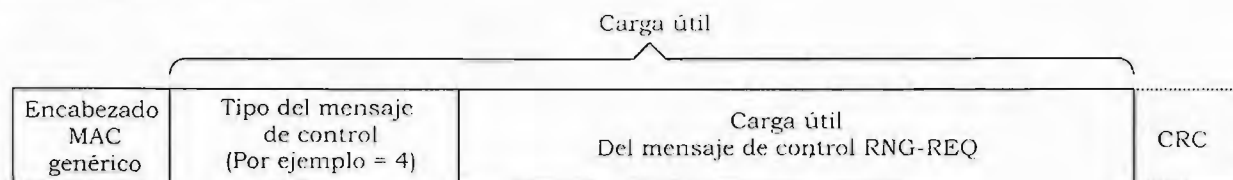


Figura 3.7 – Formato de los mensajes de control MAC.

A diferencia de los mensajes de control MAC que se envían mediante conexiones primarias, los mensajes enviados dentro de la conexión básica así como los utilizados dentro del proceso de inicialización, no pueden ser fragmentados ni empaquetados. En la tabla 3.3 se muestran los mensajes de control MAC utilizados en esta tesis (existen 49 en total).

Tipo	Nombre	Descripción	Conexión
0	UCD	Uplink Channel Descriptor	Broadcast
1	DCD	Downlink channel descriptor	Broadcast
2	DL-MAP	Downlink Access Definition	Broadcast
3	UL-MAP	Uplink Access Definition	Broadcast
4	RNG-REQ	Ranging request	Initial Ranging or Basic
5	RNG-RSP	Ranging response	Initial Ranging or Basic
6	REG-REQ	Registration request	Primary Management
7	REG-RSP	Resistration response	Primary Management
11	DSA-REQ	Dynamic Service Addition request	Primary Management
12	DSA-RSP	Dynamic Service Addition response	Primary Management
13	DSA-ACK	Dynamic Service Addition Acknowledge	Primary Management
26	SBC-REQ	SS Basic Capability request	Basic
27	SBC-RSP	SS Basic Capability response	Basic
30	DSX-RVD	DSx Received Message	Primary Management
31	TFTP-CPLT	Config File TFTP Complete message	Primary Management
32	TFTP-RSP	Config File TFTP Complete response	Primary Management
50-255		Reservados para usos futuros	

Tabla 3.3 – Mensajes de control MAC.

3.4.3 CONCATENACIÓN, FRAGMENTACIÓN, EMPAQUETAMIENTO, CRC, Y ENCRIPCIÓN

Concatenación: Se pueden concatenar varios MAC PDU en una sola transmisión, ya sea en el canal *uplink* o *downlink*. Cada mensaje MAC PDU debe ser identificado por un único CID de tal modo que el receptor pueda ser capaz de presentarlos en modo correcto hacia el SAP (Punto de acceso de servicio). Los mensajes de administración, datos y requerimientos de ancho de banda, pueden ser concatenados dentro de una sola transmisión.

Fragmentación: Es el proceso mediante el cual un MAC SDU se divide en uno o más MAC PDU, esto con el fin de hacer más eficiente el uso del ancho de banda disponible de acuerdo con los requerimientos de QoS del flujo de servicio de la conexión.

Una fragmentación se puede ejecutar desde el SS para enviarse en el canal de subida, o desde la BS para enviarse en el canal de bajada. Solo puede ejecutarse un proceso de fragmentación al mismo tiempo en la misma conexión.

Las reglas para fragmentar se definen cuando se crea una conexión en el SAP MAC. En cada paquete fragmentado se debe indicar el número de la secuencia de acuerdo a la tabla 3.4. Esta secuencia permite al SS recrear la secuencia original y detectar la pérdida de algún paquete intermedio. Si se detecta la pérdida de algún paquete fragmentado, el SS descarta todo los MAC PDU en la conexión hasta que un nuevo MAC PDU o MAC PDU fragmentado sea detectado.

Fragmentación	FC (Fragmentation Control)	FSN (fragment Sequence number)
Primera fragmentación	10	Incrementar módulo 8
Continuar con la fragmentación	11	Incrementar módulo 8
Ultima fragmentación	01	Incrementar módulo 8
Sin fragmentar	00	Incrementar módulo 8

Tabla 3.4 - Reglas para fragmentación.

Empaquetamiento: Cuando el servicio de empaquetamiento ha sido activado, el MAC puede empaquetar múltiples MAC SDU dentro de un solo PDU MAC. El mecanismo de empaquetamiento toma de los atributos de conexión, si la conexión lleva paquetes de longitud variable o de longitud fija, ya que dependiendo de esto, cambia el mecanismo de empaquetamiento.

CRC: Dentro de una conexión, un determinado flujo de servicio puede requerir que se agreguen CRC en los PDU MAC. Para este caso, se deberá incluir CRC tal y como se define en IEEE 802.3 en cada PDU MAC con el campo de HT igual a cero. El CRC deberá abarcar encabezado MAC y la carga útil del PDU MAC. Obligatoriamente, CRC se deberá calcular después de la encriptación.

Encriptación: Cuando se transmite un PDU MAC en una conexión que es mapeada a un SA (Security Association), la parte transmisora deberá ejecutar un procedimiento de encriptación y autenticación en la carga útil del PDU MAC, a como se halla especificado en el SA. Por su parte, cuando se reciba un PDU MAC en una conexión mapeado a un SA, el receptor ejecutará la desencriptación y autenticación de la carga útil del PDU MAC.

El encabezado MAC genérico no deberá ser encriptado, debido a que dentro del mismo, está contenida toda la información de encriptación necesaria para que el receptor pueda desencriptar la carga útil del PDU MAC.

3.4.4 SERVICIO DE PROGRAMACIÓN DE TRANSMISIÓN ASCENDENTE

Para hacer más eficientes los procesos de asignación y de ancho de banda, se han definido cuatro tipos de servicio para la transmisión en el canal *uplink* (canal de subida). Cada uno corresponde a un tipo especial de tráfico generado por un SS. Apoyado en esta distinción, la BS puede anticipar los requerimientos de ancho de banda y retardos y proveer las asignaciones en los momentos adecuados. Los cuatro servicios básicos son:

UGS (Unsolicited Grant Service): Esta diseñado para soportar servicios en tiempo real que generan paquetes de datos de tamaño fijo y periódico como los son voz sobre IP sin supresores de silencio o servicios E1/T1 por mencionar algunos. Asignar oportunidades de transmisión en forma

constante y en tiempo real, permite reducir retardos, asegurar el ancho de banda y eliminar un exceso de encabezados. Para poder aprovechar al máximo estas características, se le prohíbe al SS enviar solicitudes de ancho de banda en las regiones de contención, y la BS no podrá asignar oportunidades de transmisión unicast para esa conexión. Por lo tanto, el SS solo podrá transmitir en las oportunidades asignadas sin solicitud.

rtPS (Real Time Polling Service): Está diseñado para soportar servicios en tiempo real que generen paquetes de tamaño variable en forma periódica, tal como video MPEG. Este servicio ofrece oportunidades de transmisión en tiempo real, periódico y de forma unicast, permitiendo al SS especificar el tamaño necesario para transmitir. Aunque puede existir un exceso de encabezados, este servicio permite mejorar la utilización del ancho de banda total disponible. Al igual que en UGS, el SS no podrá enviar solicitudes de ancho de banda en las regiones de contención, y a su vez, la BS solo podrá asignar oportunidades de transmisión como ya se ha especificado, y por lo tanto, el SS solo podrá utilizar las oportunidades de transmisión asignadas.

nrtPS (Non Real Time Polling Service): Está diseñado para soportar servicios que ocupan tasa de transmisión variable, en forma periódica y sin exigencias de tiempo real, como es el caso de servicio de FTP a gran velocidad. La BS deberá asignar oportunidades de transmisión periódicamente en tiempo no muy grandes, El SS podrá utilizar las regiones de contención para más ancho de banda.

BE (Best Effort): Está diseñado para proveer el mejor servicio posible sin garantía alguna, por lo que no se garantizan transmisión con bajos retardos o en tiempo real. Un ejemplo es el tráfico tipo Internet. En este modo, un SS podrá utilizar cualquier método para solicitar ancho de banda para poder transmitir.

En la tabla 3.5 se resumen los cuatro servicios básicos con sus características principales.

Tipo de programación	Petición por <i>PiggyBack</i>	Robo de ancho de banda (Bandwidth Stealing)	Consulta
UGS	No permitido	No permitido	Se necesita utilizar el Bit PM para solicitar consulta sobre más ancho de banda
rtPS	Permitido	Permitido	Solo permite consulta unicast
nrtPS	Permitido	Permitido	La programación de ancho de banda se restringe a consulta unicast de acuerdo a la política transmisión/solicitud. De otra forma, se permiten todo tipo de consultas
BE	Permitido	Permitido	Se permiten todo tipo de consulta

Tabla 3.5 - Servicio básicos de asignación de ancho de banda.

3.4.5 MECANISMO PARA SOLICITUD Y ASIGNACIÓN DE ANCHO DE BANDA

Cada uno de los SSs deberá emplear mecanismos especializados para solicitar ancho de banda que va de acuerdo con el tipo de tráfico que genera y el tipo de servicio (QoS) asignado a esa conexión. Por supuesto, esto no aplica para el servicio UGS puesto que con el mismo ya se tiene garantizado una asignación constante de ancho de banda.

Para lograr lo anterior, se utiliza la técnica DAMA (Acceso Múltiple por Asignación de Datos) donde cada una de las SSs envía una solicitud solicitando un ancho de banda para poder transmitir. Existen varios métodos por el cual un SS puede realizar sus peticiones que son: Solicitudes, Reservaciones y consulta.

Solicitudes: Es el mecanismo que utiliza un SS para indicar a la BS que necesita ancho de banda en el canal *uplink*. Debido a que las características del canal *uplink* pueden estar cambiando dinámicamente, todas las solicitudes de requerimiento de ancho de banda se hacen tomando solamente el tamaño de la carga útil y los encabezados agregados en la subcapa MAC. Los encabezados agregados en la capa física no se toman en cuenta. Las solicitudes se pueden enviar ya sea en el periodo de contención o en algún periodo asignado por la BS para ese SS en particular.

Existen las solicitudes *piggyback*, las cuales son un mecanismo que permiten optimizar el uso del canal ya que evitan la posibilidad de colisionar. Esto se logra incluyendo la petición de más asignación de ancho de banda en el mismo mensaje de información enviado durante el periodo asignado.

Reservaciones: Para un SS, el requerimiento de ancho de banda hace referencia a una conexión individual, mientras que cada asignación de ancho de banda es direccionado hacia un CID básico y no hacia un CID individual. Por lo tanto, no se puede saber cual requerimiento ha sido satisfecho, cuando un SS recibe una asignación más corta de lo que originalmente había solicitado, no recibe explicación alguna de por que el hecho, por lo tanto, un SS puede decidir ejecutar el procedimiento de *backoff* y hacer una nueva solicitud o descartar el SDU.

Consulta: Consulta es el proceso mediante el cual la BS reserva ancho de banda hacia los SSs para uso exclusivo de peticiones de ancho de banda. Estas asignaciones de ancho de banda, pueden direccionarse a un SS específico (unicast) o a un grupo de conexiones o de SS (multicast). Para el caso de multicast, los SSs involucrados deberán competir (entrar en contención) para mandar sus requerimientos de ancho de banda.

Unicast: Cuando se consulta a un SS individualmente, se le asigna ancho de banda suficiente para que éste pueda mandar su petición de ancho de banda. Si el SS no necesita ancho de banda en ese momento, el espacio asignado para mandar sus peticiones debe ser rellenado (padding) como se indica en el estándar IEEE 802.16-2004 [26]. Un SS que ha sido activado con el servicio UGS no podrá ser consultado individualmente al menos que éste incluya el bit PM (Poll ME) en el encabezado de los paquetes enviados.

Multicast y Broadcast: Si no existe suficiente ancho de banda para consultar muchos SSs que están inactivos. Se puede incluir esos SSs dentro de un grupo (multicast) o incluso ser consultados en modo broadcast.

Cuando se consulta un CID de tipo multicast o broadcast, todos los SSs que pertenecen a ese grupo, reconocen ese CID y entonces podrán mandar sus peticiones de ancho de banda durante el intervalo asignado a ese CID. Debido a que pueden ocurrir colisiones, solo los SSs que

necesiten ancho de banda podrán mandar solicitudes y deberán utilizar un algoritmo de resolución de contenciones para escoger el momento de enviar sus solicitudes o peticiones.

Bit PM (Poll Me): Un SS que tenga activado el servicio UGS, podrá utilizar el bit PM (en el subencabezado de petición de ancho de banda) en un paquete enviado bajo este servicio, para indicar a la BS que se le consulte porque ocupa ancho de banda para una conexión que no está activada bajo el servicio UGS. Para reducir el ancho de banda que se utiliza al hacer consultas individuales, un SS que tiene una conexión bajo servicio UGS, no será consultado individualmente al menos que active el bit PM. Cuando la BS detecte el bit PM hará una consulta individual para satisfacer la petición.

Existen otros tres mecanismos que son: Contention Based Focused Bandwidth Request for WirelessMan OFDM, Contention Based CDMA Bandwidth Request for WirelessMan OFDMA, y Optional Mesh Topology Support [24].

3.4.6 RESOLUCIÓN DE COLISIONES

La BS controla las asignaciones en el canal *uplink* a través de los mensajes UL-MAP y determina cuales minislots estarán sujetos a colisiones. Las colisiones pueden ocurrir durante la etapa de *ranging* y los intervalos de solicitudes. Una colisión resulta cuando dos o más SSs transmiten de tal forma, que la señal llega exactamente al mismo tiempo a la BS de modo que esta no puede entender ningún de ellos. El método que obligatoriamente debe usarse para resolver colisiones se conoce con el nombre de "Exponential Backoff binario truncado". Los parámetros utilizados dentro de este algoritmo los define la BS a través del mensaje UCD, y los valores representan el número dos elevado a la potencia del valor indicado, por ejemplo un 3 indica en realidad un ocho ($2^3=8$), un 5 indica un 32 ($2^5=32$). Los parámetros utilizados son ventana de *backoff* inicial y ventana de *backoff* final. La forma en que opera el algoritmo es como se describe a continuación.

Cuando un SS tiene información para enviar y necesita entrar en el proceso de resolución de colisiones, éste hace que su ventana de *backoff* inicial tome el valor indicado por la BS a través de los mensajes UCD.

El SS selecciona aleatoriamente un número que se encuentre dentro de esta ventana. Este valor indica el número de oportunidades de transmisión en la región de contención que el SS deberá dejar pasar antes de transmitir. Solo se consideran como oportunidades de transmisión aquellas donde el SS tiene derecho a transmitir, las cuales, se definen mediante el mensaje UL-MAP.

Por ejemplo, supongamos que un SS quiere transmitir una solicitud de ancho de banda. Entonces el SS toma los valores para la ventana de *backoff* inicial y ventana de *backoff* final indicados en el mensaje UCD. Supongamos que estos valores sean 4 y 10 respectivamente. Entonces el SS tomará un valor aleatorio entre 0 y 15 (2^4 valores posibles) que supongamos resultado ser el 9. El SS deberá dejar pasar 9 oportunidades de transmisión antes de transmitir. Si en el mensaje UL-MAP se indicaron 5 oportunidades de transmisión disponibles, el SS no deberá transmitir y deberá esperar otro mensaje UL-MAP donde se definan más oportunidades de transmisión. Si en el siguiente UL-MAP se definen otras 5 oportunidades de transmisión disponibles, el SS deberá dejar pasar cuatro (nueve en total) y transmitir en la oportunidad número 5. Después de enviar su solicitud de ancho de banda, el SS deberá esperar a que se le asigne un espacio para transmitir (ancho de banda) el cual se indicará en los siguientes UL-MAP. Una vez que el SS recibe el espacio para transmitir, se considera que el algoritmo de resolución de colisiones ha terminado satisfactoriamente.

Sin embargo, si el SS no recibe ninguna notificación para transmitir (ancho de banda) dentro de un tiempo T16 (definido por el operador, y el cual no deberá ser menor a 10 ms [24]) se considera que la transmisión de solicitud de ancho de banda colisionó con un mensaje de otro SS y por lo tanto que se ha perdido. Ahora el SS incrementa la ventana de *backoff* en un factor de 2, vuelve a escoger un número n aleatorio que esté dentro de esta ventana y espera n oportunidades para volver a enviar su solicitud de ancho de banda. Si el SS recibe ahora una asignación de ancho de banda termina el proceso de resolución de colisiones. Si por el contrario, vuelve a pasar un tiempo T16 sin recibir una asignación de ancho de banda, el SS considera que hubo otra colisión, vuelve a incrementar la ventana de *backoff* y repite el proceso. Este proceso se repite constantemente hasta que el SS reciba una asignación de ancho de banda o hasta que la ventana de *backoff* sea igual al valor de *ventana de backoff final*. Si esto último sucede, el SS descarta el PDU para el cual, estaba solicitando el ancho de banda.

Este algoritmo permite a la BS tener mucho control en la resolución de colisiones, ya que éste puede controlar dinámicamente los valores de *ventana de backoff inicial* y *ventana de backoff final*, así como la cantidad de minislots asignados a contención de acuerdo a la cantidad de tráfico, el número de SS activos o el número de SS que están en proceso de inicialización (siguiente inciso). Se han realizado muchos estudios al respecto como es el caso de [48, 49].

3.4.7 PROCESO DE INICIALIZACIÓN

El proceso de inicialización, es llevado a cabo por todos los SSs que están entrando a la red por primera vez. El proceso de inicialización se ve en su modo general y sin errores de ningún tipo en la figura 3.8. Las etapas que se deben de llevar a cabo, son las siguientes:

- a) Buscar un canal de bajada y sincronizarse con él.
- b) Obtener los parámetros de transmisión (leer mensaje UCD)
- c) *Ranging* y ajustes automáticos
- d) Establecer o negociar capacidades básicas
- e) Intercambio de llaves para autorización
- f) Registro
- g) Establecer conexión IP
- h) Establecer hora
- i) Transferir parámetros adicionales
- j) Establecer conexiones

Los incisos "g", "h" e "i", son opcionales y solo se ejecutarán si el SS así lo especifica durante la etapa de registro.

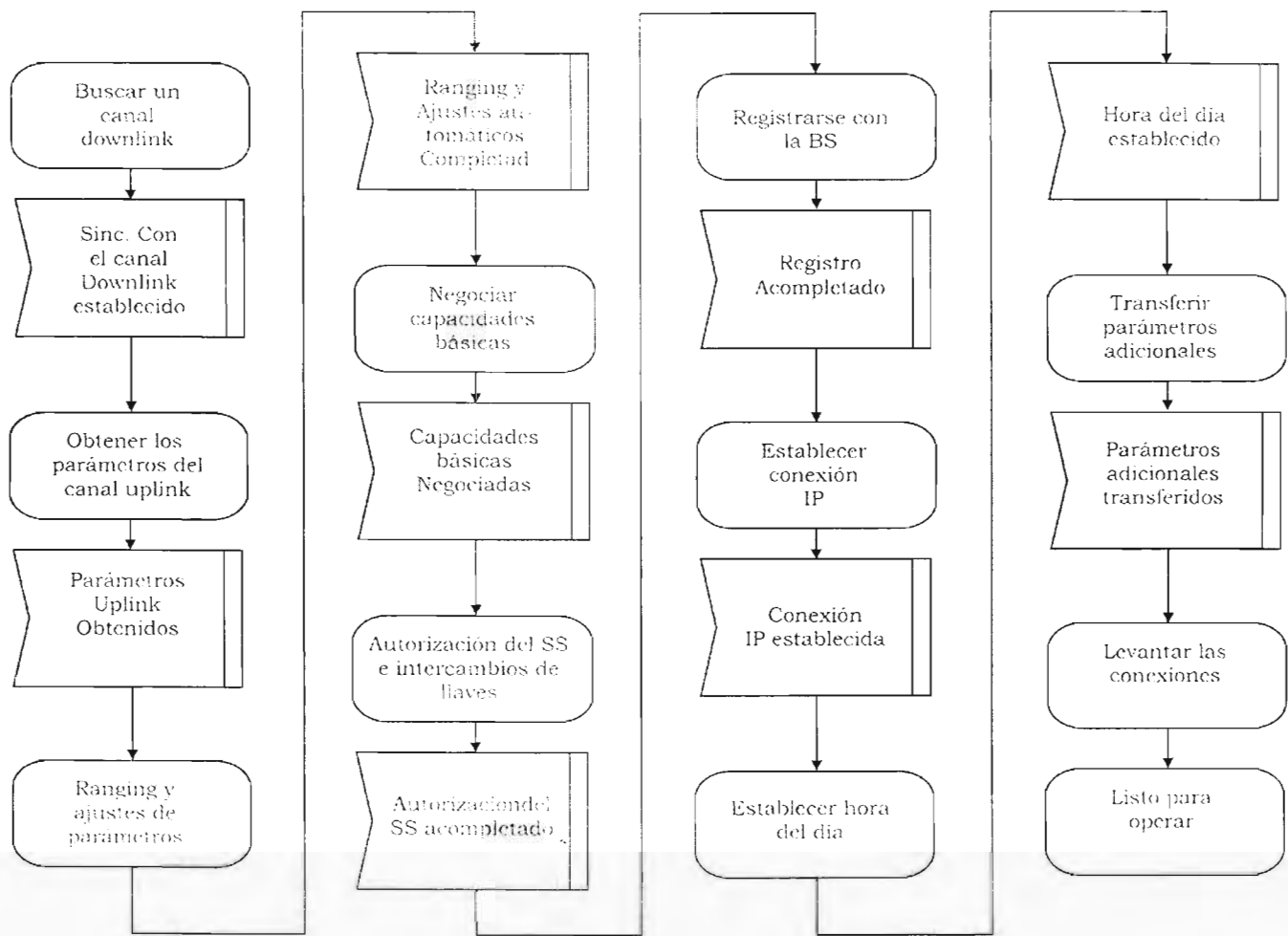


Figura 3.8 - Proceso de inicialización de un nuevo SS que se va a unir a la red.

a) Buscar un canal de bajada y sincronizarse con él: Cuando un SS está iniciando o reiniciando por pérdida de señal, deberá buscar un canal de bajada. El SS cuenta con una memoria no volátil donde se tienen guardados los últimos parámetros de operación. El SS deberá primero hacer uso de esta información y sincronizarse con el canal donwlink indicado. Si no funciona, entonces deberá buscar otros posibles canales en la banda de frecuencias perteneciente al canal de bajada hasta encontrar una señal que sea valida.

Una vez que ha encontrado un canal de bajada, se sincronizará con él. El siguiente paso es encontrar los parámetros de control del canal.

b) Obtener los parámetros de transmisión: En primer lugar, un SS deberá obtener los parámetros del canal de bajada buscando los mensajes DL-MAP. Se considera que un SS ha alcanzado la sincronización cuando ha recibido al menos un mensaje DL-MAP. Igualmente, un SS seguirá sincronizado mientras siga recibiendo los mensajes DL-MAP. Si el SS no recibe mensajes DL-MAP dentro de un tiempo definido por el operador, el SS intentará re-establecer la sincronización.

En segundo lugar, un SS deberá obtener los parámetros del canal de subida. El SS buscará los mensajes UCD para obtener los parámetros de un posible canal *uplink*. Estos parámetros son constantemente transmitidos por la BS para cada uno de los canales *uplink* disponibles en forma de broadcast, si ningún canal *uplink* es encontrado durante un tiempo determinado, el SS continuará buscando otros canales *uplink* disponibles.

Un SS deberá determinar si un canal puede ser utilizado a través de los parámetros de descripción del canal. Si no es así, el SS continuará buscando para encontrar otro canal de bajada. Si el canal se puede utilizar, el SS buscará el mensaje UCD para ver si el canal de subida también es utilizable. Si también lo es, ahora el SS esperará hasta el siguiente mensaje DL-MAP para obtener el tiempo de sincronización. Enseguida, el SS espera un mensaje MAP de colocación de ancho de banda para el canal seleccionado. Ahora, el SS puede empezar a transmitir de acuerdo a como lo marcan los protocolos.

Si por algún motivo estas operaciones no se pueden llevar a cabo, el procedimiento vuelve a comenzar desde el paso "buscar otro canal *downlink*". Un SS considera válido un canal *uplink* mientras siga recibiendo los mensajes UL-MAP y UCD.

c) Ranging y ajustes automáticos: *Ranging* es el proceso durante el cual se corrige el offset de tiempo y se ajusta la potencia de transmisión del SS, de tal forma que el SS es alineado con el símbolo que marca el principio de un *slots*.

El SS envía entonces el mensaje RNG-REQ con el campo CID colocado a cero en una región de contención (significa que puede colisionar con otros SSs). Una vez que la BS ha recibido correctamente el mensaje RNG-REQ deberá contestar con un mensaje RNG-RSP con el CID para la conexión básica y

primaria de este SS. Este mensaje también podrá llevar información necesaria para que el SS ajuste la potencia de transmisión y el offset. A partir de este punto, la BS deberá asignar regiones de transmisión al SS marcados con los CIDs asignados al SS hasta acabar el proceso de *ranging*.

El proceso de enviar el mensaje RNG-REQ y recibir el mensaje RNG-RSP con las correcciones necesarias, se repetirá hasta que la BS considere que todos los parámetros están debidamente ajustados. La BS indicará dentro del mensaje RNG-RSP si el proceso continúa o si ya han sido ajustados correctamente los parámetros.

d) Establecer o negociar capacidades básicas: Después del proceso de *ranging*, el SS deberá informar acerca de sus capacidades básicas enviando el mensaje SBC-REQ. La BS responde con un mensaje SBC-RSP marcando las capacidades básica en la que ambos coinciden. Algunos de los datos que debe incluirse en el mensaje SBC-REQ son: CID básico, Tipo de modulación (BPSK, QPSK, 16-QAM o 64-QAM), Potencia de transmisión, FEC (Forward Error Correction) utilizados en los canales *downlink* y *uplink*, propiedades relativas a la asignación de ancho de banda (FDD, TDD, half-duplex, Full duplex, etcétera) entre otros.

e) Intercambio de llaves para autorización: Es el proceso con el cual, la BS y el SS intercambian autorizaciones y llaves.

f) Registro: Es el proceso durante el cual se le permite al SS entrar en la red y recibir además, el CID para su conexión secundaria. El proceso comienza cuando el SS manda el mensaje REG-REQ hacia la BS. La BS responderá con el mensaje REG-RSP una vez que haya recibido el mensaje REQ-REQ del SS. Los tres pasos que se ejecutan son: A) La BS identifica la autenticidad del cliente (SS), B) La BS proporciona las llaves de autorización (AK) con las que se obtienen las llave de cifrado de llave (KEK) y las llaves de autenticación de mensajes, y C) La BS proporciona la autenticación del SS con las identidades y propiedades básicas de asociación de seguridad (SA) para las cuales, el SS está autorizado para obtener información.

g) Establecer conexión IP: Un SS puede incluir los parámetros IP en el mensaje REG-REQ para indicar el número de versión IP que soporta en la conexión secundaria. La BS será la que decida que versión IP es la que se usará. Después, el SS invocará el mecanismo DHCP (Dynamic Host Controller Protocol) con el fin de obtener una dirección IP y demás parámetros necesarios para establecer una conexión IP. Si el SS cuenta con un archivo de configuración, la respuesta del servidor DHCP deberá contener el nombre del archivo que contiene los demás parámetros de configuración. El proceso de establecer una conexión IP deberá llevarse a través de la conexión secundaria.

h) Establecer hora: El protocolo mediante el cual se lleva a cabo el establecimiento de la hora del día, está definido en el documento IETF RFC 868. Tanto la petición como la respuesta se llevan a cabo mediante UDP. El tiempo dado por el servidor UTC (Universal Coordinated Time) deberá combinarse con el offset obtenido por el mecanismo DHCP para establecer correctamente la hora del día. Este proceso se llevará a cabo mediante la conexión secundaria. El establecimiento de la hora del día no es indispensable para el proceso de registro, pero si lo podría ser para futuras aplicaciones.

i) Transferir parámetros adicionales Después de ejecutar correctamente el mecanismo DHCP, el SS deberá descargar el archivo de configuración mediante el protocolo TFTP (Trivial File Transfer Protocol) a través de la conexión secundaria. Cuando se ha descargado totalmente el archivo de configuración, el SS deberá informarlo a la BS mediante el envío de mensajes TFTP-CPLT hasta recibir como respuesta, el mensaje TFTP-RSP de la BS. Los parámetros que se indican abajo, son algunos de los parámetros que se incluyen dentro del archivo de configuración.

- Parámetros de configuración SS MIC (Message Integrity Check).
- Tiempos utilizados por el servidor TFTP.

Los siguientes parámetros pueden ser incluidos, y en ese caso deben ser soportados por todos los SSs.

1. Parámetros de configuración del nombre de archivo de actualización de software.
2. Dirección IP del servidor de software.
3. Dirección IP del nodo de autorización (Solo para topologías Mesh).
4. Dirección IP del nodo de registro (Solo para topologías Mesh).

5. Dirección IP del nodo de abastecimiento (Solo para topologías Mesh).
6. Parámetros de configuración relativos al fabricante.

j) Establecer conexiones: Para finalizar, la BS deberá enviar el mensaje DSA-REQ al SS para que levante la conexión con el flujo de servicio que le pertenece. El SS responderá con el mensaje DSA-RSP.

3.5 CAPA FÍSICA

Algunas de las características que se incluyen dentro de esta capa son:

- ❖ Capacidad de soportar FDD y TDD.
- ❖ TDMA en el canal *uplink*.
- ❖ TDM en el canal *downlink*.
- ❖ Modulación adaptiva y códigos FEC para los dos canales (*uplink* y *downlink*).
- ❖ Elemento en tramas que permitan ecualización y estimación del desempeño del canal sobre NLOS.
- ❖ FEC concatenados utilizando Reed-Solomon y TCM (Trellis Coded Modulation) pragmático con *interleaving* opcional.
- ❖ FEC con BTC (Block Turbo Codec) o CTC (Convolutional Turbo Codec) opcional.
- ❖ Posibilidad de utilizar ARQ para control de errores en lugar de FEC.
- ❖ Posibilidad de implementar AAS (Adaptive Antenna System).

Las especificaciones físicas han sido diseñadas para soportar una gran flexibilidad de configuraciones con el objetivo de optimizar el despliegue de estos sistemas en lo que a planeación de células, costo, capacidades de radio, servicios y capacidad se refiere.

Para un mejor uso del espectro electromagnético, tanto FDD como TDD pueden ser utilizados, en ambos casos se utilizan entramados que permitan perfiles de transmisión adaptivo mediante el cual, los parámetros de transmisión incluyendo esquemas de modulación, pueden ser ajustados

individualmente para cada SS. Para el caso de FDD se puede configurar tanto en full-duplex como en half-duplex.

El canal *uplink* es una combinación de TDMA y DAMA. El canal de subida es dividido en ranuras de tiempo, y la cantidad de ranuras asignados a las diferentes necesidades (para transmitir datos, para contención, para inicialización, etcétera) son controlados por la BS a nivel MAC y pueden variar en el tiempo de acuerdo a las necesidades para un mejor desempeño.

El canal *downlink* se basa en TDM, donde una única señal multiplexada con toda la información perteneciente a cada uno de los SSs llega a cada uno de los SSs dentro de un mismo sector. También se puede soportar FDD half-duplex para el canal *downlink*.

3.5.1 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DEL CANAL DOWNLINK

El ancho de banda disponible en el canal *downlink* (canal de bajada) se define mediante *slots* físicos PS (Physic Slot). El número de PS en cada *frame*, es función de la tasa de modulación, y su vez, la tasa de modulación se escoge de tal manera que obtengamos un número entero de PS.

Un caso común es un subframe utilizando TDD, tal y como se muestra en la figura 3.9, donde el subframe comienza con un *frame* de preámbulo (utilizado por la capa física para sincronización y equalización), seguido de un *frame* de control que contiene los mensajes DL-MAP y UL-MAP, los cuales, indican el PS donde comienza la transmisión. La siguiente sección, contiene los datos organizado por ráfagas con diferentes perfiles y por lo tanto con diferentes niveles de transmisión. Las ráfagas son transmitidas en orden decreciente de robustez. Por ejemplo, si utilizamos código FEC sencillo y parámetros fijos de transmisión, comenzaríamos transmitiendo con una modulación QPSK, después con una modulación 16-QAM y finalmente con una modulación 64-QAM. En el caso de TDD, se utiliza un GAP (espacio vacío) para indicar la separación entre los canales *downlink* y *uplink*.

Cada SS recibe y decodifica el *frame* de control en el canal *downlink*, donde busca los encabezados MAC que indiquen que hay información para él en el resto del subframe en el canal *downlink*.

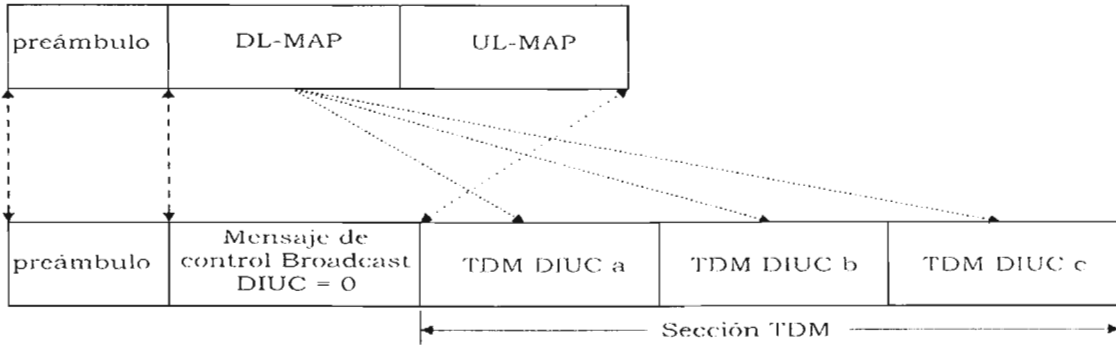


Figura 3.9 – Estructura de un subframe en el canal *downlink* utilizando TDD.

En el caso de FDD (Figura 3.10), la estructura del subframe no cambia mucho. Comienza con un *frame* de preámbulo seguido por un *frame* de control y después una sección TDM (Time Division Multiplexing) organizado en ráfagas con perfiles de robustez decreciente. Esta sección TDM del subframe contiene datos que han sido transmitidos a uno o más SSs (que pueden tener una conexión half-duplex, half duplex programado para transmitir después del *frame* que ha recibido o half-duplex sin programación). El subframe FDD continúa con una sección de TDMA utilizado para transmitir datos hacia cualquiera de los SSs en modo half-duplex, que han sido programados para transmitir enseguida del *frame* que ha recibido. Esto permite a un SS decodificar solo una parte del *frame* completo sin necesidad de decodificar todo el subframe. En la sección TDMA, cada ráfaga comienza con un preámbulo para resincronización de fase. Las ráfagas en la sección de TDMA, no necesitan ser colocadas por orden de robustez. El *frame* de control utilizado en FDD incluye información tanto de la sección TDD como de la sección TDMA.

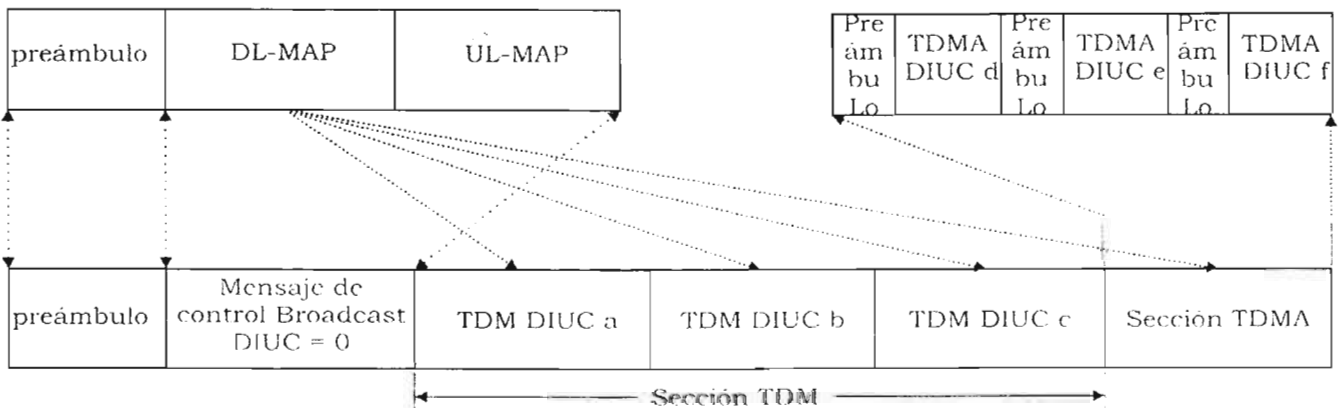


Figura 3.10 – Estructura de un subframe en el canal *downlink* utilizando FDD.

Frame de control: Es la primera sección del subframe después del preámbulo. Es utilizado para controlar la información que va hacia cada SS. Esta información nunca deberá ir encriptada. La información que se transmite en esta sección siempre deberá utilizar DIUC = 0.

El *frame* de control deberá contener el mensaje DL-MAP para el canal *downlink* seguido del mensaje UL-MAP para cada canal *uplink* asociado. También podrá contener los mensajes UCD y DCD después del último UL-MAP. Ningún otro mensaje deberá ser enviado en la sección del *frame* de control.

Mensaje DL-MAP: Como ya hemos visto, este mensaje define la forma en la que se ha de acceder a la información contenida en el canal *downlink*. Si el tamaño del mapa no llegara a ser un número entero de bytes, el campo donde se especifica el tamaño del mensaje en el encabezado deberá redondearse hacia el siguiente número mayor y estos espacios deberán ser rellenados (Padding). Un mensaje DL-MAP deberá tener el formato que se ve en la tabla 3.6.

Sintaxis	Tamaño	Notas
DL-MAP_Message_Format() {		
Management Message Type = 2	8 bits	Indica tipo de encabezado DL-MAP (tabla 3.3)
PHY Synchronization Field	Variable	Propiedades físicas del canal
DCD Count	8 bits	Aumentar 1 cada que el DL-MAP cambia de configuración
Base Station ID	48 bits	Identificador de la BS
Number of DL-MAP Elements <i>n</i>	16 bits	Número de IE programados en el mapa
Begin PHY Specific Section {		
for (<i>i</i> = 1; <i>i</i> <= <i>n</i> ; <i>i</i> ++) {		Para <i>c/u</i> de los elemento dentro del mensaje DL-MAP
DL_MAP_Information_Element()	Variable	Se describe el uso del canal (ver tabla 3.7)
if !(byte boundary) {		Si no estamos al final del borde del byte entonces:
Padding Nibble	4 bits	Rellenar hasta alocar el límite del byte superior
}		
}		
}		
}		

Tabla 3.6 – Formato del mensaje DL-MAP.

Elementos de información (Information Element "IE") en el mensaje DL-MAP: Los IE siguen después del campo donde se especifica la cantidad de IE (Tabla 3.6). Estos deberán ir en orden cronológico y no se requiere un orden de los parámetros DIUC o CID. En la tabla 3.7 se muestra su formato.

Sintaxis	Tamaño	Notas
DL_MAP_IE () {		
DIUC	4 bits	
startPS	16 bits	Slot físico marcado como punto de comienzo.
If (CID use enabled for burst profile) {		
CID	16 bits	Que puede ser unicast, broadcast o multicast.
}		
}		

Tabla 3.7 - Formato de los Elementos de información (IE) dentro del mensaje DL-MAP.

DIUC: (Downlink Intervalo Usare Code) es un código que especifica un perfil de ráfaga específico que es utilizado durante un intervalo de transmisión. La tabla 3.8 muestra los valores DIUC posibles.

DIUC	USO
0	Frame de control
1-6	Perfil para ráfagas TDM (no requiere preámbulo)
7-12	Perfil para ráfagas TDMA (Se requiere preámbulo)
13	Reservado
14	Hueco (GAP)
15	Fin del Mapa (mensaje DL-MAP)

Tabla 3.8 - Valores DIUC posibles dentro del mensaje DL-MAP.

3.5.2 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DEL CANAL UPLINK

El ancho de banda disponible en el canal *uplink* (canal de subida) se define mediante minislot, donde un minislot puede medir 2^m PS (donde m toma valores desde 0 hasta 7). La estructura de un subframe *uplink* utilizado por un SS para transmitir hacia una BS se aprecia en la figura 3.11. Un SS puede transmitir tres tipos de ráfagas durante un subframe *uplink*:

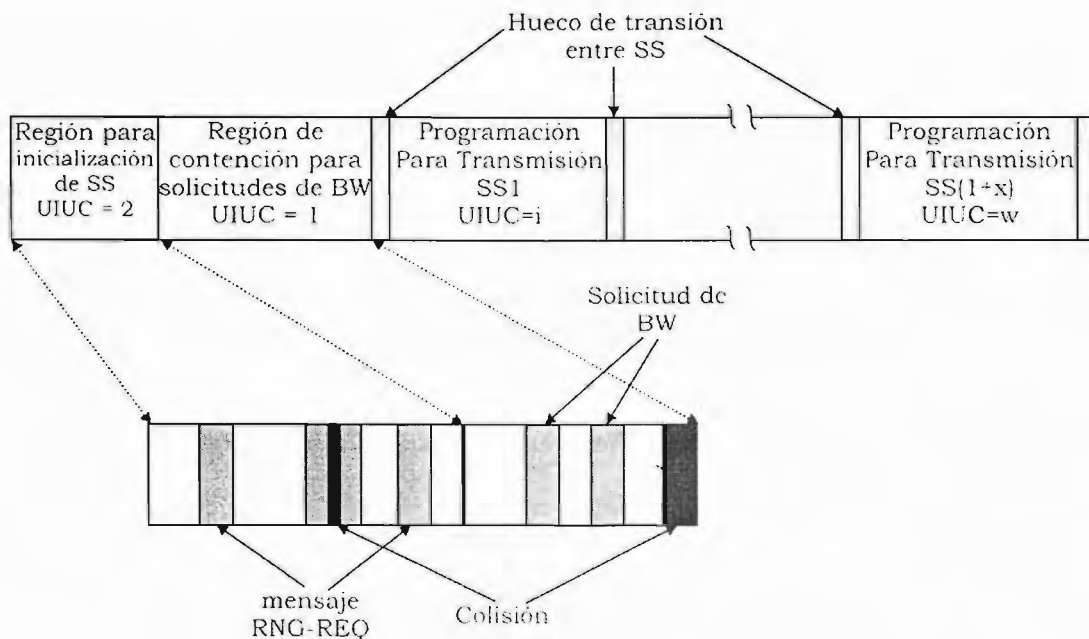


Figura 3.11 – Estructura de un subframe en el canal *uplink*.

- 1) Aquellos que se transmiten en regiones de contención reservados para *ranging*.
- 2) Aquellos que se transmiten en regiones de contención reservados para solicitud de ancho de banda en broadcast o multicast.
- 3) Aquellos que se transmiten en un espacio reservado para un único SS indicado mediante los IE (Information Element).

Cualquiera de estas clases de ráfagas pueden estar presentes durante cualquier subframe en cualquier cantidad (solo limitado por la cantidad de PS disponibles en el subframe). La asignación de ancho de banda para *ranging* y para solicitud de ancho de banda en contención, deberán ir siempre

juntas y marcadas con UIUC (Uplink Interval Usage Code) = 2 y UIUC = 1 respectivamente. Las ranuras para transmisión restantes se agruparán por SS. Durante su tiempo de transmisión, un SS transmitirá con los perfiles indicados por la BS.

La transmisión de varios SSs durante el mismo subframe *uplink*, se separa mediante SSTGs (Subscriber Station Transition Gap). Estos huecos permiten que termine la ráfaga previa y son seguidos por un preámbulo que permiten a la BS sincronizarse con la nueva ráfaga perteneciente a otro SS (ver figura 3.11).

Mensaje UL-MAP: Este mensaje indica como se ha distribuido el acceso al canal *uplink*. El formato del mensaje UL-MAP se muestra en la tabla 3.9.

Sintaxis	Tamaño	Notas
UL-MAP_Message_Format() {		
Management Message Type = 3	8 bits	Indica tipo de encabezado UL-MAP (tabla 3.3)
Uplink Channel ID	8 bits	Identificador del canal de subida
UCD Count	8 bits	Incrementa en 1 cada que cambia la configuración de este mensaje
Allocation Start Time	32 bits	Comienzo del tiempo efectivo en minislot definido por el mensaje
Begin PHY Specific Section {		
For (i=1;i<=n;i++) {		Para cada uno de los elementos dentro de este mensaje(ver tabla 3.10)
UL-MAP_IE()	Variable	Describe el uso del canal
}		
}		
If !(byte boundary) {		Si no estamos al final del borde del byte entonces:
Padding Nibble	4 bits	Se rellena hasta alcanzar limite superior cuando no resultó # entero
}		
}		

Tabla 3.9 - Formato del mensaje UL-MAP.

Elementos de información (IE) en el mensaje UL-MAP: Los UL-MAP_IE (Elementos de información) se definen de acuerdo a la tabla 3.10.

Sintaxis	Tamaño	Notas
UL-MAP_IE () {		
CID	16 bits	Identificador de conexión
UIUC	4 bits	Indica el perfil de ráfaga
If (UIUC == 15) {		
Extended UIUC dependent IE	Variables	
} else {		
Offset	12 bits	Se mide en número de minislot que han de dejar pasar antes de comenzar la transmisión
}		
}		

Tabla 3.10 - Formato de los IE dentro del mensaje UL-MAP (UL-MAP-IE).

Offset indica el número de minislot que han de pasar para que el SS indicado inicie la transmisión. El fin del último minislot asignado para transmitir, se indica con la colocación de un UIUC = 10, con un CID = 0, y con duración de cero. Los valores UIUC posibles son indicados en la tabla 3.11.

Nombre IE	UIUC	ID de la conexión	Descripción
	0	-	Reservado
Request	1	Cualquiera	Indica comienzo de la región de solicitudes de ancho de banda
Initial Ranging	2	Broadcast	Indica comienzo de la región de mantenimiento
	3	-	Reservado
Data Grant Burst type 1	4	Unicast	Indica comienzo de datos en ráfaga de tipo 1
Data Grant Burst type 2	5	Unicast	Indica comienzo de datos en ráfaga de tipo 2
Data Grant Burst type 3	6	Unicast	Indica comienzo de datos en ráfaga de tipo 3
Data Grant Burst type 4	7	Unicast	Indica comienzo de datos en ráfaga de tipo 4
Data Grant Burst type 5	8	Unicast	Indica comienzo de datos en ráfaga de tipo 5
Data Grant Burst type 6	9	Unicast	Indica comienzo de datos en ráfaga de tipo 6
Fin del mapa (UL-MAP)	10	Zero	Indica el primer minislot antes del final de la asignación de minislot (Entre otras cosas. Ver [24])
Hueco (GAP)	11	Zero	Utilizado para programar huecos en las transmisiones
	12-14	-	Reservado
Extendido	15	-	

Tabla 3.11 - Valores UIUC dentro del mensaje UL-MAP.

Los esquemas de modulación que son soportados para transmitir en un canal *uplink* son QPSK, 16-QAM y 64-QAM.

3.6 CONCLUSIONES

El estándar IEEE802.16 ha sido diseñado con una gran flexibilidad que le permite adaptarse a condiciones de trabajo muy variadas y que le permiten además, la posibilidad de prestar una gran cantidad de servicios y aplicaciones.

El hecho de que provenga de un estándar con años de trabajo en el mercado real como lo es DOCSIS, le transfiere automáticamente toda la experiencia, años de estudio y mejoras del mismo como es el uso de concatenación, fragmentación y *piggyback* por mencionar algunas.

Técnicas como TDD permiten la asignación variable de ancho de banda por usuario, el uso de FDD permite comunicaciones asíncronas y Full-duplex. Con TDMA y el uso de mapas para indicar de antemano el uso del canal, se logra QoS. La gran variedad de técnicas como modulación adaptiva, OFDM, mesh, broadcast, multicast, unicast, regiones de tiempo, encriptación, códigos correctores de errores, etcétera, le dan al sistema una gran fiabilidad logrando por ende una gran robustez y seguridad en el uso del mismo.

IEEE802.16 es un estándar que al ser diseñado en las capas física y MAC, deja totalmente por fuera protocolos de ruteo, por lo que puede trabajar perfectamente bajo una diversidad de protocolos como ATM o IP.

Si agregamos a todo esto, el hecho de que el estándar IEEE 802.16 ofrece una alternativa totalmente nueva en el mercado, entendemos por que empresas líderes en el mercado están haciendo grandes inversiones y el porqué, se enfila como toda una promesa para el futuro de las telecomunicaciones en el mundo.

CAPÍTULO 4

ANÁLISIS Y DISEÑO DE PROCEDIMIENTOS *HANDOFF* EN EL ESTÁNDAR IEEE802.16

4.1 INTRODUCCIÓN

Handoff, también conocido como handover (en GSM) y abreviado con las letras **HO**, es el proceso en el cual una estación móvil emigra de la conexión que le provee una estación base a otra conexión que le proveerá otra estación base, ver figura 4.1. Aunque también se aplica el término al cambio de conexión de un sector a otro dentro de la misma célula o al cambio de frecuencia o de *slots* dentro de la misma BS y dentro del mismo sector [2].

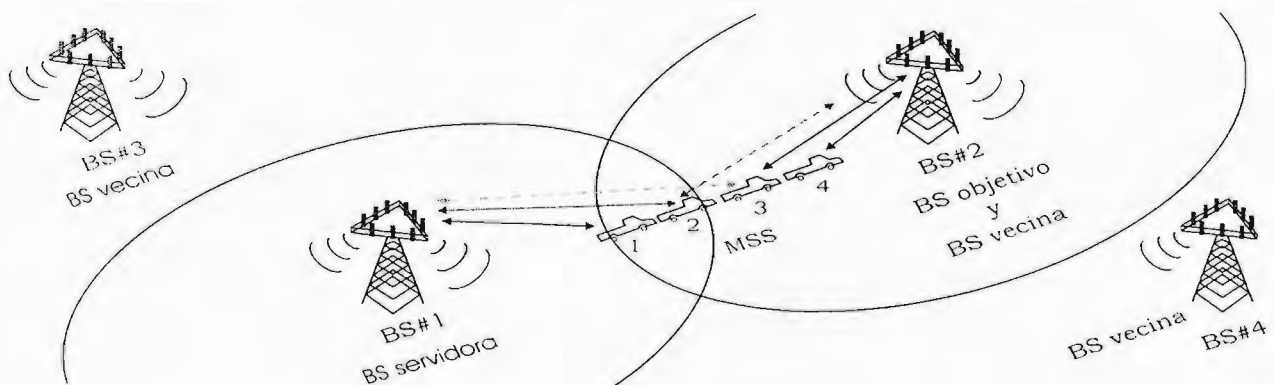


Figura 4.1 - Ilustración de *handoff*.

El término MSS (Mobile Subscriber Station), es el que se utilizará de aquí en adelante para designar un usuario SS que tiene la capacidad de moverse y mantener una comunicación simultáneamente. El término BS objetivo se referirá a la BS con la cual el MSS quiere abrir una nueva conexión. Como BS servidora nos referiremos a la BS con la cual el MSS tiene actualmente una conexión establecida y cuya baja calidad exige al MSS abrir una nueva conexión de mejor calidad con una BS objetivo.

Todas la BS que se encuentren alrededor de la BS servidora serán conocidas como BS vecinas, tal y como puede apreciarse en la figura 4.1.

Como ya se ha explicado con anterioridad, no existe un proceso definido o un protocolo que defina con exactitud como debe un MSS que opera bajo el protocolo IEEE 802.16, llevar a cabo un HO. Sin embargo, existen propuestas sobre HO tanto en sistemas BWA como en redes que operan bajo el protocolo IP. Otros sistemas de comunicaciones móviles como telefonía celular, tienen procedimientos de HO bien definidos.

El propósito de la primer parte de este capítulo es hacer una recapitulación de los mismos y tratar de resaltar todos aquellos mecanismos y procedimientos que puedan ser útiles o aportar una idea.

En la segunda parte del capítulo (sección 4.7 en adelante), se hace una descripción del procedimiento propuesto para el mecanismo de *handoff* bajo el estándar IEEE 802.16.

4.2 ESTUDIO DE MONITOREO Y ASOCIACIÓN DE BS VECINAS

Para que un MSS pueda establecer una comunicación con una BS, primero se deben llevar a cabo un intercambio de mensajes entre ambos con la finalidad de “ponerse de acuerdo” respecto a todos los parámetros que esto conlleva (potencia, esquema de modulación, identificación, etcétera).

Como ya vimos en la sección 3.4.7, existe una serie de fases o estados que deben realizarse en estricto orden (figura 3.8). En primera estancia, el MSS debe tratar de buscar una señal proveniente de la BS y luego tratar de sincronizarse con ella.

Una vez que la sincronización se ha llevado a cabo, El MSS debe buscar el mensaje *DL-MAP*, después buscar otros dos mensajes de nombre DCD y UCD y posteriormente ejecutar el proceso de *ranging* (aún faltan más pasos para establecer una conexión satisfactoria).

La realización de todos estos pasos conlleva un tiempo valioso. Con el fin de minimizar estos tiempos, se pretende que un MSS pueda asociarse (realizar los pasos antes mencionados) con varias BSs vecinas a la vez que mantiene una conexión con la BS servidora, con el fin de que cuando se deba realizar un HO, parte del proceso ya se haya realizado de antemano.

Existen propuestas donde se menciona que una BS deberá estar constantemente enviando mensajes acerca de su propia configuración con la finalidad de que los usuarios móviles puedan captarlas y saber de antemano las características y requerimientos para una futura conexión con esta BS. En [30] se propone el mensaje *NBR-ADV* (Neighbor Adversiment) cuyo funcionamiento se define como sigue.

1. Una BS puede transmitir información (broadcast) sobre la topología de la red usando un mensaje llamado *NBR-ADV MAC*. Un MSS puede decodificar este mensaje para encontrar los parámetros de las BSs vecinas. De esta forma cada MSS será capaz de sincronizarse rápidamente con una BS vecina.

2. Un MSS podrá entonces, requerir tiempo para buscar estos mensajes. Esto lo hará mediante el envío del mensaje *SCN-REQ MAC* (Scanning Interval Allocation Request) hacia la BS. En este mensaje se debe especificar el tiempo estimado para llevar a cabo la búsqueda.

3. La BS responderá la llegada del mensaje *SCN-REQ MAC* mediante la colocación de un *Scanning_IE* mediante el cual, se puede denegar la solicitud o aceptarla con al menos la petición sugerida. Una BS también puede mandar este mensaje sin necesidad de que se le solicite anteriormente por el usuario móvil.

4. Una vez que se le ha dado permiso al MSS para que pueda buscar señales de BS vecinas y que se le ha asignado un cierto tiempo para que busque, el MSS empieza a rastrear señales provenientes de BS vecinas. Cuando encuentra una, intenta sincronizarse con ella mediante uno de los canales *downlink* y también trata de estimar la calidad de la conexión física.

5. Un MSS también puede usar este intervalo de tiempo para ejecutar el procedimiento de "*ranging*" (sección 3.4.7) con la BS encontrada. El MSS no solo podrá sincronizarse con la nueva BS, sino que también podrá ejecutar dos estados más que son: "*association-initial-ranging*" y "*association-pre-registration*", que son los procedimientos de *ranging* y *registro* pero en un estado de asociación, ya que el MSS no tiene una conexión establecida con esta BS.

Sin embargo, tal como se menciona en [55], cada MSS podría tener la siguiente lista:

- 1) BS vecinas detectadas.
- 2) BS Monitoreadas (por ejemplo, todas aquellas que fueron visitadas para una medición pasiva).
- 3) Un subgrupo de BS monitoreadas que son marcados como *selected* (seleccionado), para posibles futuras asociaciones.
- 4) Después de una asociación, una BS se convierte en *Associated BS*. Las asociaciones que se pueden ejecutar están limitadas.
- 5) Después de un HO, la BS se convierte en una BS servidora.
- 6) Las capas más altas en las BS, podrían incluir funciones de autenticación y autorización de servicios a través de un servidor externo (como HLR "Home Location Register" en GSM 3G).

En las visitas que hace el MSS, ejecuta un procedimiento de *asociación* similar al especificado en el estándar 802.16-2001 [23] para inicialización, tal y como sigue.

- 1) Búsqueda de DL y sincronización con la BS.
- 2) Obtener parámetros de transmisión.
- 3) Iniciar *ranging*.
- 4) Negociar capacidades.
- 5) Autorizar al MSS e intercambiar claves.
- 6) Negociar requerimientos de servicio.
- 7) Ejecutar un pre-registro.
- 8) Transferir los parámetros de operación.

4.3 ESTUDIO DE COMUNICACIÓN INTER-BS

Existen varios parámetros que pueden intercambiarse entre la BS servidora y la BSs vecinas para alivianar un poco la carga de intercambio de mensajes entre el MSS y la BSs involucradas durante el procedimiento de HO. Entre los parámetros más importantes están: BW (ancho de banda), QoS, mensajes de petición y de confirmación, etcétera.

Si la BS objetivo (BS con la que ejecutará un HO) no tiene el ancho de banda necesario para el usuario entrante, se debe rechazar el requerimiento de HO con este usuario aunque su relación señal a ruido sea la mejor. En [6] se propone el intercambio de al menos dos mensajes entre estaciones base durante el procedimiento de HO, donde se incluyen los campos BW, QoS y ACK/NACK con el fin de regular el ancho de banda requerido, QoS y confirmar a la BS vecina, que ha sido o no elegida como BS objetivo.

En [6] se menciona el campo "*requerimiento de BW (8 bits)*" para regular el ancho de banda, en el que se especifica el BW requerido por el MSS para poder sostener una tasa de velocidad mínima, y "*Estimación de BW (8 bits)*" como respuesta al mensaje *requerimiento de BW*. También se menciona que QoS es otro parámetro vital en la ejecución de un buen HO, por lo tanto, al igual que en BW, se debe de revisar si la BS objetivo puede garantizar el nivel de QoS requerido. Actualmente, se conocen 4 tipos básicos de servicio: UGS, rtPS, nrtPS y BE (sección 3.4.4).

Entonces, cuando la BS servidora recibe la notificación de HO en el cual se incluye la relación señal a ruido de la BSs vecinas, ésta envía una notificación a todas la BSs vecinas que pueden marcarse para un posible *handoff* (BS objetivo). Sin embargo, la BS servidora no sabe que capacidades de ancho de banda y que tipos de QoS pueden la BSs vecinas soportar. Por eso, la BSs vecinas deben responder a la notificación de HO mencionando si pueden soportar los requerimientos de ancho de banda y de calidad y servicio. La BSs vecinas pueden contestar con un simple mensaje tipo ACK para afirmar que si pueden soportar los requerimientos o con un NACK para afirmar que no pueden soportar los requerimientos solicitados para el HO. En la figura B.1 y B.2 (apéndice B), se pueden observar con detalle el posible flujo de mensajes inter BS en la ejecución de un HO, visto desde el MSS y desde la BS respectivamente.

4.4 ESTUDIO DE PROCEDIMIENTOS PARA *HANDOFF*

Existen numerosas propuestas que pueden ser estudiadas, como es el caso de [62], página temporal del grupo de trabajo IEEE 802.26e. Hablemos del primer caso:

Inicio de un *Handoff*: Basado en la calidad de la señal, tanto la BS como el MSS pueden iniciar el procedimiento de HO. Antes de comenzar el procedimiento HO, la BS vecina será notificada a través del *backbone* (parte central de la red) de que existe un requerimiento de *handoff*, entonces cada BS vecina notificará enviando un mensaje de regreso, sobre su disponibilidad y capacidad de atender el procedimiento de HO. Entonces toda la información concerniente al MSS, como información de la conexión, capacidades, seguridad, etcétera, es transmitida vía *backbone* a la BS vecina [31].

Entonces, cuando el *handoff* se está ejecutado, todas las estaciones vecinas son prevenidas. También se notifica a la BS que está actualmente dando el servicio. El MSS puede recomendar a la BS servidora, con que BS vecina se quiere cambiar (marcar como BS objetivo).

Después de la transición con la BS objetivo, el MSS ejecuta los siguientes pasos:

- I) *Obtiene los parámetros del canal uplink (UL)*: Este paso es similar al que se ejecuta cuando recién se entra a la red.
- II) *Autorización del MSS*: Durante este paso, el MSS ejecuta la parte de re-autorización. La BS objetivo identifica al MSS y éste continua con los parámetros de seguridad con los que estaba en la BS anterior.
- III) *Re-establecer conexión*: Durante este paso, la conexión que soporta el MSS se restablece, pero puede suceder que la nueva BS no pueda proporcionar algunos de los servicios o la conexión del SS (debido a la pérdida de recursos por ejemplo), entonces la conexión tendrá que cambiarse o perderse. Será la BS objetivo quien inicie el intercambio de mensajes necesario para re-establecer la conexión.
- IV) *Operación normal*: Es en este estado donde la operación normal comienza. El MSS aún tiene que restablecer una conexión IP con el propósito de obtener una dirección IP válida para propósitos de administración.

Como se puede apreciar, algunas de las fases que son ejecutadas cuando el MSS entra por primera vez a la red, no son necesarias ejecutar durante el procedimiento de *handoff*. Estas fases son:

- 1) **Fase de registro con la BS:** Durante esta fase, las capacidades relacionadas con el MSS son intercambiadas con la BS, por lo tanto, se asume que no es necesario volver a pasar información que ya se ha intercambiado durante el proceso de inicialización.
- 2) **Fase de transferir parámetros operacionales:** Ninguno de los datos que se encuentran en *configuration file* (archivo que se transfiere hacia el MSS durante esta etapa), se espera que cambie, por lo tanto, esta fase también puede ser saltada.
- 3) **Fase de establecer hora:** Es una fase no obligatoria, incluso en el proceso de inicialización. Por lo tanto, también puede ser saltada.

Sin embargo, se observa que la obtención de la dirección IP con la nueva BS no está definida, siendo que esta fase es una de la más problemáticas en lo que a HO respecta. También ha dejado por fuera QoS, es decir, la posibilidad de poder garantizar cierta calidad y servicio.

Los mensajes que pueden ser usados en este procedimiento de *handoff*, son las siguientes (ver figura 4.2):

I. Signal-strenght-query: Enviado de la BS al MSS para obtener información acerca de la calidad de la señal recibida por el MSS de la BS actual y de la BSs vecinas.

II. Signal-strength-response: Es la respuesta a la solicitud de "signal-strenght-query". También se puede enviar por el MSS a la BS sin que sea solicitado, para sugerir una programación en el canal *downlink* para buscar BS vecinas.

III. Handoff-request: Puede ser enviado por la BS o el MSS para indicar que se requiere un *handoff*. Cuando se envía desde la BS también se incluyen recomendaciones de las posibles BS. Entonces el MSS puede seleccionar entre estas recomendaciones. También se incluye una recomendación de cuando debería tomar lugar el *handoff*.

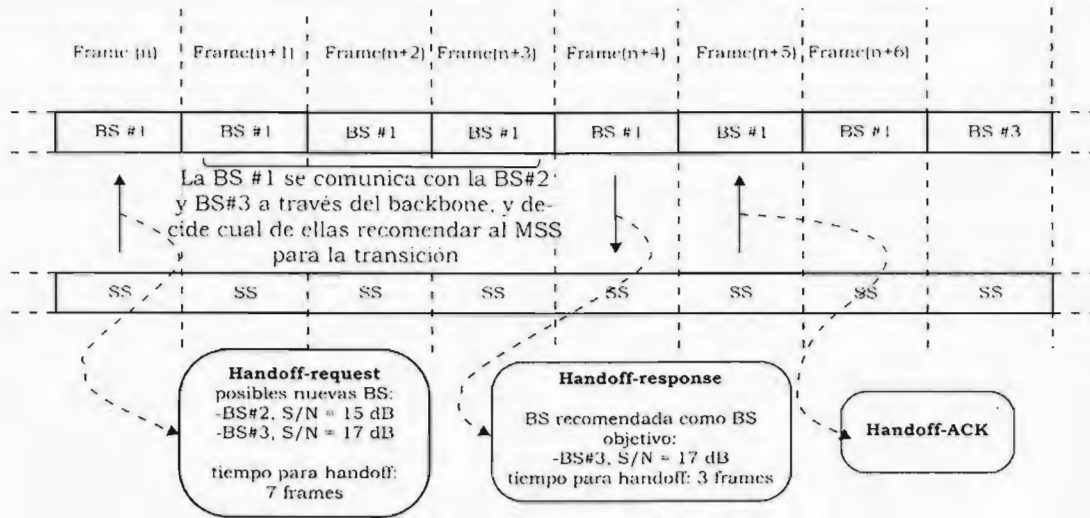


Figura 4.2 – Propuesta de procedimiento de *handoff* visto en el dominio del tiempo.

IV. *Handoff-response*: Enviado por la BS o el MSS como respuesta al mensaje “*handoff-request*”. Cuando se envía desde una BS el mensaje incluye una recomendación de la nueva BS a seleccionar. Esta recomendación puede ser ignorada por el MSS, aunque corre el riesgo de tomar una BS que tenga un nivel de servicio peor que el solicitado.

V. *Handoff ACK*: Enviado por la BS o por el MSS como respuesta al mensaje “*handoff-response*”. Termina el proceso de HO y garantiza además, que la BS y el MSS estén sincronizados (figura 4.2).

Los mensajes usados en la comunicación vía *backbone* (figura 4.2), son:

i) *BS-Host-Adv*: Este mensaje es enviado por una BS a otra BS vecina para notificar que cierto MSS se ha registrado con él. Este mensaje puede ser enviado por la BS vecina para pedir más información acerca del MSS y contiene la información que se aprecia en la figura 4.3.

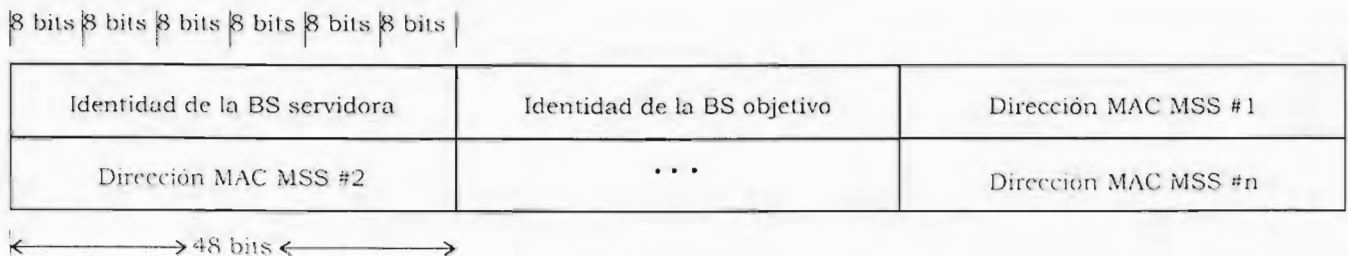


Figura 4.3 – Mensaje *BS-Host-Adv* para comunicación vía *backbone*.

ii) *SS-info-request*: Este mensaje es enviado de una BS a otra para pedir información acerca de un MSS. Normalmente este mensaje es enviado como una reacción a la llegada de un mensaje "BS-Host-Adv", o en casos donde el MSS está tratando de volver a entrar a la red después de un *handoff*. Este mensaje contiene la información que se aprecia en la figura 4.4.

8 bits | 8 bits | 8 bits | 8 bits | 8 bits | 8 bits |

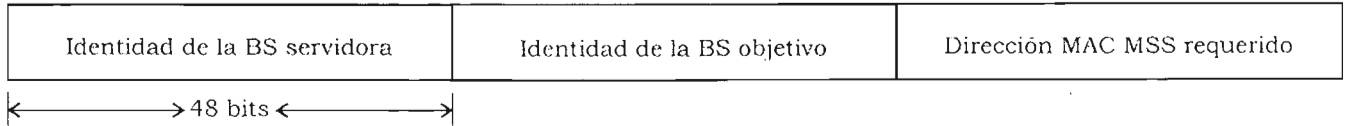


Figura 4.4 - Mensaje *SS-info-request*.

iii) *SS-info-response*: Es enviado de una BS a otra BS como respuesta a un mensaje "SS-info-request". Este mensaje contiene la información que se aprecia en la figura 4.5.

8 bits | 8 bits | 8 bits | 8 bits | 8 bits | 8 bits |

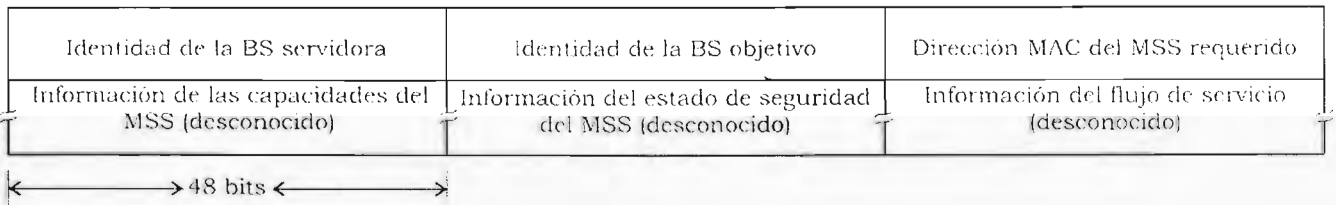


Figura 4.5 - Mensaje *SS-info-response*.

iv) *Handoff-notification*: Este mensaje es enviado por una BS que pide a un MSS que ejecute un *handoff*. Este mensaje se envía a todas la BSs vecinas para alertarlas de que un HO puede suceder, y contiene la información de la figura 4.6.

8 bits | 8 bits | 8 bits | 8 bits | 8 bits | 8 bits |

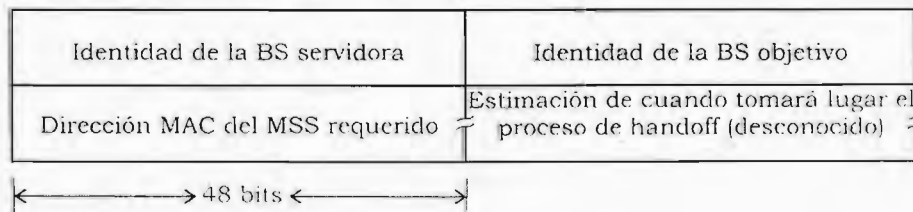


Figura 4.6 - Mensaje *Handoff-notification*.

v) *Handoff-notification-response*: Este mensaje es enviado de una BS a otra como respuesta al mensaje "*Handoff-notification*". Este mensaje sirve para notificar que se recibió correctamente el mensaje "*Handoff-notification*" y también contiene el nivel de servicio que el MSS puede esperar si es enviado a este. La información que contiene este mensaje se ve en la figura 4.7.

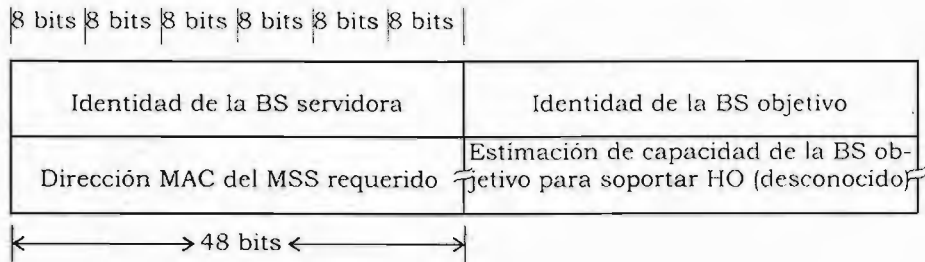


Figura 4.7 – Mensaje *Handoff-notification-response*.

4.5 ESTUDIO DE PROCEDIMIENTO DE *HANDOFF* "BREAK BEFORE MAKE"

Comúnmente, el procedimiento "break before make" es definido como sigue:

I) La decisión de ejecutar un HO ha sido tomada: Generalmente será el MSS quien tome la decisión, aunque también pudiera ser la BS servidora quien tome la decisión.

II) El MSS termina el servicio de conexión con la BS actual (BS servidora): Es donde todas las conexiones y relaciones entre el MSS y la BS son desconectadas y terminadas.

III) El MSS re-entra a la red con la BS objetivo usando un procedimiento rápido de conexión: Todas las conexiones son re-establecidas de acuerdo a la disponibilidad de recursos en la BS objetivo.

Esta forma de HO, quizá se pudiera ejecutar cuando el tipo de servicio que se le está prestando al MSS en ese momento sea de bajo requerimiento, ya que existe un momento en el que se rompe la actual conexión y se empieza otra nueva conexión con la nueva BS durante la cual no existe flujo de datos.

En la figura 4.8 se aprecia el concepto "break before make" de acuerdo con [30].

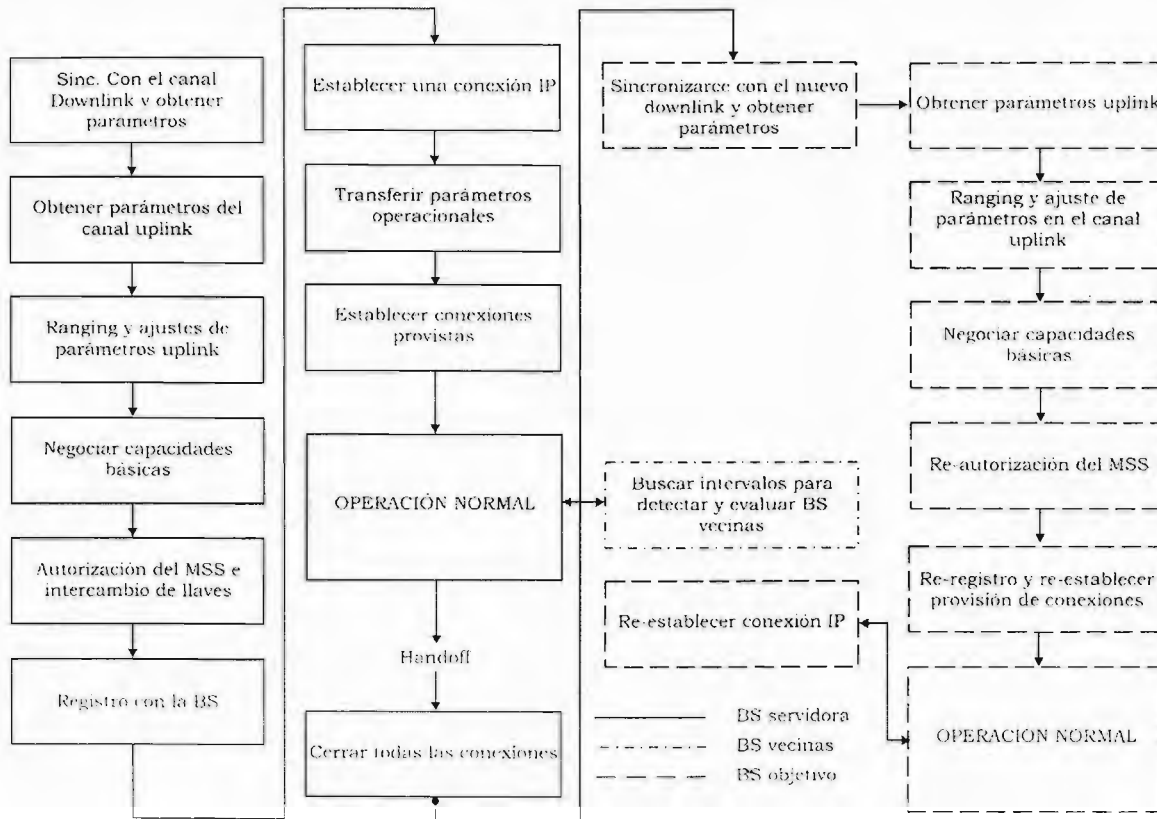


Figura 4.8 - *Handoff* "break before make".

Ahora, el término usado para referirse al momento en el que un MSS deja una BS pero no comienza una operación normal con otra BS, se nombrará como *selección de célula (cell selection)* [30]. Este procedimiento no involucra la terminación de una conexión existente y la reconexión con otra BS. Un MSS puede ejecutar "selección de célula" si tal acción es necesaria debido a la calidad de la señal. Ninguna acción por parte de la BS es necesaria durante la "selección de célula". En la figura 4.9, se puede apreciar este mecanismo.

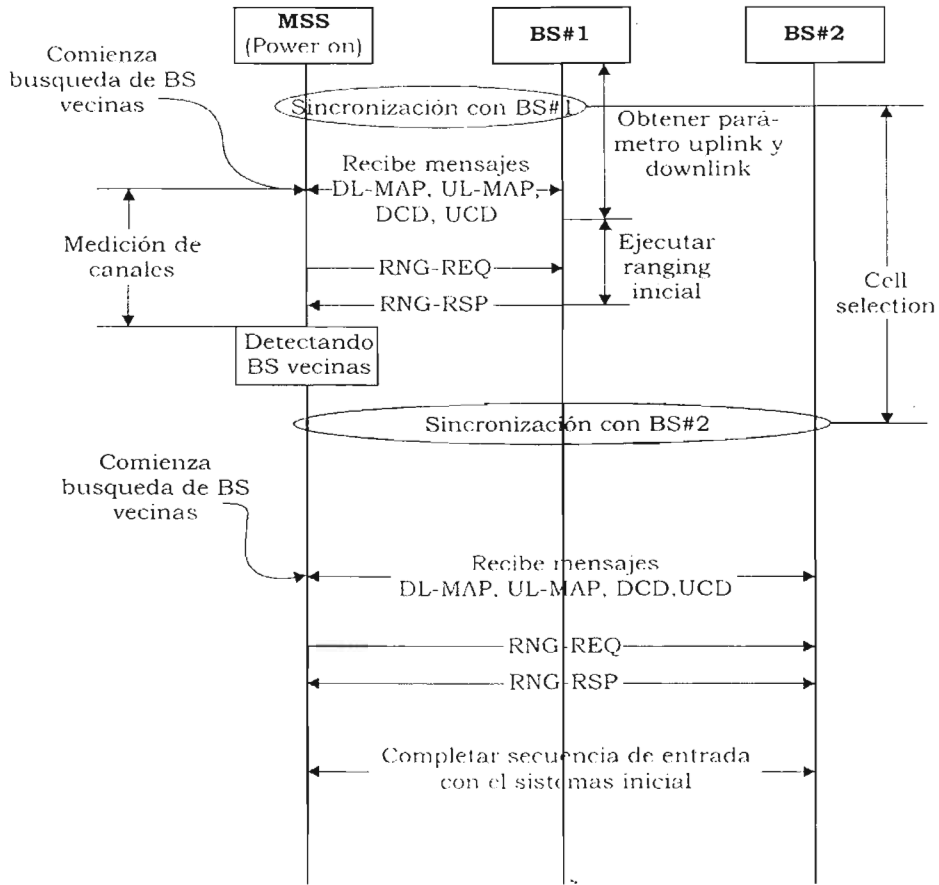


Figura 4.9 - Procedimiento de selección de célula.

El procedimiento de *handoff* "break before make" (figura 4.8) visto por fases se define como sigue:

A) Inicio de HO: Tanto la BS como el MSS pueden iniciar un *handoff*, esto lo hacen enviando los mensajes "BSHO-REQ MAC" o "MSSHO-REQ MAC" respectivamente. Se sabe de antemano que en la mayoría de los casos será el MSS quien inicie el *handoff* aunque también podrá darse el caso donde sea la BS quien inicie el *handoff* con el fin de repartir la carga entre BS. Cuando el MSS envía el mensaje de "MSSHO-REQ" puede indicar una posible BS objetivo. El mensaje "MSSHO-REQ" también puede incluir una estimación del tiempo necesario para ejecutar el *handoff*.

En el lado de la BS, antes de enviar un mensaje "BSHO-REQ" o después de recibir un mensaje "MSSHO-REQ", la BS deberá notificar a la BSs vecinas a través del backbone sobre la petición de *handoff*. La BS servidora deberá entonces adquirir de la BS vecinas, información acerca de sus capacidades para cumplir los requerimientos del MSS.

Después de recibir un mensaje "MSSHO-REQ" o "BSHO-REQ", la parte receptora deberá responder con un mensaje "HO-RSP MAC". Cuando este mensaje es enviado por la BS, este puede incluir una recomendación sobre que BS puede resultar la mejor opción para ejecutar el HO. El MSS puede ignorar la recomendación anterior con el riesgo de escoger otra BS que le proporcione un servicio de menos calidad que la BS recomendada. El mensaje "HO-RSP MAC" también puede anexar un estimado del tiempo que el HO podría tomar para ejecutarse por completo.

B) Terminación con la BS servidora: Después que el intercambio de mensajes "[MSS/BS]HO-REQ/HO-RSP MAC" es completado, el MSS puede comenzar el HO. Pero primero debe cerrar todas las conexiones con la BS actual enviando el mensaje "DEL-ALL MAC". En la recepción del mensaje "DEL-ALL MAC", la BS servidora puede cerrar todas las conexiones y asociaciones con el MSS (break before make).

C) Re-entrar con la BS objetivo: Cuando se quiere re-entrar con la BS objetivo, la BS objetivo así como todas la BSs vecinas, son advertidas de que un HO está en proceso. En este proceso se ejecutan las funciones como se describe en la figura 4.10. A continuación se describen estos pasos:

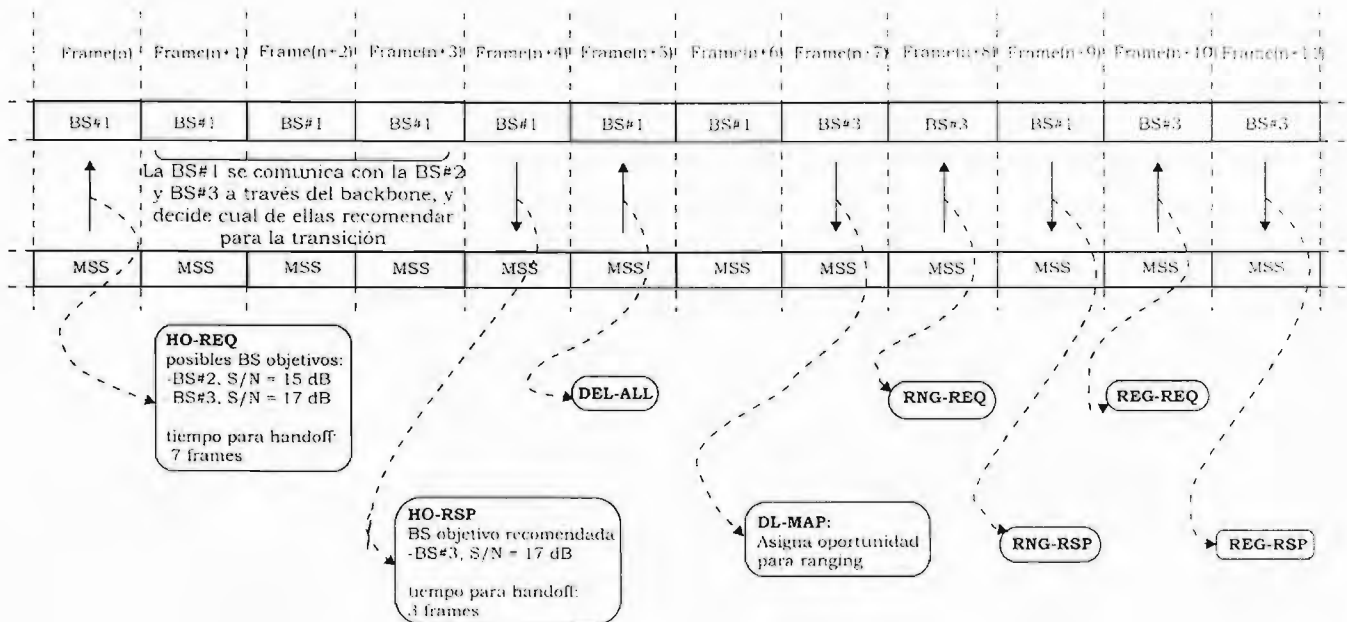


Figura 4.10 - Handoff "break before make" en el dominio del tiempo.

C.I) Sincronización con el enlace de bajada y obtención de parámetros: Para un MSS que ha usado su intervalo de búsqueda (*scanning interval*) para sincronizarse con su BS objetivo y ha decodificado el mensaje "NBR-ADV", este paso se hará de forma inmediata. En caso contrario, este procedimiento se hará como se define para el caso -entrar inicialmente a una red- o inicialización (sección 3.4.7).

C.II) Obtener parámetros del enlace de subida: De nuevo, para un MSS que ha decodificado previamente el mensaje "NBR-ADV", este paso se hará de forma inmediata. Para el caso contrario, este procedimiento se hará como se define para el caso -entrar inicialmente a una red- o inicialización (sección 3.4.7).

C.III) Ajuste de los parámetros del enlace de subida y ranging: De nuevo, para un MSS que ya ha usado su intervalo de tiempo para ejecutar la fase de *ranging* con la BS objetivo, este paso será ejecutado inmediatamente. En el caso contrario, este paso se ejecuta igual que cuando se entra inicialmente en la red. Durante este paso, al MSS se le asigna un nuevo CID en la BS objetivo.

C.IV Negociando capacidades básicas: Este paso es idéntico al que se ejecuta cuando se entra inicialmente a una red (proceso de inicialización).

C.V) Re-autorización del MSS: Durante este paso, el MSS ejecuta la parte de re-autorización del protocolo PKM usado para entrar inicialmente a la red. La BS identifica al usuario y el contexto de seguridad no cambia, ya que este se transfiere vía backbone.

C.VI Re-registro y re-establecimiento de conexiones: Este paso es equivalente a varios pasos en el proceso de inicialización. En este paso, el MSS se registra nuevamente con la BS. En este lapso, el MSS se salta el paso de -establecer conectividad IP- donde se le asignaría una dirección IP. Este paso no es realmente saltado durante el HO, pero es pospuesto hasta que se alcanza el estado de operación normal.

C.VII transferir parámetros operacionales y establecer hora del día: Estos pasos son saltados, ya que no se espera que la información contenida en ellos, vaya a cambiar.

C.VIII Comenzar operación normal: En este paso, se comienza con la operación normal. El MSS re-establece la conexión IP como se especifica en el proceso de inicialización (sección 3.4.7).

Los mensajes usados en este procedimiento de HO se presentan en el apéndice B.2.

4.6 PROCEDIMIENTOS DE *HANDOFF* EN SISTEMAS CELULARES GSM

Los sistemas celulares forzosamente tienen que contar con procedimientos de HO bien definidos y confiables, por eso haremos un breve estudio de los mismos. Sin embargo, los sistemas celulares aún no tienen un proceso HO sobre IP con la complejidad necesaria para soportar servicios de datos con la QoS y capacidades que se logran con el estándar IEEE 802.16. Aunque por otro lado existen numerosas propuestas para HO sobre IP [5] entre las cuales destaca mobile IP [40, 41] y celular IP. En realidad este tema está fuera de los límites de este trabajo ya que el estándar IEEE 802.16 solo se limita a definir las capas físicas y MAC.

HANDOVER EN GSM

Para no tener una imagen tan abstracta de GSM, en la figura 4.11 se muestra su arquitectura básica. Una descripción completa de cada uno de los bloques se puede encontrar en [32].

En GSM el proceso de handover [2] se lleva a cabo mediante los siguientes pasos:

- 1) **Medición de valores:** Se refiere a las mediciones efectuadas sobre el canal y sobre las transmisiones de datos.
- 2) **Petición de handover:** Una petición de handover se genera basándose en los valores obtenidos de las mediciones.
- 3) **Decisión de handover:** Se efectúa cuando se hace una petición de handover.
- 4) **Handover:** En este paso, es cuando se dan los intercambios de mensajes, señalamientos y cambios de canal tanto en la estación móvil (MS) como en la estación base (BTS).

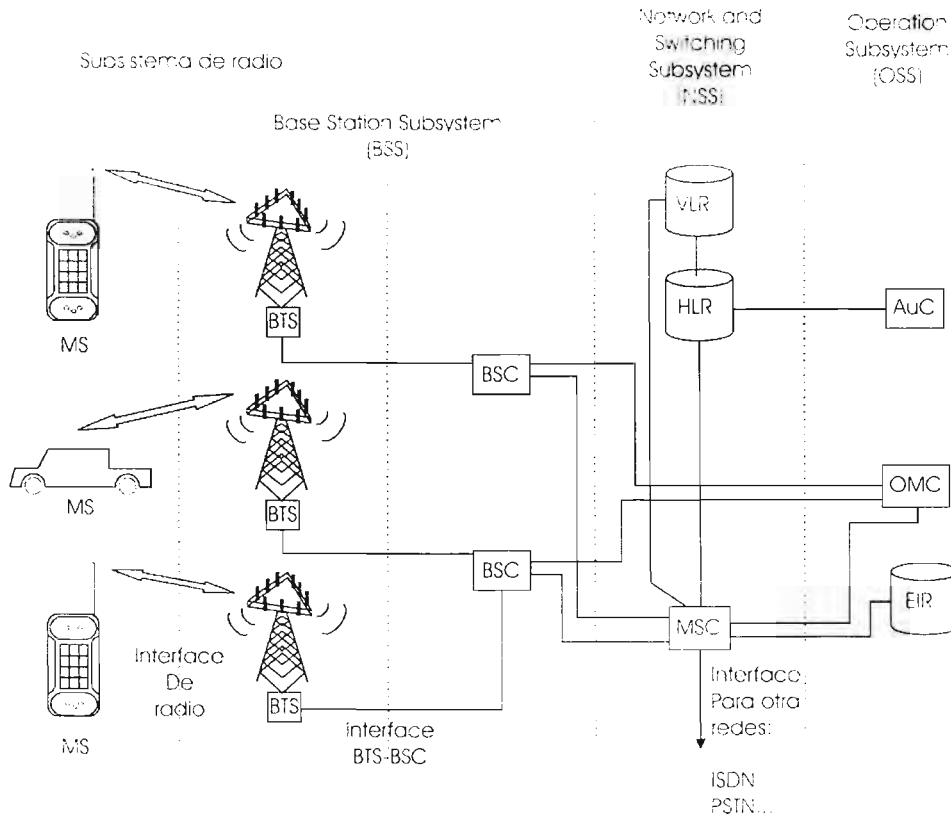


Figura 4.11 – Arquitectura básica de GSM.

Donde:

- | | |
|---|---|
| AuC = Authentication Centre. | BSC = Base Station Controller. |
| BTS = Base Transceiver Station. | EIR = Equipment Identity Register. |
| HLR = Home Location Register. | MS = Mobile Station. |
| MSC = Mobile Services Switching Centre. | OMC = Operating and Maintenance Centre. |
| VLR = Visitor Location Register. | |

La medición de valores es una fase complicada y a la vez delicada. Un MS está enviando reportes a la BTS sobre las mediciones que efectúa sobre la calidad de la transmisión en promedio cada 480 ms y como mínimo una vez por segundo [2]. Entre la información que se incluye dentro de estos reportes están los parámetros sobre la conexión actual, así como de las condiciones del radio enlace con respecto a las células vecinas. Según el protocolo, un MS no puede reportar más de 6 células vecinas.

Las mediciones de las señales provenientes de las BTS vecinas es algo difícil, sin embargo, el MS puede sacar provecho de capacidad de transmisión en half-duplex, así como del hecho que las transmisiones en el canal ascendente y descendente se hacen en diferente tiempo y aprovechar los *slots* de ocio para usar su receptor en la búsqueda de señales de BTS vecinas.

Cuando una petición de handover se efectúa (basada en los valores obtenidos en las mediciones), la decisión final de efectuar el procedimiento de HO es tomada por el MSC, quien simplemente revisa si los valores reportados están fuera de los valores establecidos como umbral (*threshold*).

Finalmente el intercambio de mensajes en GSM varía dependiendo del tipo de HO a ejecutar. En GSM se definen los siguientes tipos de HO:

- 1) **Intercell handover:** Se refiere a un cambio de conexión dentro de la misma célula. Como por ejemplo, el cambio de frecuencia o de secuencias de *slots* debido a posibles interferencias.
- 2) **Intercell / intra BSC handover:** Se refiere a un cambio de canal entre dos células distintas que están siendo operadas bajo el mismo BSC.
- 3) **Inter BSC / Intra MSC handover:** Es cuando el cambio de conexión se da entre dos células que están operando con BSC distintos pero que operan bajo el mismo MSC.
- 4) **Inter MSC handover:** El cambio de conexión se da entre dos células que se encuentran operando bajo MSC distintos.

Podemos apreciar como GSM utiliza la habilidad de sus usuarios de poder mantener una comunicación half-duplex para monitorear BTS vecinas con más facilidad. Los usuarios IEEE802.16 igualmente tienen esta habilidad y pueden adoptar este procedimiento. Otro punto importante, es la posible utilización de servidores de HO en IEEE 802.16, que serían el equivalente de los MSC de GSM, aunque este punto tendrá que ser estudiado con más detalle.

4.7 PROPUESTA DE PROCEDIMIENTO *HANDOFF* PARA EL ESTÁNDAR IEEE 802.16

El objetivo principal al realizar un nuevo diseño de procedimiento de HO dentro del estándar IEEE 802.16, es reducir al mínimo posible el retardo por cambio de conexión y garantizar en lo posible que la QoS así como el flujo de servicio que el MSS había establecido en un principio, se siga manteniendo.

Para lograr lo anterior, se hace uso de mensajes de aviso que son transmitidos constantemente por cada BS dentro de la red. El término común para este tipo de mensajes en inglés es "*beacons*". Estos mensajes como ya se ha visto, deben transmitirse en forma broadcast por cada una de las estaciones base.

Gracias a los *beacons* o "avisos", un MSS puede saber desde antes de ejecutar el procedimiento de *handoff*, cuales BSs vecinas están al alcance y que relación SNR guarda con cada una de ellas.

Para que un MSS pueda darse tiempo de escuchar estos "avisos", podrá hacer uso de su habilidad half-duplex para escuchar señales provenientes de otras estaciones vecinas, de tal forma que no se requiere cambiar la configuración o frecuencia de su módulo transmisor, sino solamente de su módulo receptor.

El hecho de que un MSS pueda escuchar estos "avisos", le resultará en una ejecución de HO mucho más rápido como se verá en el capítulo 5. Un MSS no reportará que ha podido captar señales de una estación base vecina, si estas señales superan el límite de $BER = 1 \times 10^{-6}$ después de pasar FEC (ver tabla 4.1). De esta forma podremos evitar falsos HO, ya que un MSS puede estar pasando por alguna zona de difícil acceso para la señal, como un túnel, desnivel o estacionamiento subterráneo.

modulación	Tasa de codificación	SNR recibido (dB)
BPSK	1/2	6.4
QPSK	1/2	9.4
	3/4	11.2
16-QAM	1/2	16.4
	3/4	18.2
64-QAM	1/2	22.7
	3/4	24.4

Tabla 4.1 – SNR aceptado en el receptor para un BER menor a 1×10^{-6} [24].

Tanto la BS servidora como el MSS podrán solicitar que se ejecute el procedimiento de *handoff*.

4.7.1 MECANISMO Y FLUJO DE MENSAJES DURANTE LA ETAPA DE *HANDOFF* ACTIVADO DESDE EL MSS

En la figura 4.12, se muestra el flujo de mensajes cuando la petición de *handoff* proviene del MSS. Por lo que podemos ver, partimos de que el MSS contiene una lista de la BSs vecinas que ha monitoreado (1). Los datos que deberá recopilar por cada BS vecina a través de los *beacons*, se describen en la tabla 4.2.

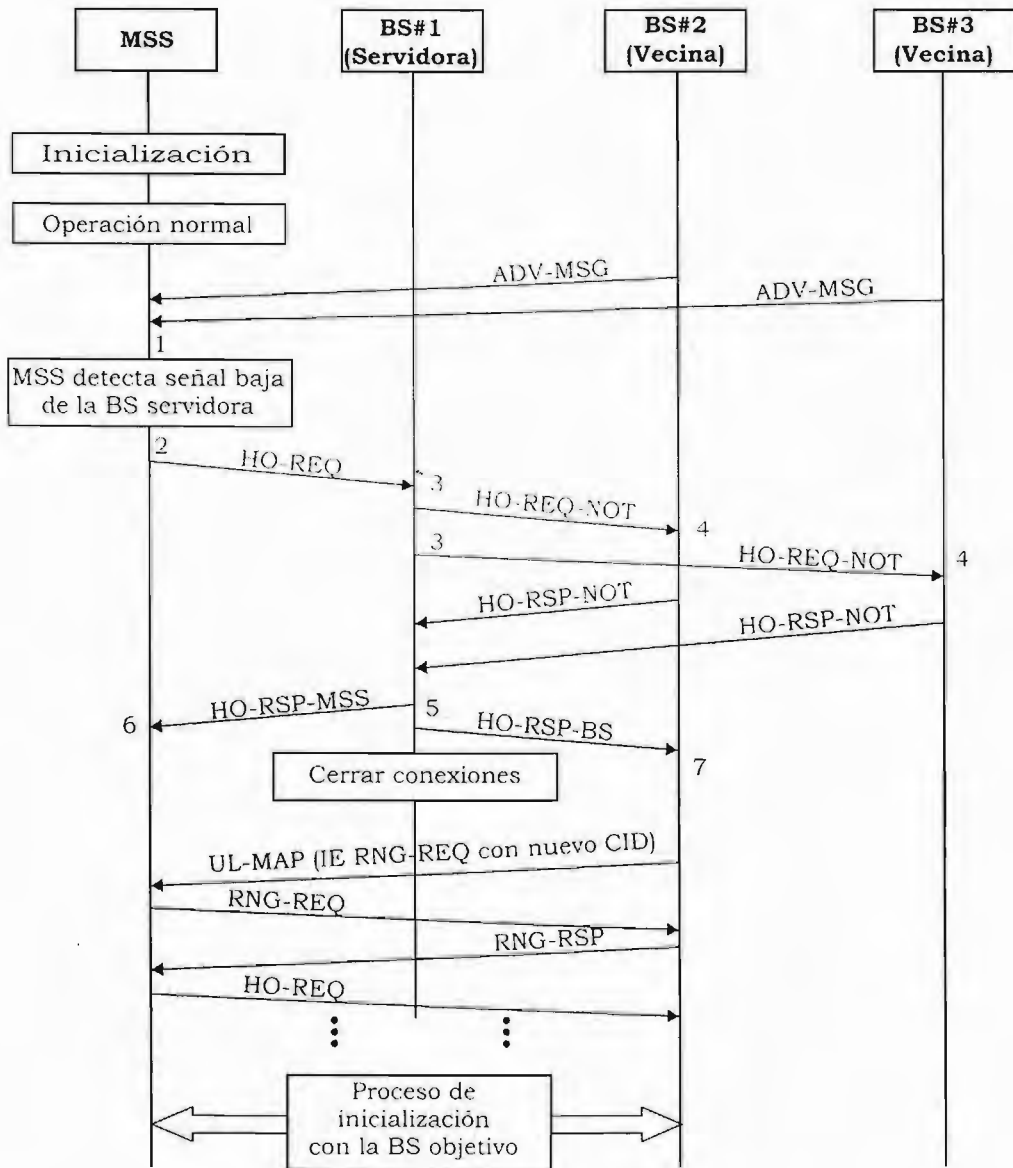


Figura 4.12 - Flujo de mensajes cuando el proceso de *handoff* es activado por el MSS.

1.- BS ID (identificador de BS)
2.- Operador ID (identificador del operador)
3.- Contador de cambio de configuración
4.- UCD y DCD
5.- SNR

Tabla 4.2 - Datos recopilados por el MSS de cada BS vecina que ha logrado captar.

Cuando el MSS empieza a detectar que la señal proveniente de la BS servidora, empieza a rebasar los límites de umbral ($BER = 1 \times 10^{-6}$) (2) envía el mensaje *HO-REQ* hacia la BS servidora. (Los formatos y contenidos de los mensajes se describen en la sección 4.7.4). Dentro del mensaje *HO-REQ* se deben incluir los datos obtenidos (tabla 4.2) por cada BS vecina mediante el mensaje *ADV-MSG*.

El MSS ahora deberá esperar la llegada del mensaje *HO-RSP-MSS* (6) de la BS servidora. Por otro lado, en paralelo, la BS servidora manda el mensaje *HO-REQ-NOT* (3) a cada una de la BSs vecinas que el MSS ha incluido dentro del mensaje *HO-REQ*. A diferencia de otras propuestas, aquí no es necesario que una BS esté constantemente informando a la BSs vecinas cuando un MSS se ha dado de alta, o enviar notificaciones de *handoff* a todas la BSs vecinas, reduciendo así considerablemente tanto el tráfico como los recursos de la misma. El mensaje *HO-REQ-NOT* contiene entre otros parámetros, la QoS y el tipo de conexión que el MSS necesita para continuar con su operación actual.

Cada BS vecina que haya recibido el mensaje *HO-REQ-NOT* deberá enviar como respuesta, el mensaje *HO-RSP-NOT* (4) a la BS servidora. Si la BS vecina si puede aceptar al MSS con los requerimientos especificados, deberá incluir el CID que el MSS ocupará dentro de esa BS vecina, también deberá especificar si necesita más información del MSS y en caso de que la cuenta de cambio de configuración de los mensajes DCD y UCD hayan cambiado, la nueva configuración de dichos mensajes. Si la BS vecina no puede aceptar al MSS con lo requerimientos especificados, deberá incluir además la QoS que puede en su caso concederle al MSS.

Cabe destacar que el envío de mensajes entre BS se realiza mediante un enlace dedicado y con la mayor prioridad, por lo que no se requiere ningún método de acceso para el envío de los mismos, y por lo tanto, los mensajes entre BS deberán intercambiarse de una forma fluida y sin contratiempo.

Una vez que la BS servidora ha detectado que todas la BSs vecinas a quienes les envió el mensaje *HO-REQ-NOT* le han contestado con el mensaje *HO-RSP-NOT*, deberá recopilar toda la información y tomar la decisión de cual BS vecina será seleccionada como BS objetivo (5).

El número de BS vecinas que un MSS espera poder captar son dos, ya que como se ve en la figura 4.13 un MSS difícilmente podría estar en la zona de cobertura de más de 2 BS vecinas.

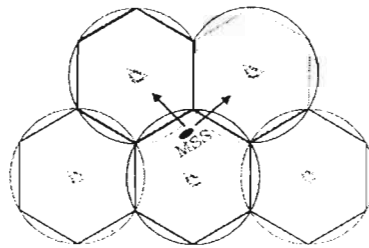


Figura 4.13 – Número de BS vecinas que un MSS puede captar mediante los mensajes *ADV-MSG*.

Para la elección de la BS objetivo, la BS servidora elegirá aquella que en primer lugar pueda atender de la mejor forma al MSS de acuerdo con sus necesidades de QoS y ancho de banda disponible para el mismo. En caso de que la BSs vecinas tengan total disponibilidad para atender al MSS, el siguiente parámetro a tomar en cuenta será SNR. La que tenga mejor SNR será elegida como BS objetivo. Ya que hemos llegado a este punto, la BS servidora mandará dos mensajes. El primero de ellos *HO-RSP-MSS* (6) irá dirigido al MSS y dentro del mismo se informará cual BS ha sido marcada como BS objetivo, así como el CID que será válido con la BS objetivo. También se incluirán los mensajes UCD y DCD si estos cambiaron con respecto a los UCD y DCD que el MSS recibió en un principio a través de los mensajes *ADV-MSG*. El segundo mensaje que enviará la BS servidora se llama *HO-RSP-BS* (7), el cual se manda exclusivamente a la BS vecina que ha sido marcada como BS objetivo. Dentro del mensaje, se indica el CID del MSS (el que tiene actualmente) que va realizar el *handoff*, y si es el caso, más información relativa al mismo. El formato de los mensajes se detalla en la sección 4.7.4. (de la sección 4.7.5 a la sección 4.7.7 se aprecian los diagramas de flujo del procedimiento de *handoff*). Por último, la BS servidora cierra conexiones con el MSS.

El procedimiento de *handoff* no termina aquí, aún falta que el MSS re-inicialice con la BS objetivo antes de alcanzar el modo de operación normal terminado así el proceso de *handoff*. El proceso de re-inicialización se ve en la sección 4.7.3.

4.7.2 MECANISMO Y FLUJO DE MENSAJES DURANTE LA ETAPA DE *HANDOFF* ACTIVADO DESDE LA BS

Para el caso de que la BS sea quien active el procedimiento de *handoff*, la única diferencia reside en el envío del mensaje *HO-BS-REQ*, que será enviado para disparar el mecanismo de *handoff* y al cual, seguirán todos los mensajes descritos en la sección 4.7.1 tal y como se muestra en la figura 4.14.

Cabe destacar, que siempre que la BS active el mecanismo de *handoff*, automáticamente asignará un IE en el UL-MAP para que el MSS mande el mensaje *HO-REQ* sin necesidad de entrar en contención.

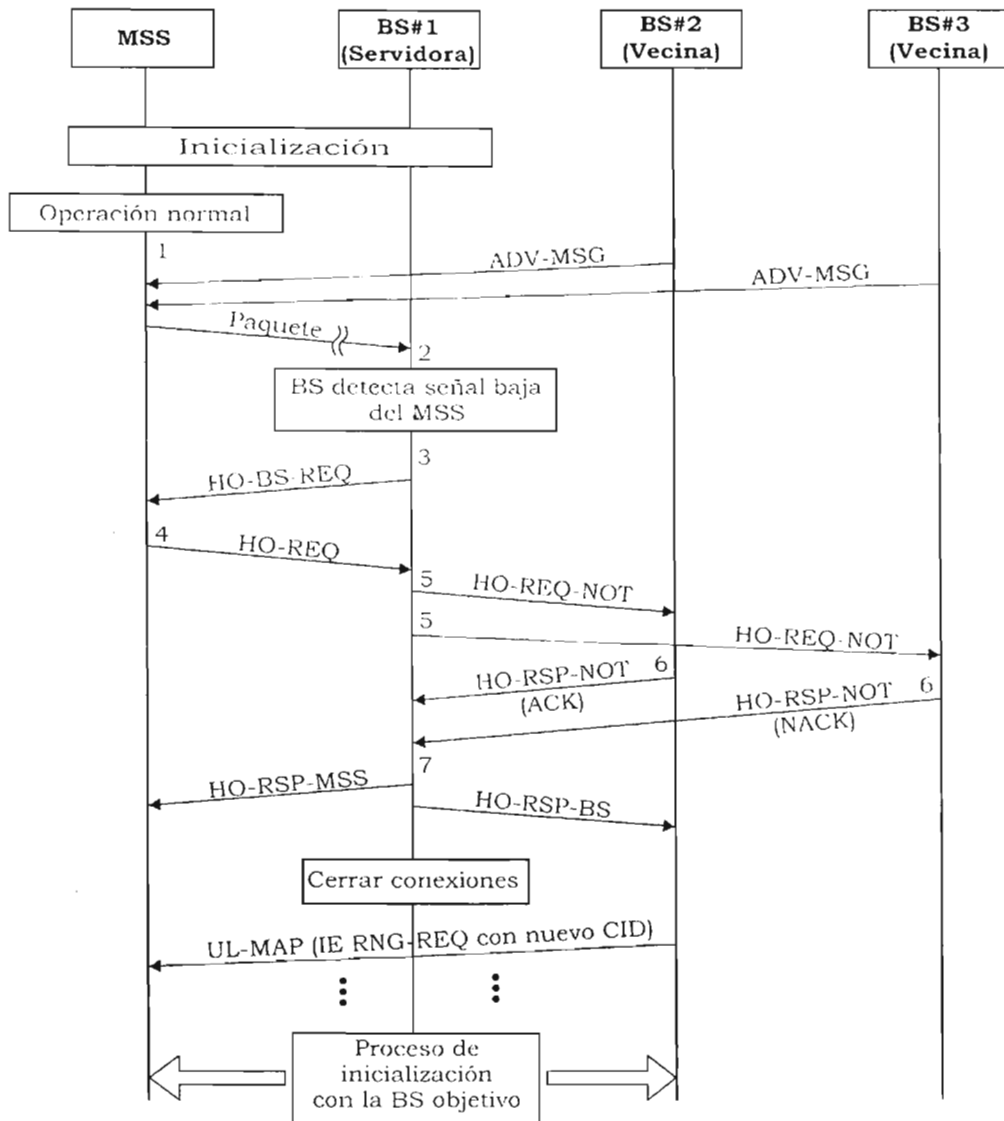


Figura 4.14 - Flujo de mensajes cuando el proceso de *handoff* es activado por la BS.

4.7.3 PROCESO DE RE-INICIALIZACIÓN CON LA NUEVA BS (BS OBJETIVO) DURANTE EL PROCEDIMIENTO DE *HANDOFF*

Una vez que la BS objetivo ha sido alertada acerca de un nuevo MSS que está por entrar a sus dominios mediante el mensaje *HO-RSP-BS*, empezará a asignar un IE para *ranging* con el nuevo CID del MSS que está en proceso de *handoff* (figura 4.15). El offset considerado para este MSS en la programación de sus IE para el primer mensaje *RNG-REQ*, será el máximo considerando que el MSS seguramente se encuentra en el borde de la cobertura. El offset será ajustado de la misma forma que en el proceso normal de inicialización.

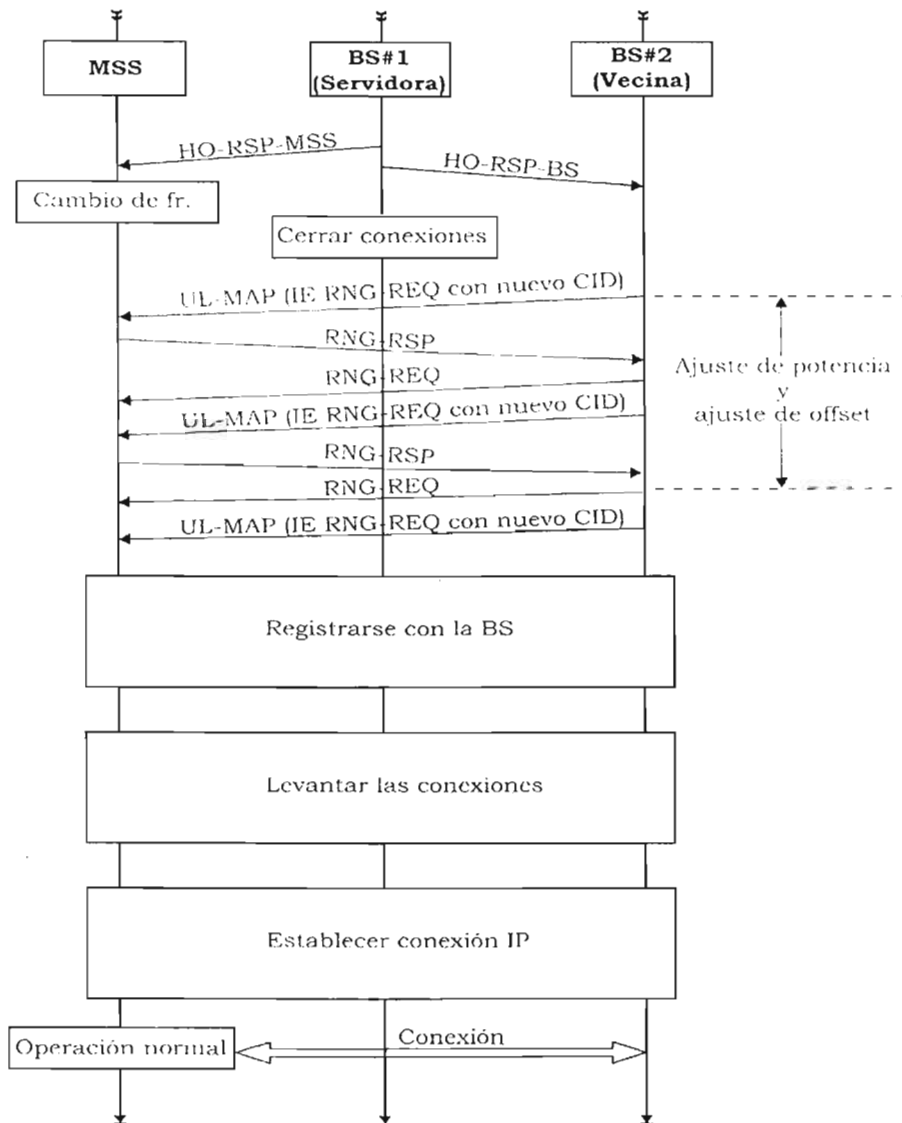


Figura 4.15 - Proceso de re-inicialización con la BS objetivo.

Por otra parte, el MSS una vez que ha recibido el mensaje *HO-RSP-MSS*, dejará de transmitir datos aunque tenga paquetes pendientes en la cola de espera. Si un paquete se genera en este momento, será trasladado hacia una cola especial mientras termina la parte crítica del cambio de conexiones. El MSS realizará entonces, el cambio de frecuencias tanto en su transmisor como en su receptor para tratar de sincronizarse con la BS objetivo.

EL MSS ya contiene la información relativa a los mensajes *DL-MAP* y *UL-MAP*, por lo que solo tendrá que sincronizarse con la BS objetivo. Una vez que lo ha logrado, empezará a buscar en el mensaje *UL-MAP* un IE asignado a su nuevo CID para iniciar el proceso de re-inicialización. Nótese que a diferencia del proceso de inicialización común, aquí el MSS nunca tendrá que entrar en contención, acelerando el proceso de re-inicio y dejando por fuera, la pérdida desconocida de tiempo por posibles colisiones sucesivas.

Durante el proceso de *ranging*, a diferencia del proceso normal de inicialización donde un MSS empieza transmitiendo con una potencia mínima, el MSS que por razones obvias se encuentra en la frontera de la cobertura, empezará transmitiendo con una potencia que se ha calculado de acuerdo a la cobertura de la BS. En el apéndice C, se muestra el modelo de propagación utilizado en este cálculo.

Los parámetros que son intercambiados durante la etapa de "negociar capacidades básicas" y "autorización e intercambio de llaves", ya han sido traspasadas entre la BS servidora y la BS objetivo mediante el mensaje *HO-RSP-BS*, por lo que estas etapas son saltadas. La etapa de "transferir parámetros adicionales" también es saltada, porque no se espera como se menciona en [31] que estos parámetros cambien. La etapa de "tiempo del día" también ya ha sido establecida durante el proceso de inicialización normal, por lo que no es necesario que se lleve a cabo otra vez. La etapa de "registrarse con la BS" y "levantar las conexiones" solo conlleva el intercambio de dos mensajes para el primero y cuatro para el segundo, y si tomamos en cuenta que durante la etapa de re-inicialización el MSS no deberá entrar en región de contención, estos pasos deberán ser completados rápidamente.

Cuando el MSS está trabajando bajo el protocolo IP, necesita forzosamente ejecutar la fase "establecer conexión IP", la cual se ve como la más problemática y tardada del proceso. Como ya se mencionó anteriormente, existen varias propuesta para movilidad con IP, aunque están fuera del alcance de este trabajo.

4.7.4 FORMATO DE LOS MENSAJES DE INTERCAMBIO DURANTE EL MECANISMO DE *HANDOFF*

1) *HO-BS-REQ*: El mensaje *HO-BS-REQ* es enviado por la BSs hacia el MSS cuando la primera detecta una señal de recepción baja proveniente del MSS para activar el mecanismo de *handoff*. Este mensaje se utiliza únicamente para disparar el mecanismo de *handoff* y no contiene campos, únicamente el subencabezado tal y como se muestra en la figura 4.16.

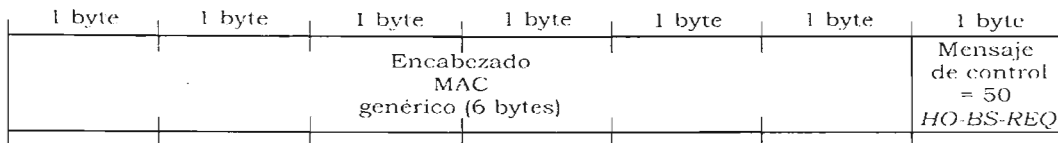


Figura 4.16 - Formato del mensaje *HO-BS-REQ*.

2) *HO-REQ*: Cuando el MSS detecta que la señal proveniente de la BS está débil, envía el mensaje *HO-REQ* hacia la BS para activar el mecanismo de *handoff*. En caso de que sea la BS quien active primero el mecanismo de *handoff* enviando el mensaje *HO-BS-REQ* al MSS, este deberá responder con el mensaje *HO-REQ*. El formato del mensaje *HO-REQ* se muestra en la figura 4.17 y contiene los siguientes campos:

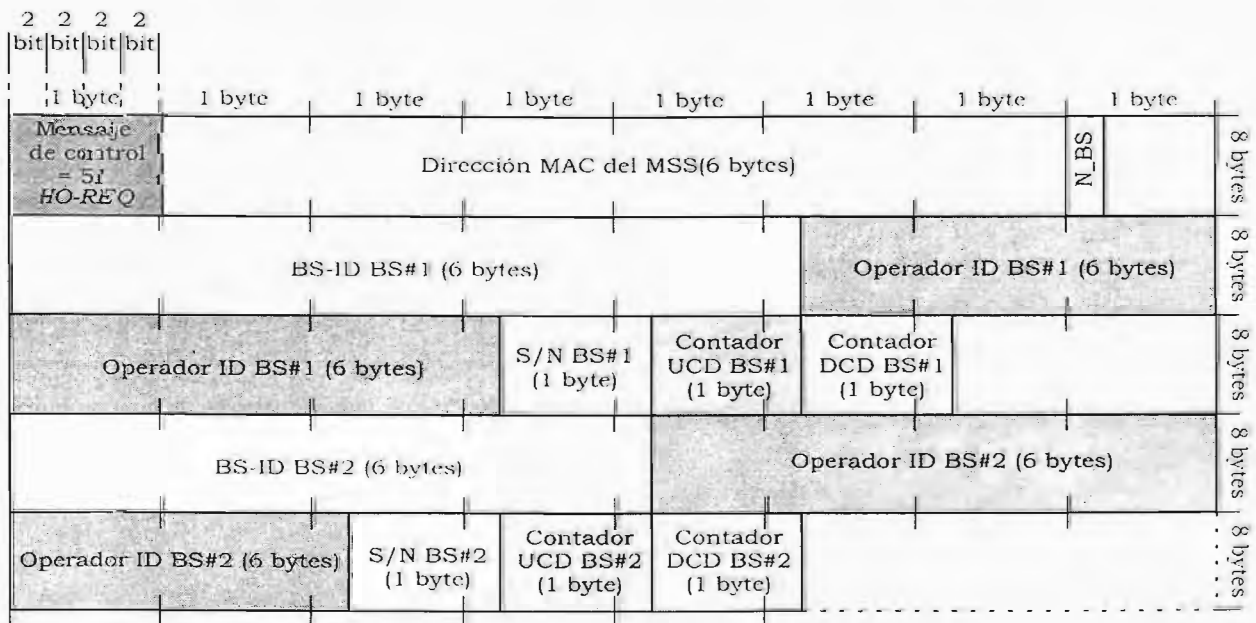


Figura 4.17 - Formato del mensaje *HO-REQ*.

- 1) MAC MSS: dirección de 48 bits única asignada durante el proceso de fabricación.
- 2) N_BS: Número de BS vecinas que ha detectado.
- 3) Por cada BS vecina que se ha detectado:
 - 3.1) SNR: relación señal a ruido.
 - 3.2) BS-ID: Identificador único de la BS servidora.
 - 3.3) Operador ID: Identificador único del operador.
 - 3.4) Contador UCD: El mismo campo de *configuration change count* del mensaje UCD. Este contador de 8 bits, se incrementa en uno cuando cualquier valor del canal descrito cambia.
 - 3.5) Contador DCD: El mismo campo de *configuration change count* del mensaje DCD. Este contador de 8 bits, se incrementa en uno cuando cualquier valor del canal descrito cambia.

3) **HO-REQ-NOT**: EL mensaje *HO-REQ-NOT* es enviado por la BS servidora, justo después de recibir el mensaje *HO-REQ* hacia todas la BSs vecinas que han sido registradas por el MSS. En la figura 4.18 se aprecia su formato. Los campos son los siguientes:

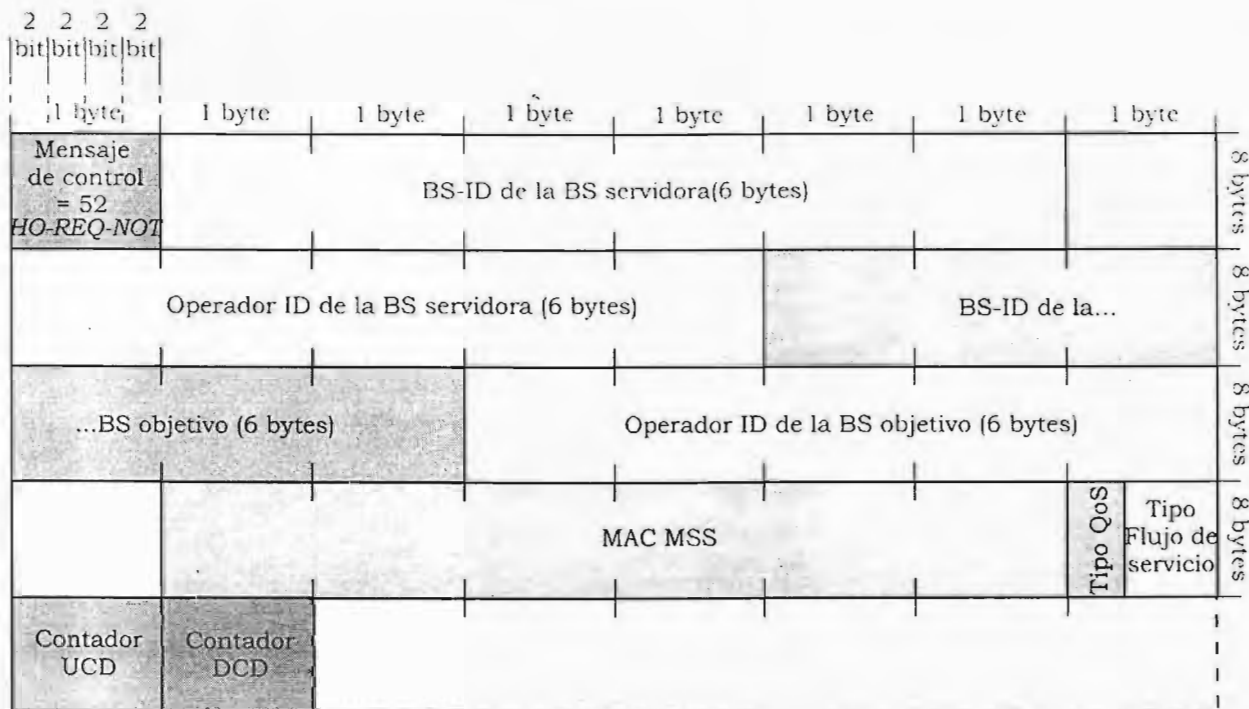


Figura 4.18 - Formato del mensaje *HO-REQ-NOT*.

- 1) BS-ID de la BS servidora: Identificador único de la BS servidora.
- 2) Operador ID de la BS servidora: Identificador único del operador de la BS servidora.
- 3) BS-ID de la BS objetivo: Identificador único de la BS vecina.
- 4) Operador ID de la BS objetivo: Identificador único del operador de la BS vecina.
- 5) MAC MSS: Dirección de 48 bits única asignada durante el proceso de fabricación.
- 6) Tipo de QoS: QoS relacionada con el MSS justo en el momento antes de ejecutar el procedimiento de *handoff*.
- 7) Flujo de servicio: Para conocer si el MSS tiene una conexión de VoIP, teleconferencia o alguna otra.
- 8) Contador de cambio de configuración UCD: Igual que *configuration Change count* del UCD.
- 9) Contador de cambio de configuración DCD: Igual que *configuration Change count* del DCD.

4) HO-RSP-NOT: Enviado por cada una de las BS vecinas que recibieron el mensaje de HO-REQ-NOT hacia la BS servidora, para indicar su disponibilidad de atender al MSS que está necesitando de un cambio de conexión. En la figura 4.19 se aprecia el formato de la misma y los campos que se incluyen son:

- 1) BS-ID de la BS objetivo: Identificador único de la BS vecina.
- 2) Operador ID de la BS objetivo: Identificador único del operador de la BS vecina.
- 3) BS-ID de la BS servidora: Identificador único de la BS servidora.
- 4) Operador ID de la BS servidora: Identificador único del operador de la BS servidora.
- 5) MAC MSS: Dirección de 48 bits única asignada durante el proceso de fabricación.
- 6) ACK o NACK: ACK (11) si la BS puede atender al MSS con todos los requerimientos solicitados. ACK restringido (01) si la BS no puede atender todos los requerimientos solicitados para el MSS. NACK (00) si la BS no puede atender al MSS bajo ninguna forma.

Si 6 = 11 (ACK) agregar:

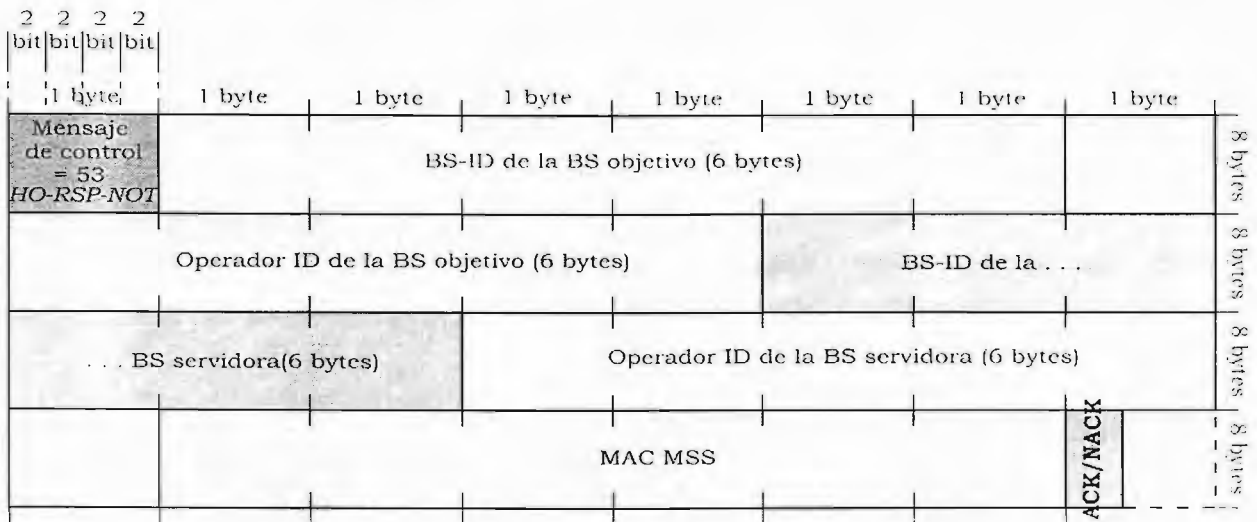
- 7.A) CID nuevo para el MSS: CID (Connection Identifier) que le MSS deberá tomar cuando establezca una conexión con la BS objetivo.
- 7.B) UCD: Solo si el "contador de cambio de configuración" no coincide con el UCD actual, y se deberán enviar solo los parámetros que cambiaron (UCD está en formato TLV).
- 7.C) DCD: Solo si el "contador de cambio de configuración" no coincide con el DCD actual, y se deberán enviar solo los parámetros que cambiaron (DCD está en formato TLV).

Si 6 = 01

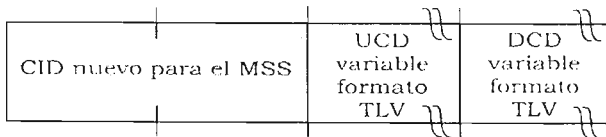
7) más:

8) QoS que la BS puede soportar: Es posible que la BS vecina pueda soportar al MSS con una QoS inferior.

9) Flujo de servicio que la BS puede soportar: Puede que la BS vecina solo pueda asignar una fracción del ancho de banda solicitado.



Si ACK/NACK = 11 +



Si ACK/NACK = 01 +

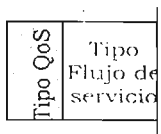


Figura 4.19 - Formato del mensaje *HO-RSP-NOT*.

5) *HO-RSP-MSS*: Una vez que la BS ha recibido todos los mensajes *HO-RSP-NOT* esperados, la BS servidora deberá elegir la BS objetivo entre la BSs vecinas de acuerdo a su disponibilidad y SNR reportado por el MSS. El mensaje *HO-RSP-MSS* será enviado al MSS para indicarle la BS objetivo. Si los mensajes UCD y DCD se incluyeron en el mensaje *HO-RSP-NOT*, también se deberán incluir en este mensaje. En la figura 4.20 se muestra el formato del mensaje *HO-RSP-MSS* y los campos se muestran a continuación.

- 1) N_BS: Número de BS.
- 2) BS-ID de la BS objetivo: Identificador único de la BS objetivo.
- 3) Operador ID de la BS objetivo: Identificador único del operador de la BS objetivo.
- 4) CID: El CID que el MSS tomará con la BS objetivo.
- 5) UCD: Si se incluyó en el mensaje *HO-RSP-NOT*.
- 6) DCD: Si se incluyó en el mensaje *HO-RSP-NOT*.

Si más de una de la BSs vecinas que fueron reportadas en un principio por el MSS tienen total disponibilidad de aceptar al MSS, se deberán enviar los datos 2-6) por cada BS vecina y dejar al MSS tomar la decisión de marcar la BS objetivo.

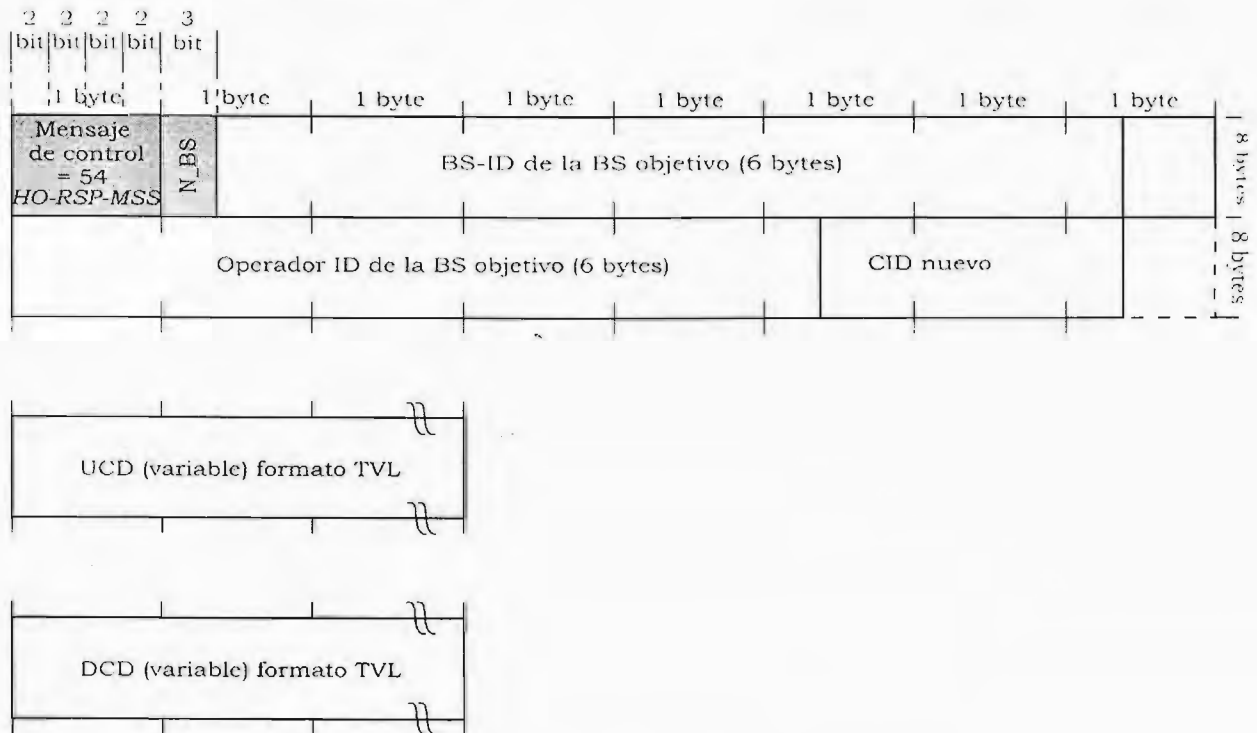


Figura 4.20 - Formato del mensaje *HO-RSP-MSS*.

6) *HO-RPS-BS*: Una vez que la BS ha recibido todos los mensajes *HO-RSP-NOT* esperados, la BS servidora deberá elegir la BS objetivo entre la BSs vecinas de acuerdo a su disponibilidad y SNR reportado por el MSS. El mensaje *HO-RSP-BS* será enviado únicamente a la BS vecina que ha sido elegida como BS objetivo. En la figura 4.21 se muestra el formato del mensaje *HO-RSP-BS*. Los campos que contiene son:

- 1) BS-ID de la BS servidora: Identificador único de la BS servidora.
- 2) Operador ID de la BS servidora: Identificador único del operador de la BS servidora.
- 3) BS-ID de la BS objetivo: Identificador único de la BS objetivo.
- 4) Operador ID de la BS objetivo: Identificador único del operador de la BS objetivo.
- 5) MAC MSS: Dirección de 48 bits única asignada durante el proceso de fabricación.
- 6) Información extra del MSS relativa a las etapas “capacidades básicas” y “autorización del MSS e intercambio de llaves”.

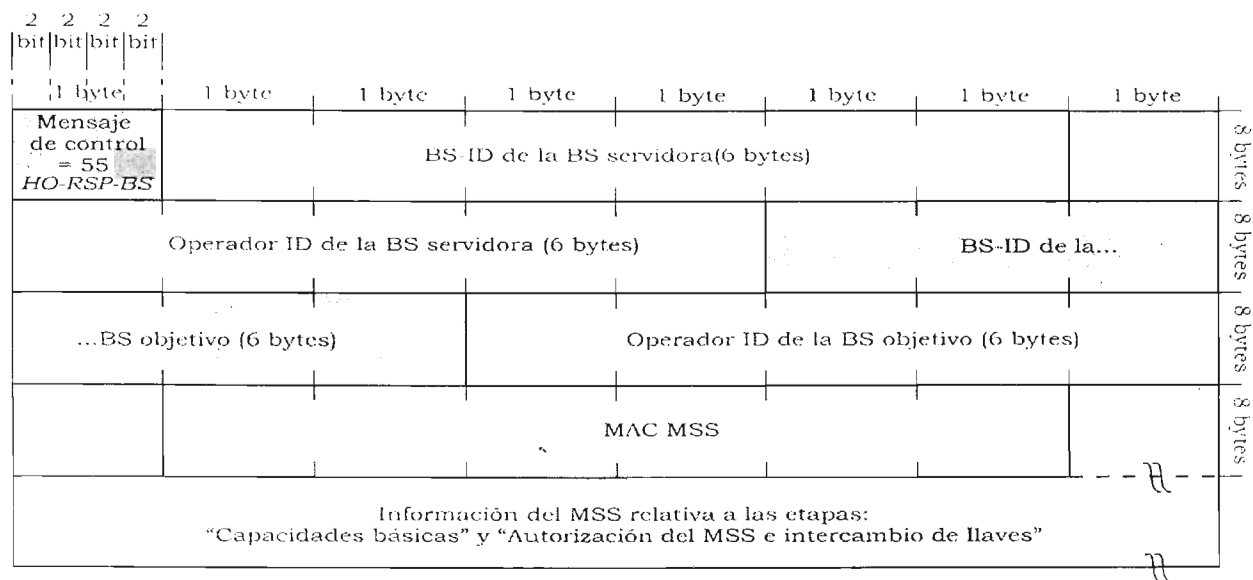


Figura 4.21 – Formato del mensaje *HO-RSP-BS*.

7) *ADV-MSG*: Este mensaje es constantemente enviado por cada una de la BSs en la red. Deberá ser enviado en forma de broadcast para informar a posibles MSSs sobre su presencia y configuración básica. En la figura 4.22 se muestra el formato del mismo. Los campos son:

- 1) Contador de cambio de configuración: El cual se incrementa en uno cada vez que cambia algún valor de configuración.
- 2) BS-ID: Identificador único de la BS que está enviando el mensaje.
- 3) Operador-ID: Identificador único del operador de la BS que está enviando el mensaje.
- 4) UCD.
- 5) DCD.

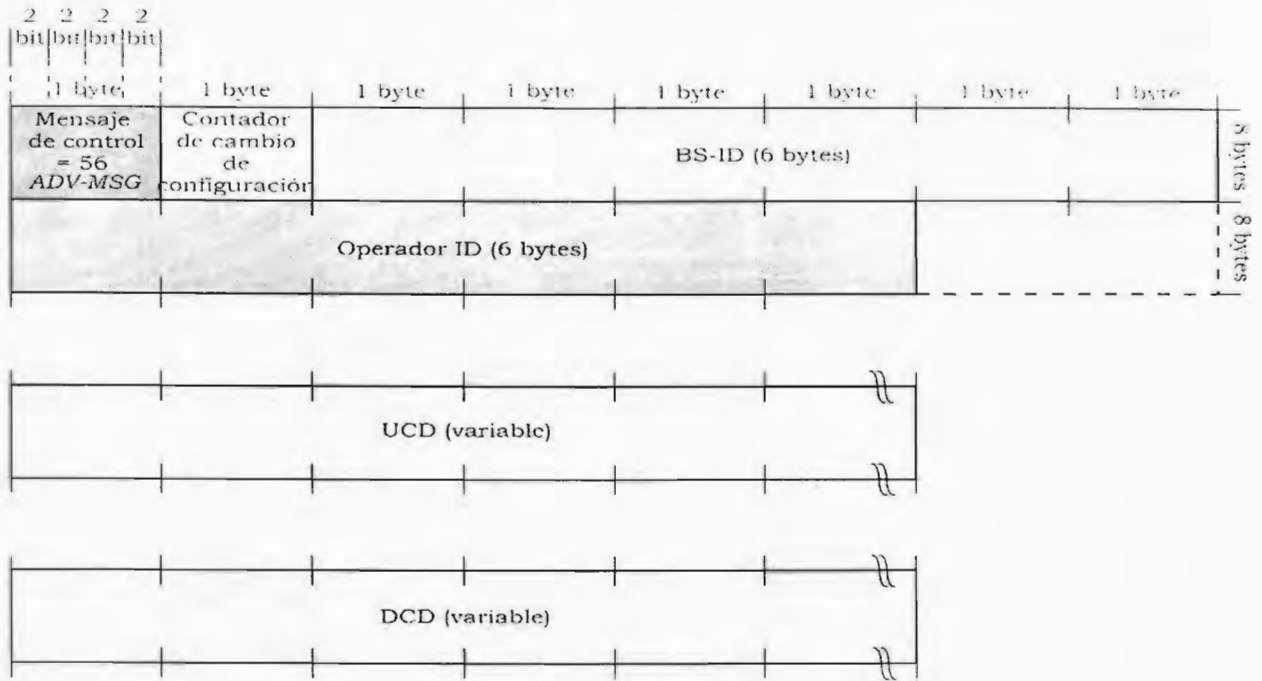


Figura 4.22 - Formato del mensaje *ADV-MSG*.

4.7.5 PROCESO INTERNO EN EL MSS DURANTE EL MECANISMO DE *HANDOFF*

El MSS está constantemente revisando el parámetro SNR de la señal proveniente de la BS. Así mismo, deberá rastrear los mensajes *ADV-MSG* durante sus momentos de ocio aprovechando su capacidad half-duplex para administrar su receptor en esta tarea. En la figura 4.23 se muestra el diagrama del procedimiento que sigue el MSS durante el proceso de *handoff*.

El MSS utiliza temporizadores para no estar activando el mecanismo de *handoff* cada que llegue un mensaje *DL-MAP* o *UL-MAP* con baja potencia, o cuando el mensaje que ha recibido con una SNR baja es coincidentemente, el mensaje *HO-BS-REQ*.

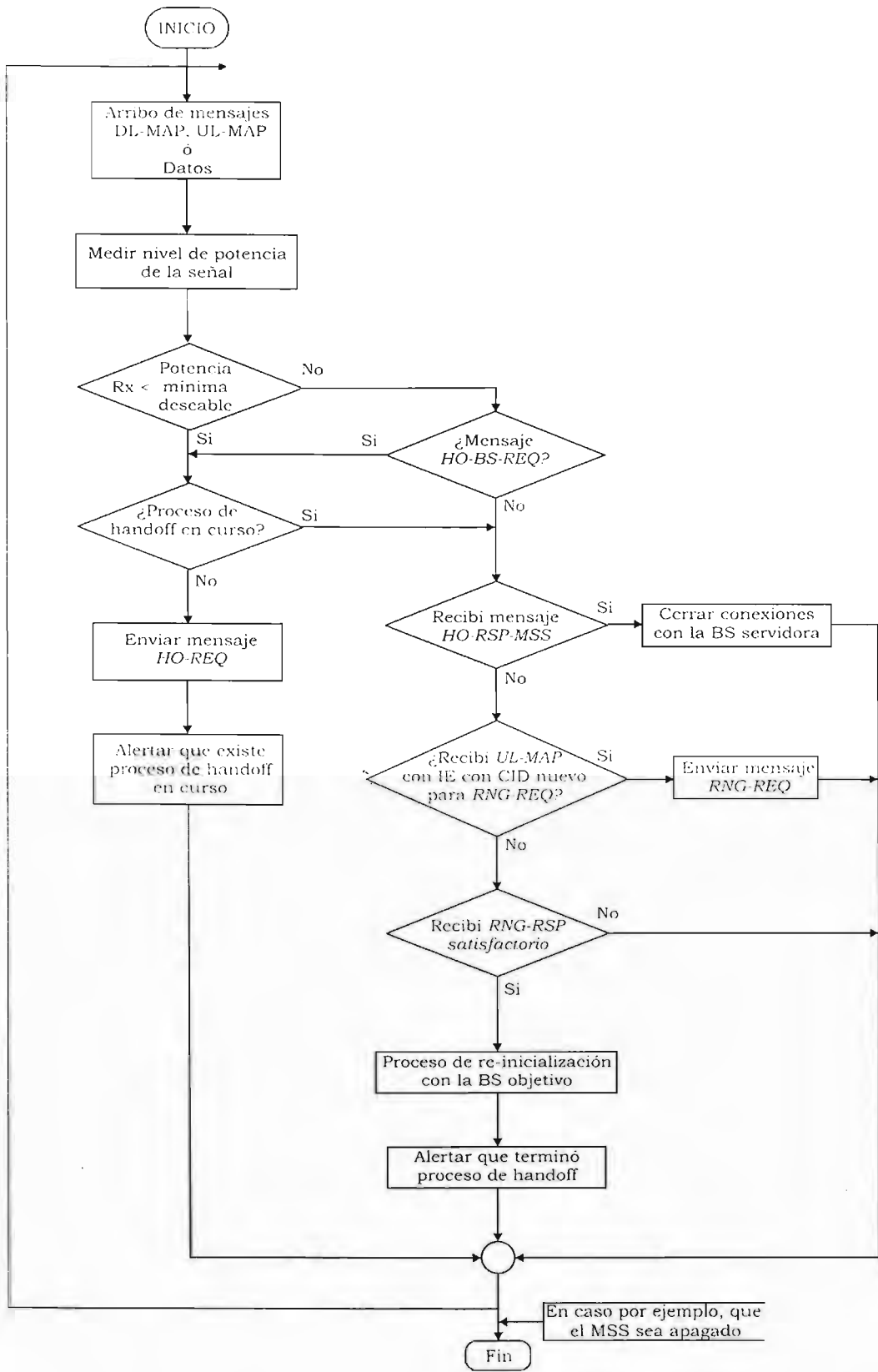


Figura 4.23 - Proceso interno de *handoff* en el MSS.

4.7.6 PROCESO INTERNO EN LA BS SERVIDORA DURANTE EL MECANISMO DE *HANDOFF*

Las figuras 4.24 y 4.25 muestran el algoritmo que sigue la BS servidora durante el proceso de *handoff*.

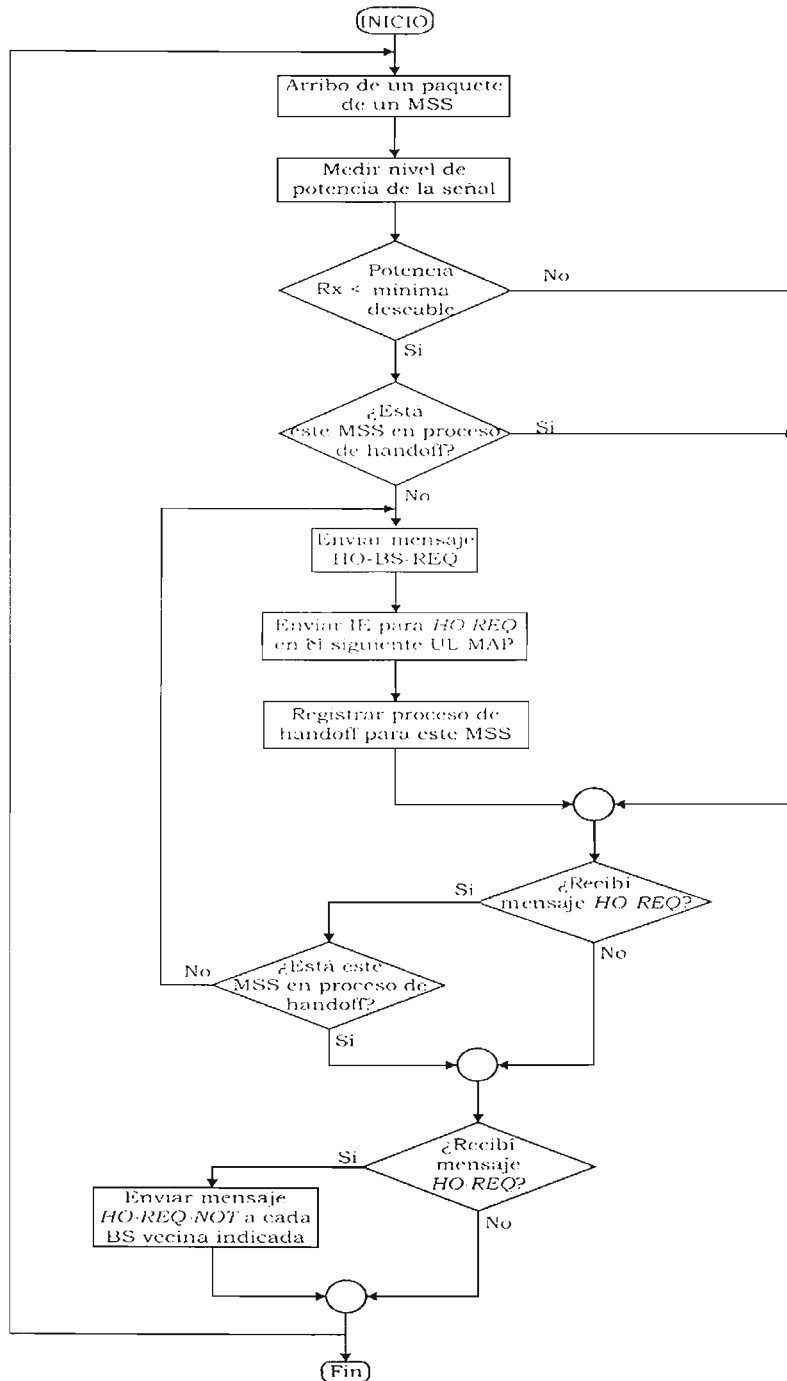


Figura 4.24 - Proceso de *handoff* en la BS servidora. Comunicación con los MSSs.

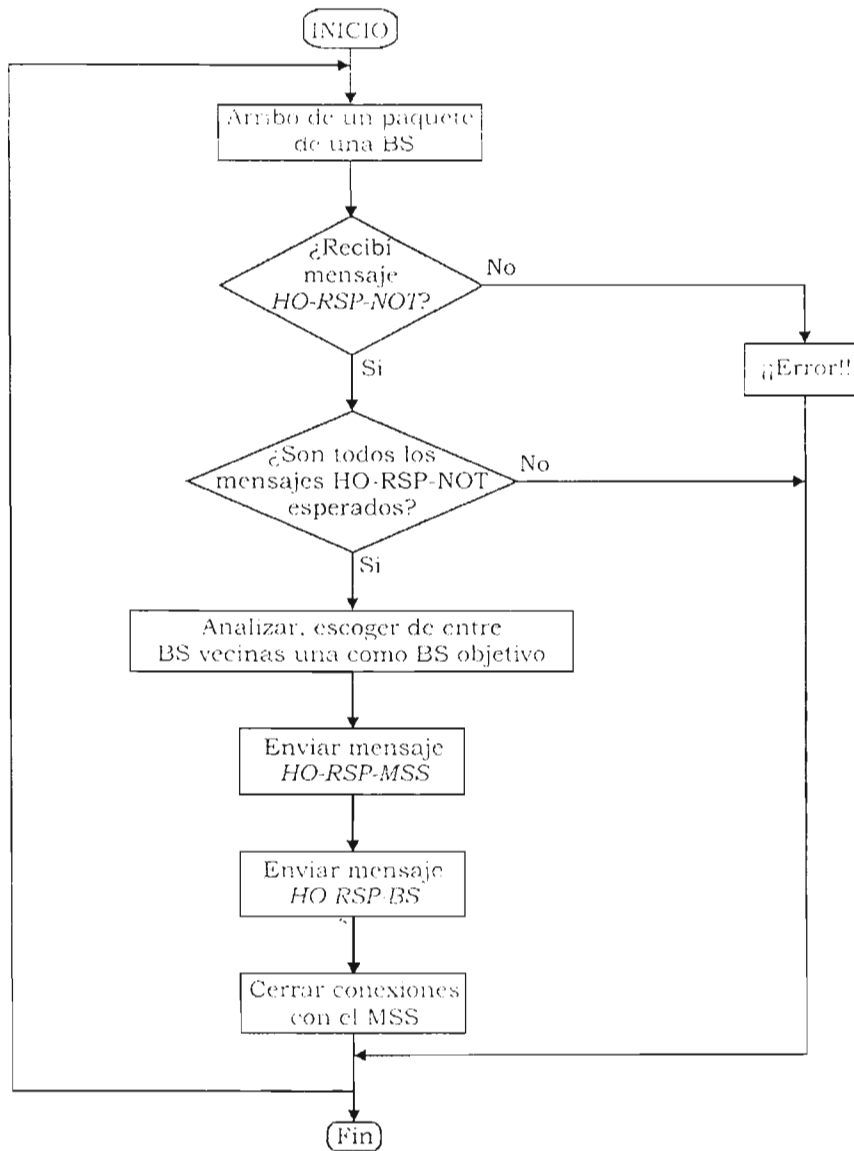


Figura 4.25 – Comunicación inter BS durante el proceso de *handoff*, visto desde la BS servidora.

La BS está constantemente revisando la SNR de cada una de las señales provenientes de los MSSs. En realidad se espera que la mayoría de la veces el procedimiento de *handoff* sea disparado desde el MSS, debido a que la BS está enviando los mensajes DL-MAP y UL-MAP por lo general cada 1 o 2 milisegundos. La BS servidora deberá establecer conexiones tanto con el MSS como con la BSs vecinas durante el proceso de *handoff*. Por eso, se presentan dos figuras. La figura 4.24 muestra el proceso que sigue la BS servidora durante el procedimiento de *handoff* con respecto al MSS. La figura 4.25 muestra el proceso de comunicación inter-BS que sigue la BS servidora para poder ejecutar adecuadamente el proceso de *handoff*.

4.7.7 PROCESO INTERNO EN LA BSS VECINAS DURANTE EL MECANISMO DE *HANDOFF*

En la figura 4.26 se muestra el diagrama con el proceso que siguen las BSs vecinas durante el procedimiento de *handoff*. Este diagrama se refiere a una BS vecina que puede ser o no elegida como BS objetivo.

Una BS vecina que ha sido elegida como BS objetivo, tendrá que ejecutar algunos pasos extras en comparación con una BS vecina que no ha sido elegida como BS objetivo con la finalidad de recibir al MSS que necesita de una nueva conexión.

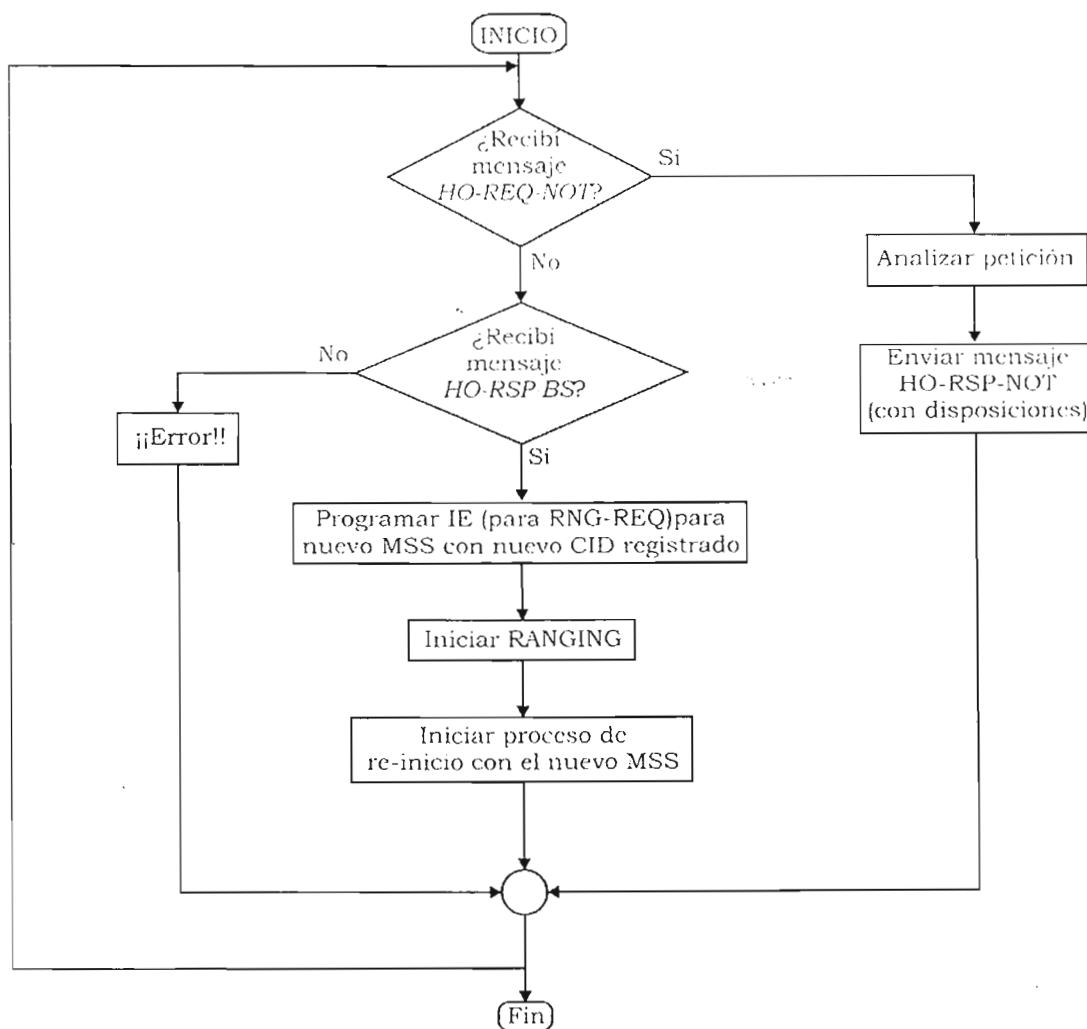


Figura 4.26 – Proceso de *handoff* en las BSs vecinas.

4.7.8 QoS

En el estándar IEEE 802.16 [24], están definidos 4 tipos de servicios que obedecen distintas prioridades y distintas formas de atención hacia el MSS. Este procedimiento ha sido diseñado particularmente para UGS, el más exigente de ellos. Para el caso de BE, un procedimiento "Break before Make" (sección 4.5) o *handoff* duro puede ser utilizado sin problema. El análisis de los tiempos de *handoff*, así como de las aplicaciones que se pueden garantizar con esta propuesta, se hacen en el capítulo 5.

4.8 CONCLUSIONES

1.- El uso de "avisos" (*beacons*) en forma de broadcast, son una ayuda valiosa para que un MSS pueda detectar BS vecinas y medir la calidad de sus canales, así como para que la BSs detectadas por el MSS puedan adelantar pasos antes de que llegue el MSS, ahorrando valioso tiempo en el cambio de conexión.

2.- Aprovechar la capacidad half-duplex del MSS, así como de la conexión asimétrica para utilizar el receptor durante los momentos de ocio para detectar señales provenientes de otra BSs vecinas, podría ayudar a facilitar la implementación de los "avisos". Más aún considerando que en un servicio UGS los tiempo de asignación ya están regularmente definidos y por lo tanto, un MSS podrá programar a su receptor con más exactitud.

3.- Se ha propuesto un mecanismo de *handoff* diferente a los anteriormente propuestos. Si bien, algunos principios de funcionamiento no cambian, se ha realizado un trabajo profundo, tratando de ahorrar el intercambio de mensajes que no son importantes o evitando campos irrelevantes dentro de los mensajes con el fin de minimizar el tiempo de cambio de conexión.

4.- A diferencia de [30], en esta propuesta no se maneja asociación, que significa realizar el proceso de pre-ranging y pre-registro con todas la BSs vecinas. Ya que esto implicaría pérdida de recursos para la BS vecinas que no serán elegidas como BS objetivo. A su vez, el campo de "tiempo estimado de

handoff” no es tomado en cuenta por considerarse superfluo. En [31] el problema principal es no detallar la propuesta, ya que no se especifica como el MSS establecerá la conexión con la nueva BS. En [29] se tiene una propuesta muy completa, el intercambio de mensajes es prácticamente igual a esta propuesta, aunque los campos que conforman los mensajes son muy distintos, así como la lógica del proceso, ya que sigue manejando pre-asociación y pre-ranging, también maneja un mensaje extra de confirmación, avisos entre BS cuando un MSS se da de alta (aunque no ocupe *handoff*), entre otras características que no se incluyeron en esta propuesta por no considerarse adecuadas.

5.- Con esta propuesta, se pretende lograr un procedimiento de *handoff* que soporte el nivel UGS de QoS, el más exigente de los 4 niveles manejados por el estándar IEEE 802.16. Se propone un mecanismo de *handoff* diferente para cada nivel de QoS del MSS, ya que existe una estrecha relación entre la rapidez del *handoff* y los recursos que se consumen. Un simple “break before make” o “*handoff* duro” a como se define en la sección 4.5, es suficiente para el nivel BE de QoS. El desempeño de estos mecanismos, se analiza en el siguiente capítulo.

CAPÍTULO 5

MODELADO Y SIMULACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE *HANDOFF* PROPUESTO

5.1 INTRODUCCIÓN

Existen dos formas principales para el modelado de redes. La primera mediante modelos analíticos, y la segunda mediante simulaciones por computadora. Con modelos analíticos, nos referimos al análisis matemático mediante el uso de ecuaciones, aunque este método resulta en un análisis muy simple al no poder integrar el comportamiento dinámico de la red. Con la segunda opción, el uso de computadoras, podemos emular ambientes más reales y seguir con más detalle el comportamiento de la misma. Por eso, para hacer un buen análisis del desempeño del procedimiento de *handoff* descrito en el capítulo 4, haremos uso de modelos por computadora para analizar los distintos parámetros involucrados.

Un sencillo modelo analítico es brevemente descrito también en este capítulo, sin embargo, por lo antes mencionado y debido a la complejidad del estándar así como también a la influencia de numerosos factores aleatorios, se prefirió el uso de computadoras para la obtención de estadísticas más detalladas, exactas y veraces.

Para el modelado del algoritmo de *handoff*, se utilizó el simulador OPNET MODELER v. 8.0 [65]¹, el cual, nos permitirá analizar los retardos de propagación de los paquetes generados por los nodos móviles, así como la tasa de transmisión instantánea durante el cambio de conexión. Parámetros que nos indicarán, la calidad de nuestro mecanismo de *handoff*.

¹ La licencia de operación de OPNET MODELER v. 8.0, se obtuvo a través del proyecto PAPITT N° 1N-110805.

De esta forma, algunas aplicaciones como VoIP, exigen retardos pequeños de propagación (de 20 a 50 ms) con los que podamos garantizar la ausencia de ecos durante el periodo de conversación [44]. Por otro lado, una baja en la tasa de transmisión, haría que la conversación fuera de mala calidad o incluso intangible. Algunas otras aplicaciones no son exigentes en este aspecto, tal es el caso de tráfico tipo Internet, el cual es generalmente asociado con una QoS de BE.

EL uso de simulaciones por computadora, nos servirá también para medir la capacidad de la red en cuanto a la cantidad de usuarios se refiere, la cobertura por estación base, la utilización de la red y otros parámetros que, si bien, no son claves para medir la calidad del proceso de *handoff*, si nos dan un buen panorama acerca del desempeño de nuestra sistema.

De esta forma, a lo largo del capítulo, se irá explicando como se ha desarrollado el modelo de simulación en OPNET, la forma en que se ha modelado la red, el escenario utilizado, las condiciones de entorno y los resultados obtenidos.

5.2 DESCRIPCIÓN DE OPNET MODELER

OPNET (Optimized Network Engineering Tool) MODELER, es considerado uno de los simuladores de red más importante del momento. Es orientado a objeto, obedece jerarquías, utiliza las capacidades gráficas de la computadora y está basado en el lenguaje de programación proto C. OPNET, es ideal para analizar y sintetizar los datos que se generan mediante las simulaciones.

Los modelos construidos mediante OPNET, pueden ser compilados en códigos ejecutables. Un evento ejecutable puede ser depurado o simplemente ejecutado para obtener resultados de simulación.

OPNET emplea una estructura jerárquica para modelar. Cada modelo de la estructura jerárquica describe diferentes aspectos del modelo completo que va a hacer simulado.

OPNET, tiene una extensa gama de herramientas que permiten desarrollar modelos con gran detalle, identificar los elementos del modelo de interés, ejecutar simulaciones y analizar los datos generados. Estas herramientas se subdividen en:

- I) Constructor jerárquico de modelos.
- II) Interfaz gráfica de simulación.
- III) Analizador de resultados.

I) **Constructor jerárquico de modelos:** Contiene cuatro editores para desarrollar los modelos de los sistemas que van a ser simulados. Estos editores son: *Network editor*, *Node editor*, *Process editor* y *Parameter editor*. Están organizados en forma jerárquica, y pueden ser reutilizados de tal forma que, un modelo desarrollado en un nivel, puede ser utilizado por otro modelo desarrollado en otro nivel más alto, tal y como se muestra en la figura 5.1.

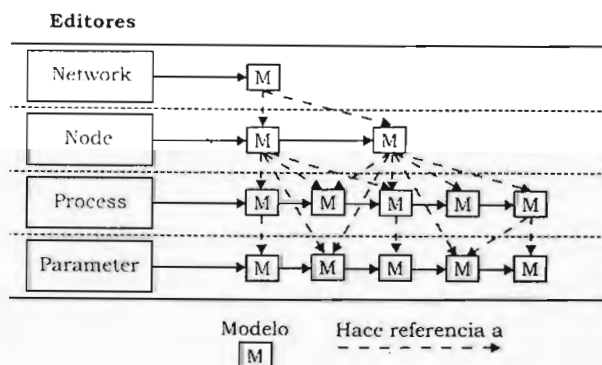


Figura 5.1 - Forma de organización jerárquica de los editores en OPNET.

a) Network Model: Se crean con el editor de red "*Network editor*". Son utilizados para especificar la topología física de la red, dentro de la cual, se definen la posición y la forma de comunicación de los diferentes dispositivos de comunicación. Ver figura 5.2a.

b) Node Model: Son editados mediante un editor de nodos "*Node editor*". Aquí se especifican los dispositivos de comunicación creados a nivel red. Algunos ejemplos son: Generadores de tráfico, transmisores y receptores, inclusive colas y procesadores. Cada uno de estos nodos son descritos por un diagrama a bloques (ver figura 5.2b), dentro del cual, cada bloque tiene una

función bien definida descrita mediante una máquina de estado finito (*finite state machine*, ver figura 5.2c) la cual a su vez se denomina como “*Process Model*”.

c) *Process Model*: Estos procesos son creados mediante un editor de procesos “*Process editor*”. Son utilizados para describir la lógica y comportamiento de un “*Node model*”. Estos procesos son creados mediante el lenguaje de programación proto C (ver figura 5.2d), y la comunicación entre los distintos procesos se lleva a cabo mediante interrupciones. El progreso de un proceso se puede seguir mediante la ubicación gráfica de estados y transiciones que responden a eventos entrantes. La lógica dentro de cada estado, puede ser creada con librerías o con funciones predefinidas dentro de OPNET como una alternativa a utilizar exclusivamente el lenguaje de programación C. Un proceso puede crear otro proceso nuevo (el cual se llamará “*Child process*”), para ayudarle a resolver tareas secundarias.

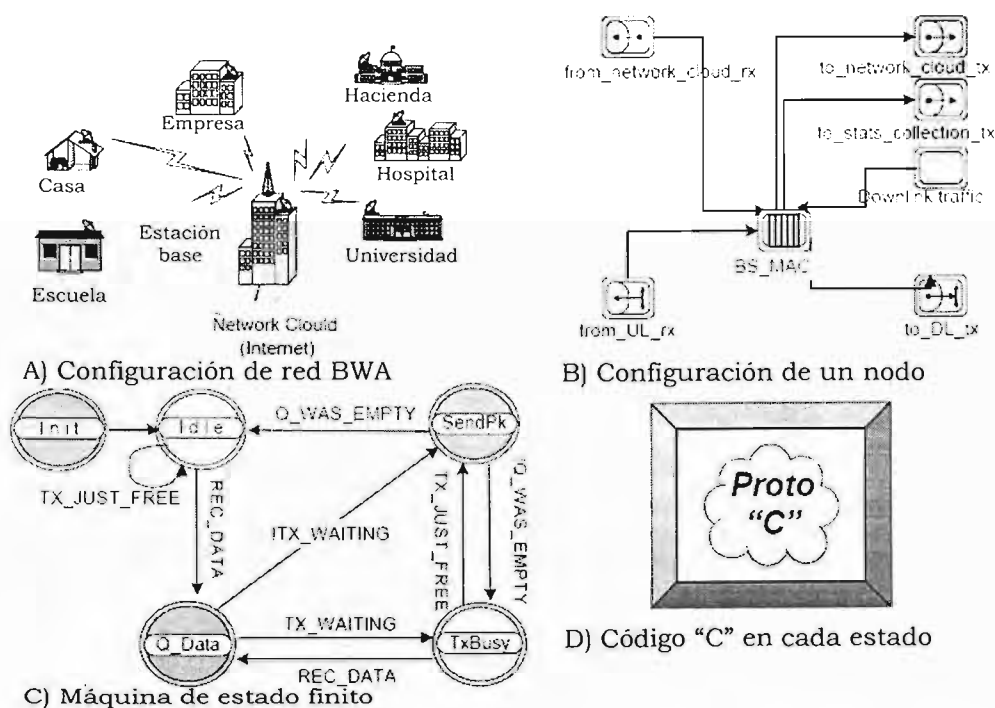


Figura 5.2 - Modelo de simulación en OPNET MODELER.

II) *Interfaz gráfica de simulación*: Contiene herramientas para definir y correr simulaciones, así como herramientas para depurar simulaciones con las cuales interactúa.

III) *Analizador de resultados*: Contiene los siguientes cuatro elementos: editor de pruebas "*Probe Editor*" (contiene la información que será recolectada), herramienta de análisis "*Analysis Tool*" (para análisis estadísticos de los resultados), herramienta de filtro "*Filter Tool*" (Procesador de datos) y visor de animaciones "*Animation Viewer*".

5.3 MODELADO DEL ESTÁNDAR IEEE802.16 CON OPNET MODELER

5.3.1 ESCENARIO

El escenario está formado por tres estaciones base de igual capacidad y de misma distancia de cobertura con una configuración tipo celular. La máxima distancia de cobertura, ha sido obtenida mediante el modelo de propagación descrito en el apéndice C. La cantidad de nodos que cada estación base puede soportar, dependerá del tráfico que genere cada uno de ellos. Como puede apreciarse en la figura 5.3, los nodos fijos están representados por pequeño círculos azules y los nodos móviles por pequeños círculos rojos, que a su vez, tienen asociada una ruta de movimiento.

Los nodos móviles, pueden moverse de su estación base origen a cualquiera de las otras dos estaciones base para ejecutar el procedimiento de *handoff*, pero no podrán moverse hacia otra nueva estación base o regresar a su estación de origen, lo que significa que un nodo solo puede ejecutar un procedimiento de *handoff* a la vez dentro de la misma simulación. Esto se debe a que los CIDs asignados a cada uno de los nodos se podría repetir, lo que requeriría una pequeña modificación en el código, lo cual, no está en los objetivos de esta tesis. Los nodos móviles, tampoco podrán moverse de la estación base # 3 (estación base inferior izquierda de la figura 5.3) a la estación base # 2 (estación base más a la derecha de la figura 5.3) ó viceversa.

Los *beacons*, son archivos previamente editados, de tal forma, que se le asignarán a los nodos móviles al inicio de la simulación de acuerdo a su trayectoria previamente definida.

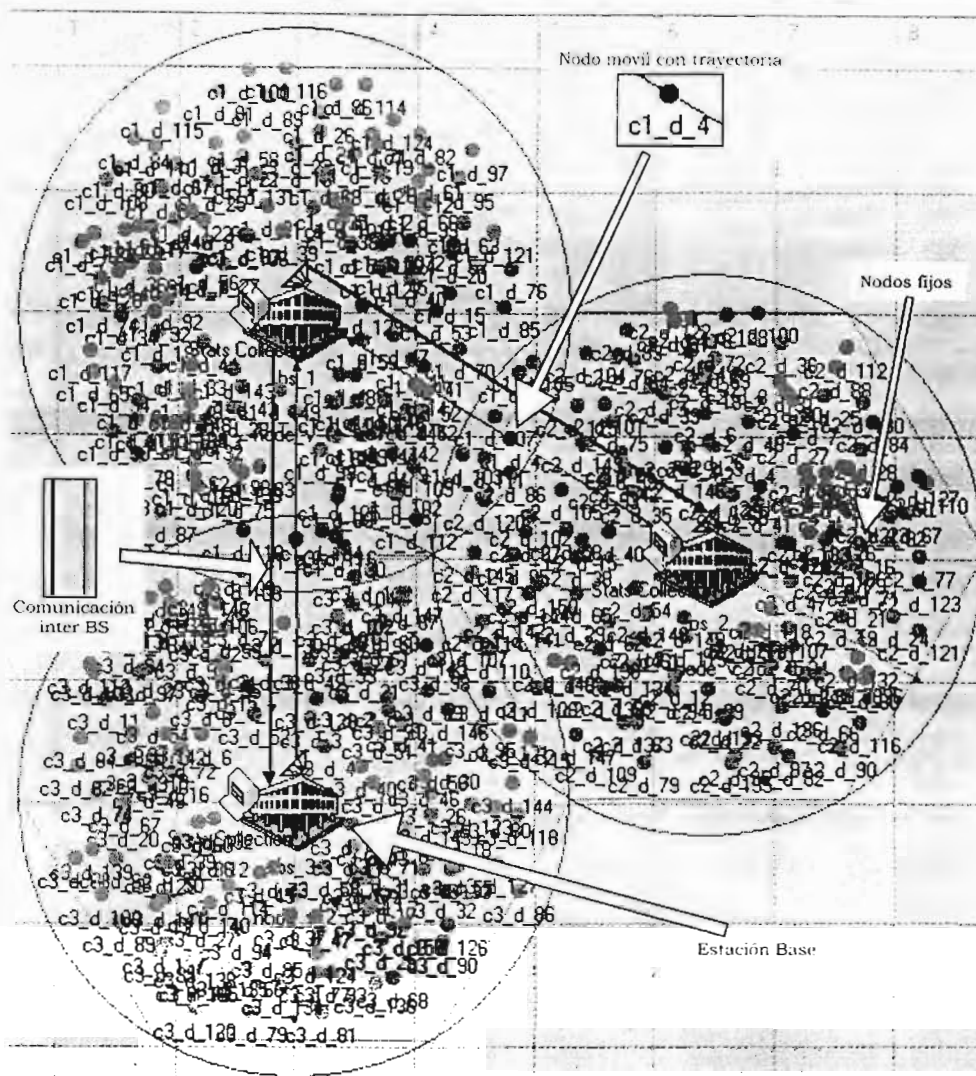


Figura 5.3 – Escenario de simulación de procedimientos de *handoff*.

Los nodos móviles transmiten en frecuencias que van de acuerdo a la estación base más cercana. Para evitar interferencias entre sí, existen 6 canales en total, 3 de subida y tres de bajada (dos canales por estación base).

En las simulaciones, tanto la estación base como los nodos, soportan fragmentación y *piggyback* (a menos que se indique lo contrario). Un minislot equivale a 16 bytes para todos los casos, y todos los nodos transmiten con un esquema de modulación QPSK (no se implementó modulación adaptiva). Las estaciones base transmiten con un esquema de modulación de 16-QAM y los nodos móviles se mueven a una velocidad máxima de 120 km/hr.

Las características de cada uno de los elementos que se aprecian en la figura 5.3, se describen a continuación.

5.3.2 MODELADO DE LA ESTACIÓN BASE

La estación base, como hemos venido explicando desde el capítulo 3, es la que provee de una conexión a cada uno de los usuarios. Se encarga de controlar el tráfico hacia los MSS y SS (usuarios) y de administrar el uso del canal *uplink*. En la figura 5.4a, el edificio representa la estación base. La computadora de color amarillo situada al lado izquierdo de la estación base, es un módulo de estadística en la cual se recopilan todos los datos provenientes de los nodos para su posterior análisis.

En la figura 5.4b, podemos ver el contenido de la estación base, el cual está representado por un diagrama a bloques. Dentro de este diagrama a bloques se encuentran: el bloque de transmisión (*to_link_tx*) hacia los nodos seguido del bloque de configuración de la antena (*ant_tx*), el bloque de recepción de señales provenientes de los nodos (*from_link_rx*), seguido también, del bloque de configuración de la antena (*ant_rx*). También se definen los bloques de comunicación inter-BS (*B1ra_B3ta*, *B1ta_b3ra*, *B1rb_B2ta* y *B1tb_B2ra*) los cuales, se ven en la sección 5.3.5. El bloque central *HE_MAC*, es donde se encuentra definido todo el algoritmo de la capa MAC de la estación base.

Un fragmento del bloque *HE-MAC* se muestra en la figura 5.4c. Como podemos ver, se tiene un diagrama de estados (conocido también como un FSM), donde cada uno de los estados, contiene un código interno escrito en lenguaje C que define el funcionamiento del mismo, como se muestra en la figura 5.4. Los estados *Init*, *Ranging*, *Rng_rcvd* y *Rng_complete*, definen el proceso de inicialización por parte de la estación base. Una vez que el proceso de inicialización se ha completado para cada uno de los nodos, el proceso cae en el estado *Idle* o reposo, donde espera que algún evento lo envíe hacia cualquiera de los otros estados.

Cuando la BS recibe un paquete de algún nodo, la bandera *RCV_DATA* se activa ejecutando una transición del estado *Idle* al estado *Upstream*, donde se analiza el tipo de paquete, el nodo que lo envió y la calidad de la señal (si se trata de una solicitud de ancho de banda, la petición se guarda en una lista especial). Después, regresa de nuevo al estado *Idle*, hasta que otro evento vuelva a ocurrir.

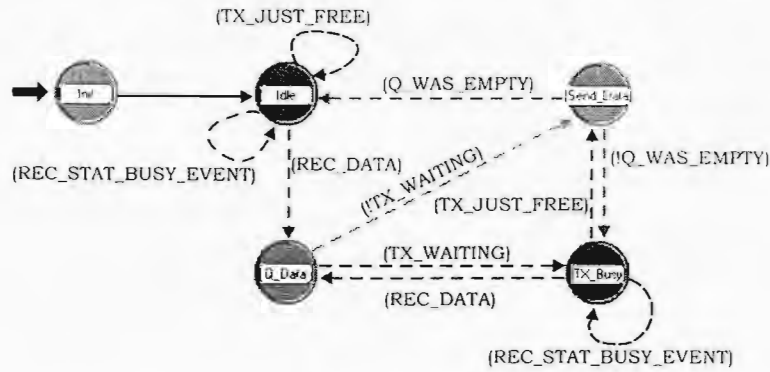


Figura 5.5 – Proceso hijo (*child process*) *bwa_be_txctl*.

El estado *UCD_Time* funciona muy parecido al estado *MAP_Time*, solo que aquí se construye el mensaje *UCD* en vez del mensaje *UL-MAP*. El estado de *HO_process* es donde se maneja todo lo relativo al procedimiento de *handoff* desde la estación base, pero éste se verá con detalle en la sección 5.3.6.

PARÁMETROS DE CONFIGURACIÓN DE LA BS EN EL SIMULADOR:

La antena de la estación base, está configurada en modo sectorial con una ganancia de recepción y transmisión igual a 15 dBi. El ancho de banda de transmisión (canal *downlink*) es de 7 MHz, con una tasa neta de 22.4 Mbps y una potencia de transmisión = 4 W. Las frecuencias centrales de cada una de las estaciones base se muestra en la tabla 5.1.

Estación base	Tx/Rx	BW (kHz)	Tasa (kbps)	Fr. Central (MHz)	Potencia máxima Tx (W)
#1	Tx	7,000	22,400	2,010	4
	Rx	1,760	2,816	2,000	-
#2	Tx	7,000	22,400	2,030	4
	Rx	1,760	2,816	2,020	-
#3	Tx	7,000	22,400	2,050	4
	rx	1,760	2,816	2,040	-

Tabla 5.1 – Frecuencias centrales de transmisión y recepción de las estaciones base en el simulador.

5.3.3 MODELADO DE LOS NODOS FIJOS Y MÓVILES

5.3.3.1 NODOS FIJOS

Los nodos fijos se representan mediante puntos azules, y los nodos móviles mediante puntos rojos. En la figura 5.6a podemos ver el contenido de estos nodos, en la figura 5.6b se aprecia el contenido del bloque *MAC* de los nodos y en la figura 5.6c podemos ver parte del código proto C del estado *HO_arrival*.

De forma muy parecida a la BS, la configuración interna de un nodo se compone de varios bloques (figura 5.6a), entre ellos, los bloques encargados de transmitir hacia la BS: *to_link_tx* y *ant_tx* (donde se configura la potencia, ganancia de la antena transmisora, ancho de banda, tasa de transmisión, etcétera), y los bloques de recepción: *from_link_rx* y *ant_rx* (donde se configura la ganancia de recepción de la antena, ancho de banda de recepción, frecuencia central, etcétera). El bloque *src_type_1*, define el tipo de tráfico que va a generar ese nodo, tal y como se verá en la sección 5.3.4. El bloque *MAC*, es donde se define el funcionamiento del nodo a nivel capa *MAC*. Los nodos restantes son para recolección de estadísticas.

En la figura 5.6b, se aprecia la configuración interna del bloque *MAC*. Los estados *Init*, *Ranging* y *Syn_Rsp*, son los encargados del procedimiento de inicialización como se ha definido en la sección 3.4.7. Una vez que el proceso de inicialización se ha llevado a cabo, se llega al estado de reposo *Idle*, donde permanecerá hasta que un evento entrante lleve el control del proceso hacia el estado *App_traffic* o *From_Downs*. La bandera *DOWNSTREAM_TRAFFIC* se activa cuando el nodo capta una señal proveniente de su estación base, entonces, el proceso pasa del estado *Idle* al estado *From_Downs*, donde se analiza que tipo de paquete ha recibido. Si el paquete es de tipo broadcast lo procesa y revisa si se trata de un mensaje *UL-MAP* o *UCD* para en caso de serlo, procesarlo y actualizar los datos pertinentes. Si se trata de un mensaje unicast dirigido a él, revisa si se trata de un paquete de datos o de administración. Si el paquete es de datos, lo manda a los bloques de estadísticas del nivel superior y luego lo destruye. El estado *HO_arrival*, es el encargado de seguir y terminar el procedimiento de *handoff*, el cual, se verá con detalle en la sección 5.3.6.

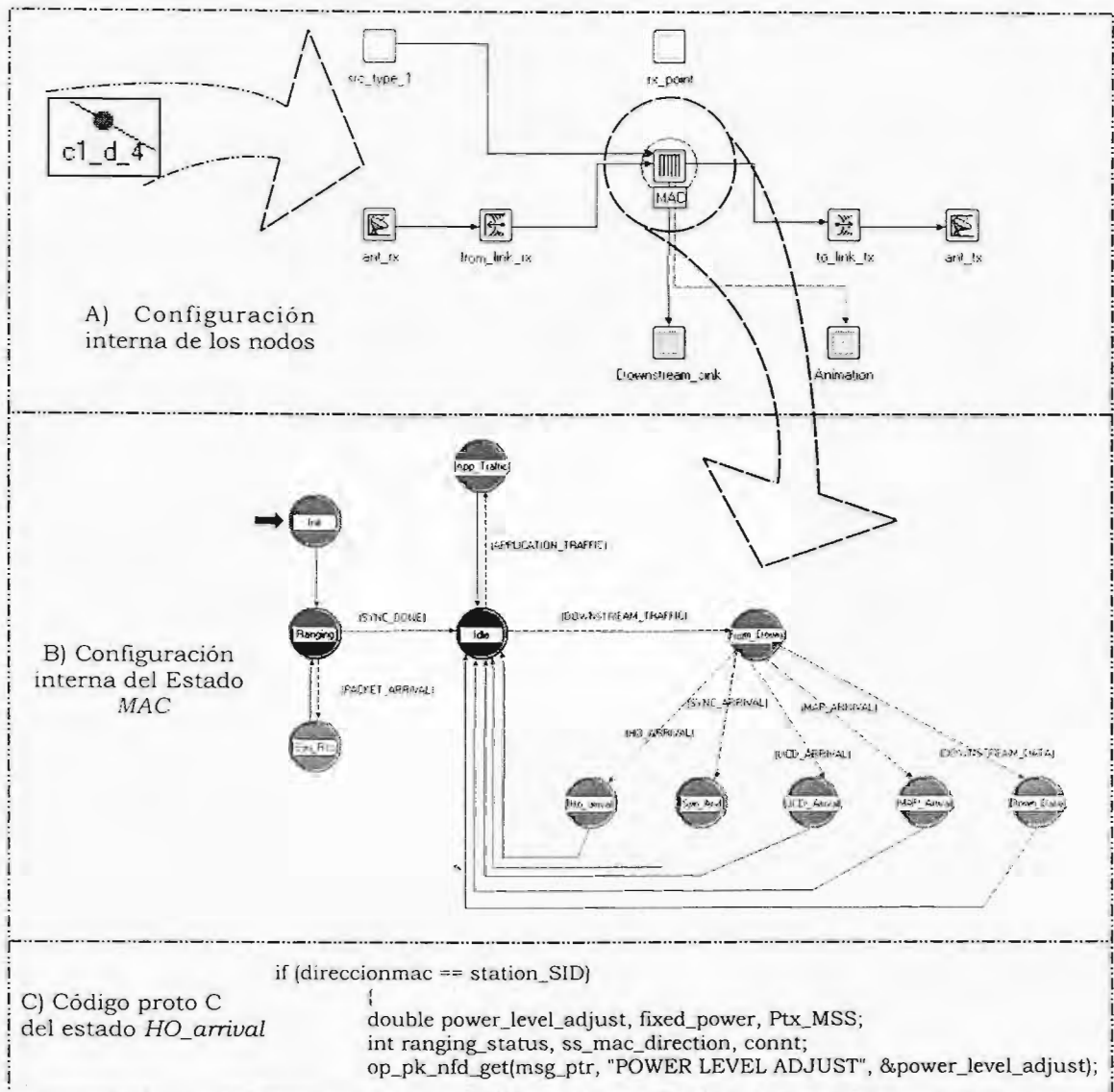


Figura 5.6 - Configuración de los Nodos.

Cuando un paquete nuevo es generado, la bandera *App-Traffic* es activada, entonces el proceso pasa del estado *Idle* al estado *App_traffic*, donde se invoca un proceso auxiliar (*child process*) llamado *bwa_wm_child*, que ayudará a transmitir el paquete hacia la BS correspondiente usando una de las técnicas de QoS.

El proceso *bwa_wm_child* es muy complejo, ya que para transmitir un paquete hacia la BS, primero se debe mandar una solicitud de ancho de banda para que la BS le reserve un espacio para transmitir. Hay que recordar que dependiendo de la calidad y servicio del nodo, será la forma de transmitir el

paquete, por lo que dentro del proceso *bwa_wm_child* se encuentra definido un procedimiento distinto para transmitir de acuerdo a cada QoS. Además se encuentra definido el algoritmo *exponential backoff* para la resolución de colisiones. También es dentro de este proceso, donde constantemente se están recibiendo los mensajes *UL-MAP*, del cual, obtiene como está programado el uso del canal *uplink* por los siguientes dos milisegundos.

En la figura 5.7 se muestra el diagrama de estado del proceso auxiliar *bwa_wm_child*. El estado *Init*, es donde se inicializan todas las variables utilizadas dentro del proceso completo y donde se establecen todos los parámetros necesarios para la transmisión de paquetes como lo son: tamaño del minislot, CID del nodo, retardo del propagación, si se permite concatenación, fragmentación, etcétera.

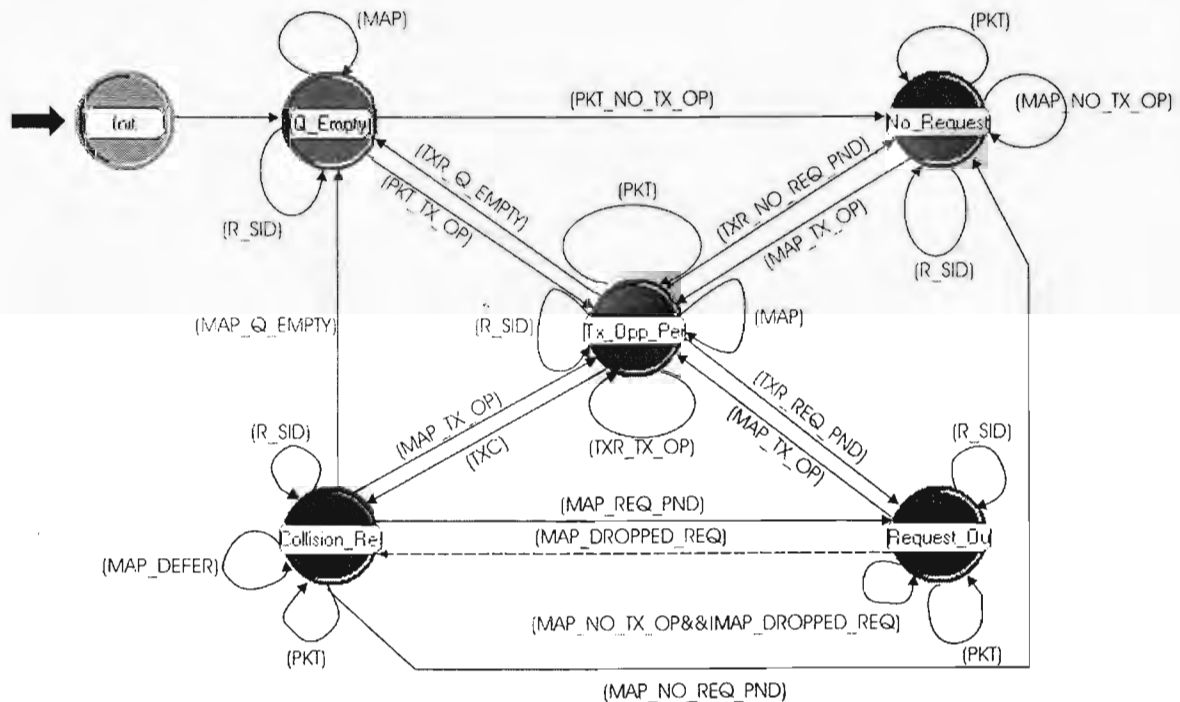


Figura 5.7 - Configuración del proceso auxiliar *bwa_wm_child*.

Cada uno de los estados dentro del proceso auxiliar *bwa_wm_child*, corresponde a una situación específica en la que puede caer a lo largo del proceso, como puede ser: estado de resolver una colisión, estado de estar esperando una asignación de ancho de banda, etcétera. La tabla 5.2 muestra las condiciones que prevalecen en cada uno de los estados.

Estado	¿Cola vacía?	¿Paquete por Transmitir pendiente?	¿Solicitudes de BW pendientes?	¿Tiempo en espera de asignación de BW agotado?
Init	Si	No	No	No
Q_empty	Si	No	No	No
No_request_Outstanding	No	No	No	No
Tx_Opp_Pending	No	Si	No	No
Collision_resolution	No	No	No	Si
Request_Outstanding	No	No	Si	No

Tabla 5.2 – Condiciones de cada uno de los estados del proceso auxiliar *bwa_wm_child*.

En resumen, el proceso *bwa_wm_child* se encarga de resolver colisiones, de hacer solicitudes de ancho de banda para la transmisión de los paquetes que se van generando dentro del nodo, de guardar en una cola los paquetes pendientes de transmitir, de fragmentar o concatenar los paquetes, diferenciar IE de mantenimiento, de datos o de *handoff*, de recibir y procesar los mensajes *UL-MAP*, y otras funciones dentro del procedimiento de *handoff* que se explicarán en la sección 5.3.6.

5.3.3.2 NODOS MÓVILES

Los nodos móviles funcionan prácticamente igual que los nodos fijos. La diferencia radica en que se le asigna una trayectoria mediante coordenadas de inicio y coordenadas de terminación así como el tiempo en que debe recorrerlo. Por lo tanto, hay que hacer un cálculo para determinar la velocidad deseada. Sin embargo, para adaptar correctamente la movilidad a estos nodos, se tuvo que agregar un código que actualizara constantemente tanto la potencia de transmisión como el *offset* de la señal, ya que el simulador únicamente se encarga de cambiar las coordenadas de ubicación del nodo. Este código se agregó en la función encargada de transmitir los paquetes durante el momento designado por los mensajes *UL-MAP* en el proceso *bwa_wm_child*.

5.3.3.3 PARÁMETROS DE CONFIGURACIÓN DE LOS NODOS EN EL SIMULADOR

Las antenas de los nodos tanto fijos como móviles, se han configurado en modo omnidireccional, con una ganancia de recepción y transmisión igual a cero. La configuración de las frecuencias varían de

acuerdo a la estación base con la que se han conectados. El ancho de banda y tasa de modulación neta tanto de transmisión como de recepción, se muestran en la tabla 5.3.

Estación base a la que pertenece	Tx/Rx	Tasa (kbps)	BW (kHz)	Fr. Central (MHz)	Potencia máxima de Tx (W)
#1	Tx	2,816	1,760	2,000	1
	Rx	22,400	7,000	2,010	-
#2	Tx	2,816	1,760	2,020	1
	Rx	22,400	7,000	2,030	-
#3	Tx	2,816	1,760	2,040	1
	rx	22,400	7,000	2,050	-

Tabla 5.3 – Frecuencias centrales de transmisión y recepción de los nodos (SS y MSS) en el simulador.

5.3.4 MODELADO DEL TRÁFICO

Se utilizaron dos tipos de tráfico diferente: tráfico tipo Internet y tráfico de VoIP. A continuación se describe cada uno.

5.3.4.1 TRÁFICO TIPO INTERNET

Un total de 4 distribuciones se han implementado en el simulador para la generación de tráfico.

a) *Distribución del tamaño del paquete (pksize_dist_str)*: Para generar el tráfico tipo Internet, se utilizó de acuerdo con [22], paquetes de tamaño variable con una distribución de probabilidad como se muestra en la figura 5.8.

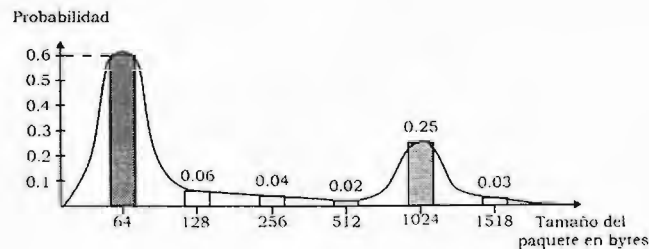


Figura 5.8 – Distribución de probabilidad del tamaño de los paquetes generados en tráfico tipo Internet.

El tamaño de estos paquetes no considera los encabezados agregados por las capas (física y MAC) del estándar IEEE 802.16. Por lo tanto, para calcular el tamaño real en minislots que estos paquetes van a necesitar para su transmisión, se debe considerar que éstos se codifican utilizando palabras de código largas, por lo que el paquete completo más el encabezado MAC genérico es dividido en subpaquetes de 245 bytes, los cuales a su vez, se le agregan 10 bytes de FEC-RS. En la figura 5.9 se muestra el caso de un paquete *Ethernet MAC* de 1024 bytes, al cual, después de agregarle los 6 bytes de *encabezado MAC genérico* y dividirlo en paquetes de 245 bytes más 10 de FEC-RS, obtenemos un *frame* de 1096 bytes de largo, el cual incluye 4 bytes de preámbulo y 6 bytes de guarda, para el cual, necesitamos 69 minislot (cada minislot es de 16 bytes) para su transmisión. Si hiciéramos la misma operación para el paquete *Ethernet MAC* de 1518 bytes, ocuparíamos 101 minislots para su transmisión.

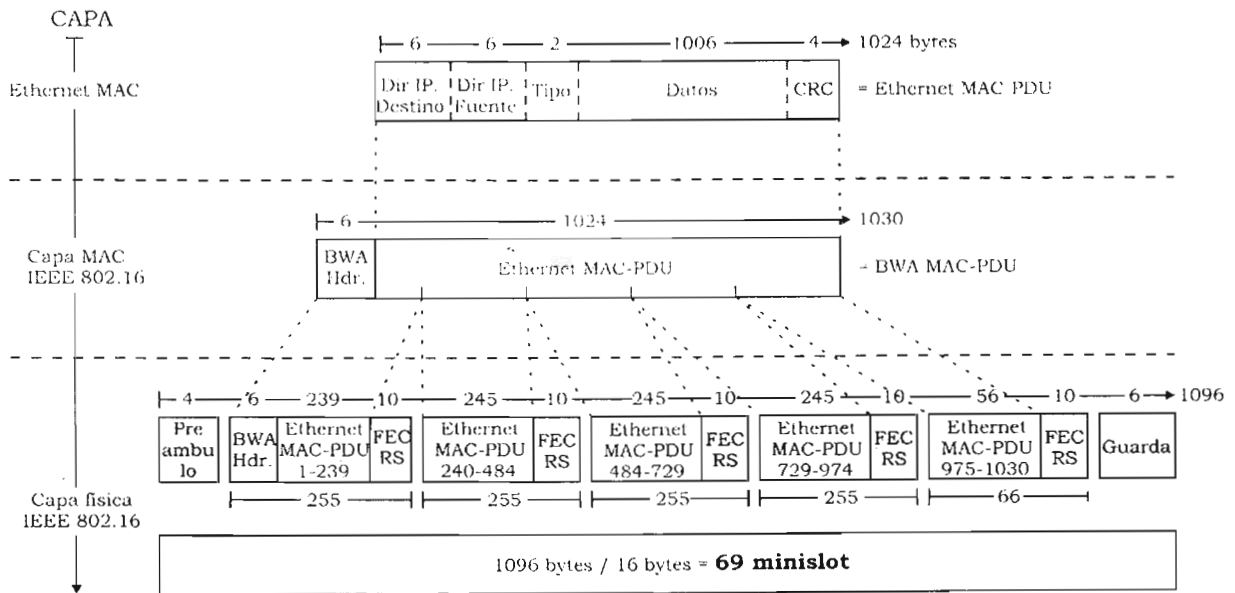


Figura 5.9 – Cálculo de la cantidad de minislots que un *Ethernet MAC frame* de 1024 bytes ocupa para su transmisión.

b) Distribución del periodo de apagado (off_dist_str): De esta distribución, el nodo calcula el tiempo que debe permanecer apagado al inicio de la simulación antes de encenderse y comenzar el proceso de *inicialización* con la BS. También deberá obtener de esta distribución, el tiempo que el nodo deberá permanecer apagado después de haber terminado su periodo de encendido. Esto con la finalidad de evitar que todos los nodos empiecen a transmitir en el mismo momento durante el inicio

de la simulación (ocasionando un congestionamiento). Para este caso, se utilizó una distribución exponencial con media igual a 0.2 segundos. Su funcionamiento se puede apreciar en la figura 5.10.

c) *Distribución del periodo de encendido (on_dist_str)*: De forma contraria a la distribución del periodo de pagado, esta distribución indicará al nodo cuanto tiempo deberá permanecer encendido. Se ha utilizado una distribución constante con media igual a 500 segundos. Su funcionamiento se puede ver en la figura 5.10.

d) *Distribución del periodo de arribos (on_arr_dist_str)*: Indica al generador de tráfico, en que momento deberá generar un paquete (de tamaño asignando por la *distribución del tamaño del paquete*). Se ha utilizado una distribución exponencial con una media igual a 0.092025 para obtener en combinación con la *distribución del tamaño del paquete* (cuya media es 368.1 bytes) una tasa de transmisión de datos de 32 kbps $((368.1)(8)(1/0.092))$. Su funcionamiento se puede ver en la figura 5.10.

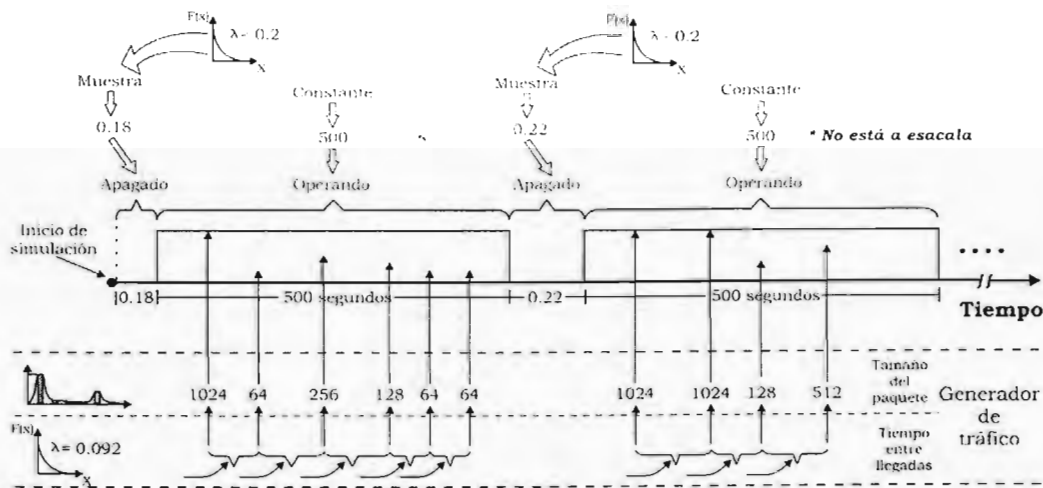


Figura 5.10 – Forma de operación del generador de tráfico tipo Internet de acuerdo a las 4 distribuciones de probabilidad implementadas.

5.3.4.2 TRÁFICO VOIP UTILIZANDO CODEC G723.1

De acuerdo con [28], los codec G723.1 producen frames de voz de 20 bytes cada 30 ms, generando una tasa de transmisión total de 5.3 kbps, tal y como se aprecia en la figura 5.11. Este codec también puede ser configurado para generar datos con una tasa de 6.3 kbps (frames de voz de 24 bytes), y de

acuerdo con [12], es el codec recomendado por ITU [64] para enlaces de voz con buena calidad y ancho de banda no garantizado.

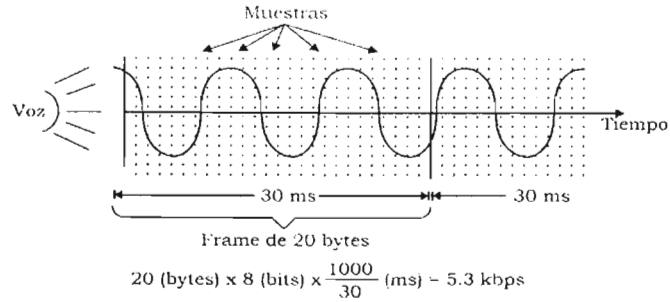


Figura 5.11 - Codificación de una señal de voz mediante un codec G723.1.

Los 20 bytes son generados a nivel capa aplicación, por lo que debemos considerar todos los encabezados que se van agregando cuando el *frame* va bajando por las distintas capas hasta llegar a la capa física del estándar IEEE 802.16, tal y como se aprecia en la figura 5.12. Al final, deberemos solicitar 6 minislot por cada *frame* de 20 bytes generados por el codec G723.1 cada 30 ms. Nótese que se utiliza supresión de encabezados, esto significa que los 40 bytes de encabezados pertenecientes a las capas RTP (12), UDP (8) e IP (20), se pueden resumir en 13 bytes suprimiendo los campos que no cambian durante la conexión [13].

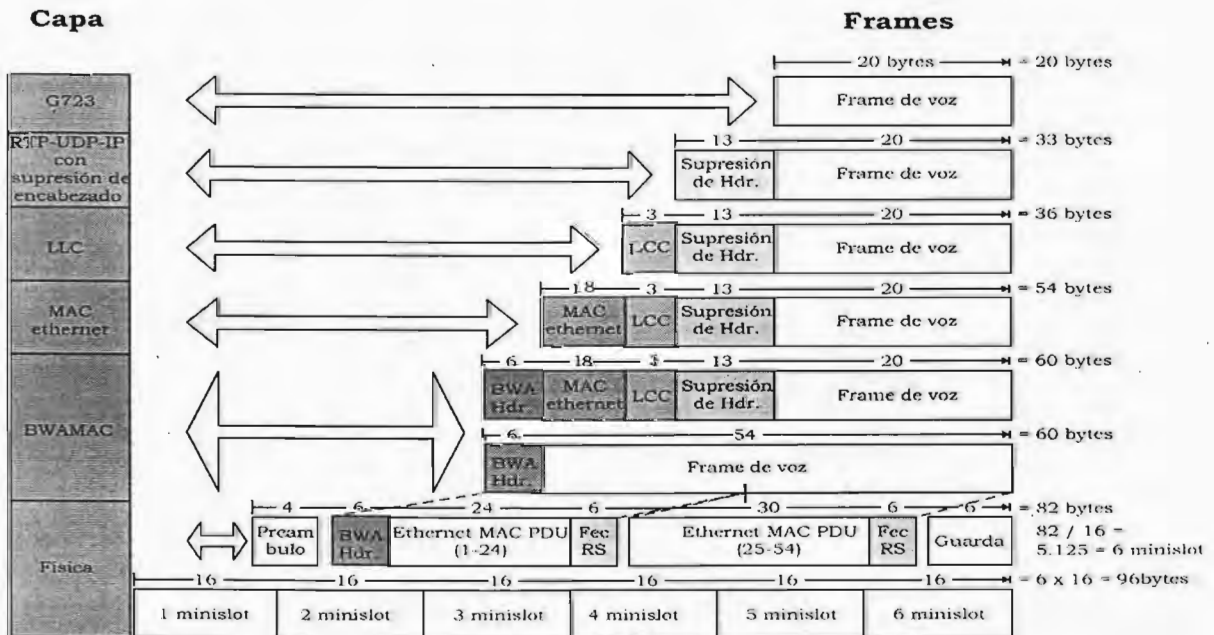


Figura 5.12 - Cálculo de minislot que ocupa cada *frame* de 20 bytes, generado por un codec G723.1.

La configuración de las distribuciones se muestran a continuación.

a) Distribución del tamaño del paquete (pksize_dist_str): Para este caso, será constante a 20 bytes por paquete.

b) Distribución del periodo de encendido (on_dist_str): Al igual que en tráfico tipo Internet, será constante con un periodo de 500 segundos.

c) Distribución del periodos de arribos (on_arr_dist_str): Será constante, generando un paquete cada 30 milisegundos.

d) Distribución del periodo de apagado (off_dist_str): Será exponencial para evitar al igual que en el caso de tráfico tipo Internet, que todos los nodos con tráfico de VoIP enciendan simultáneamente ocasionando un congestionamiento en la red durante el proceso de inicialización, y para evitar también, que todos los nodos estén generado paquetes exactamente al mismo tiempo.

A lo largo de las simulaciones, los nodos fueron configurados con un tipo de tráfico diferente para cada ocasión (según se especifica en cada una de las gráficas de la sección 5.5). Por lo tanto, en algunos casos los nodos móviles se configuraron con tráfico tipo Internet y los nodos fijos con tráfico VoIP y viceversa. En otras ocasiones, todos los nodos fueron configurados con tráfico tipo Internet, o con tráfico de VoIP.

De la misma forma, la QoS que se le asignó a los diferentes nodos durante las simulaciones, fue variando entre dos posibilidades: BE ó UGS. Por lo tanto, podemos tener nodos con tráfico de VoIP bajo una QoS de BE o UGS según se especifique. Para el caso de los nodos con tráfico tipo Internet, siempre se le atendió con una QoS de BE.

5.3.5 MODELADO DE LA COMUNICACIÓN INTER-BS

Como ya se ha mencionado frecuentemente, se requiere de una comunicación entre BS durante el procedimiento de *handoff*. Para definir esta comunicación, se han configurado puertos de transmisión y recepción con enlaces simplex duplex dedicados entre la BS#1 y BS#3, así como entre la BS#1 y BS#2 como se muestra en la figura 5.13. El enlace entre ellos tiene una capacidad E1 (2048 kbps) con un retardo que varía de acuerdo a la distancia entre las BS.

Debido a que no es necesario compartir el medio, no es necesario contar con un mecanismo MAC (control de acceso al medio), y los paquetes generados para comunicación inter-BS durante el procedimiento de *handoff*, son enviados y recibidos instantáneamente.

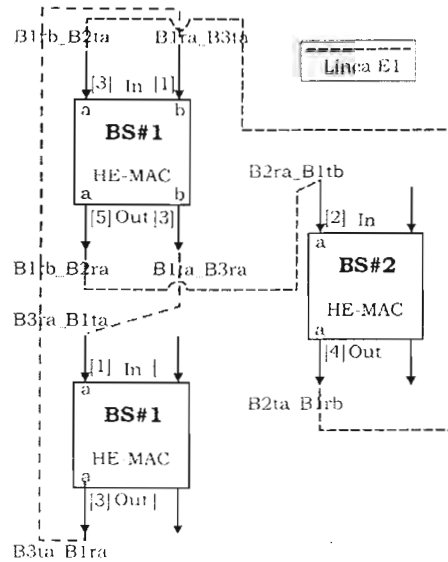


Figura 5.13 – Conexión inter-BS en el simulador.

5.3.6 MODELADO DEL PROCEDIMIENTO DE *HANDOFF*

Como ya hemos visto, los nodos móviles tienen rutas establecidas de antemano, por lo que podemos establecer tanto la ruta como la velocidad deseada. Los nodos, a través del estado *from_down* (figura 5.6b) constantemente están revisando si la potencia de la señal proveniente de la BS está por debajo del permitido. Las BSs igualmente están constantemente revisando a través del estado *upstream* (figura 5.4c) si las señales provenientes de los nodos están por debajo de la potencia establecida.

Cuando las señales están por debajo del límite permitido, el mecanismo de *handoff* es activado. Si el procedimiento de *handoff* es activado por el nodo (MSS), éste primero revisa si el mecanismo de *handoff* ya está activado con la función "ask_permise_to_continue ()";². Si ya estaba activado, ignora el evento y continua trabajando, si no está activado, registra el evento de *handoff* con la función "register_event_in_timer_list ()", e inmediatamente hace una solicitud de ancho de banda a la BS para

² En el apéndice E, se encuentran los códigos en lenguaje C de las principales funciones utilizadas en la implementación del algoritmo de *handoff*.

mandar el mensaje *HO-REQ* que acaba de construir. A partir de ahora, el nodo estará pendiente a que le asignen 5 minislot unicast en la región de mantenimiento, donde enviará el mensaje *HO-REQ* y posteriormente, esperará el mensaje *HO-RSP-MSS* para ejecutar el siguiente paso.

Cuando el procedimiento de *handoff* se activa desde la BS, primero revisa que el mecanismo de *handoff* no esté activado para este nodo mediante la función "ask_permise_to_continue ();". Si este nodo ya está registrado, la BS ignora este evento y continúa trabajando. Si no lo está, registra inmediatamente el evento de *handoff* mediante la función "register_event_in_timer_list();", le envía el mensaje *HO-BS-REQ* al nodo y le reserva 5 minislot en la región de mantenimiento para que el nodo pueda contestar con el mensaje *HO-REQ*.

Una vez que la BS recibe el mensaje *HO-REQ* del nodo, la BS extrae todos los datos contenidos dentro del mensaje y arma los paquetes *HO-REQ-NOT* mediante la función "send_ho_req_not ();", registra el número de BS vecinas a las que les enviará dicho mensaje y posteriormente, les envía dicho mensaje (ver figuras 4.16 y 4.18).

De aquí en adelante, los estados *Ho_arrival* (nodo) figura 5.6b y *HO_process* (BS) figura 5.4c, serán los encargados de llevar a buen término, el procedimiento de *handoff*.

El estado *HO_process* en la BS, es el encargado de la comunicación inter-BS. Cuando se detecta que un paquete arriba por los puertos pertenecientes a las BSs vecinas, se activa la bandera *HANDOFF* y la BS pasa del estado *Idle* al estado *HO_process*. En el estado *HO_process*, se analiza el tipo de paquete y se actúa en consecuencia. En este caso, se detecta que el mensaje es de tipo *HO-REQ-NOT* por lo que la estación vecina construye el mensaje *HO-RSP-NOT* (figura 5.13) y lo envía por el puerto de salida que pertenece a la estación base de donde le llegó el mensaje *HO-REQ-NOT*.

De nuevo, cuando la BS servidora detecta que ha llegado un paquete por alguno de los puertos pertenecientes a las conexiones con las BSs vecinas, la bandera *HANDOFF* es activada y la BS pasa del estado *Idle* al estado *HO_process*. Dentro de este estado, se revisa el tipo de paquete, como se trata de un mensaje *HO-RSP-NOT*, la BS servidora revisa si ya han llegado todos los paquetes *HO-RSP-NOT* esperados mediante la función "check_arrive_all_message ();", si no es así, la BS servidora simplemente guarda en una lista especial los datos de este mensaje mediante la función

“register_event_in_ho_compare_list ()” y pasa de nuevo al estado *Idle*. Recordemos que no se espera que en una comunicación inter-BS los mensajes se pierdan o contengan una BER muy elevada. Cuando el último mensaje *HO-RSP-NOT* esperado es recibido, la BS servidora ejecuta los siguientes pasos:

- i) Se guarda en una lista especial los datos que contiene el último mensaje *HO-RSP-NOT*.
- ii) Se llama la función “take_decision ();”, donde se revisa la lista con los datos de los mensajes *HO-RSP-NOT*, se comparan y se elige al mejor candidato.
- iii) Se construye el mensaje *HO-RSP-BS* y se envía a la BS vecina ganadora a través del puerto adecuado.
- iv) Se construye el mensaje *HO-RSP-MSS* y se envía al MSS con la máxima prioridad (se coloca automáticamente a la cabeza de la cola de espera ubicado en el proceso hijo (child process) *bwa_be_txctl*).
- v) Se borran de las listas, los datos guardados para el nodo mediante las funciones “erase_expired_data_from_decision_list ();” y “erase_expired_data_from_compare_list ();”.
- vi) Se borran de la lista *qosMasterEntry*, los parámetros de QoS del nodo, pero antes, se registran (copian) en una lista especial con el nuevo CID y con la nueva BS (BS objetivo) estos parámetros de QoS mediante la función “pass_the_qos_to_new_sid ();”. Con lo que la BS servidora cierra todas las conexiones con el MSS, terminando de esta forma, su participación dentro del proceso de *handoff*.

Ahora, todo está en manos de la BS objetivo que recibirá al nodo y del nodo que está ejecutando el proceso de *handoff*.

En este momento, la BS objetivo deberá detectar el arribo de un mensaje por unos de sus puertos conectados con las BSs vecinas, por lo que la bandera *HANDOFF* se activa y pasa del estado *Idle* al estado *HO_process*. En el estado *HO_process* se revisa que se trata del mensaje *HO-RSP-BS*, por lo que procede a reservar 3 minislots al nuevo CID (que ya había especificado en el mensaje *HO-RSP-NOT*) en la región de mantenimiento al nodo que se va a unir con ella. Finalmente la BS objetivo espera hasta que el nodo le responda.

El nodo, al recibir el mensaje *HO-RSP-MSS* pasa al estado *From_Downs*, donde después de revisar el tipo de mensaje pasa al estado *Ho_arrival*, donde se ejecutan los siguientes pasos:

a) Cambia las frecuencias de sus módulos de transmisión y recepción para sintonizarse con la BS objetivo (mediante la función “change_to_new_frequency_for_ho ();”).

b) Avisa al proceso hijo *bwa_wm_child*, que guarde en una cola especial de *handoff*, todos los paquetes de datos que se generen a partir de este momento, de tal forma, que no se transmitirá ningún tipo de paquete que no sea relativo al mecanismo de *handoff*.

c) Manda un mensaje especial al proceso hijo *bwa_wm_child*, únicamente para avisarle que cambie el antiguo CID al nuevo CID mediante la función “update_station_sid_after_ho ();”.

d) Ordena al proceso hijo, que mande el mensaje *RNG-REQ* a la nueva BS (BS objetivo) mediante la función “send_RNG_REQ_HO ();”.

e) El proceso hijo estará entonces, esperando le asignen 3 minislot con su nuevo CID, en la región de mantenimiento para enviar el primer mensaje *RNG-REQ*.

A partir de ahora, el nodo y la BS objetivo ejecutan el procedimiento de *ranging* tal y como se describe en la sección 4.7.3. Una vez que la potencia de transmisión y el offset han sido debidamente ajustados, el nodo avisará al proceso hijo que pase los paquetes de datos que se encuentran guardados en cola especial de *handoff* a la cola de transmisión. Finalmente, comienza una operación normal con la BS objetivo que ahora se convertirá en la BS servidora.

5.4 MODELO ANALÍTICO

Como se mencionó al principio del capítulo, es difícil establecer un modelo matemático que para este caso, sea realmente de uso práctico. Sin embargo, se presenta un pequeño análisis con ayuda de gráficas para establecer un estimado del retardo del mecanismo de *handoff* si este fuera del tipo “break before make”.

5.4.1 ANÁLISIS DEL RETARDO DE INICIALIZACIÓN

Ya conocemos el proceso de inicialización, sin embargo ahora intentaremos medir los retardos de cada fase. Para lograrlo hay que hacer un análisis un tanto más detallado de cada una de las fases, por ejemplo, encontrar cuantos mensajes se intercambian, bajo que mecanismo o que tan rápido se

consigue el permiso para poder transmitir dichos mensajes. Al final, trataremos de conseguir una formula que nos dé la posibilidad de analizar el tiempo de los retardos.

En la figura 5.14, se muestra el intercambio de mensajes durante el proceso de inicialización, donde se calcula el retardo que cada uno de los mensajes va produciendo tomando como unidad de tiempo la duración de un mapa.

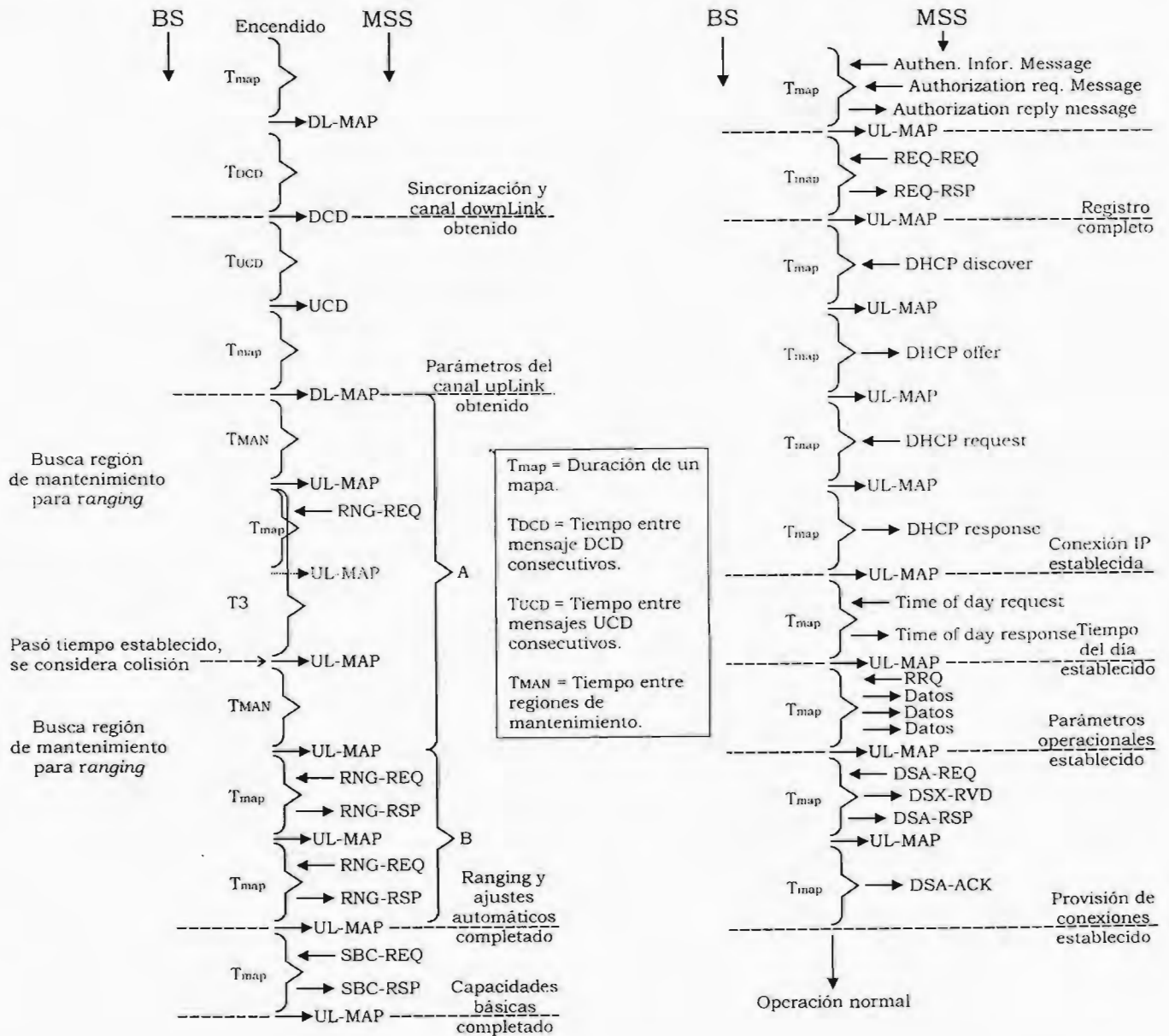


Figura 5.14 - Tiempo estimado del proceso de inicialización de un nodo.

Podemos notar, que algunas etapas resultan totalmente aleatorias. Por ejemplo, en la etapa de “Ranging y ajustes automáticos”, el primer mensaje se envía utilizando el algoritmo de contención y el tiempo que tarde en llevarse a cabo esta fase, dependerá mucho del número de colisiones que ocurran. También en esta etapa, los mensajes de *RNG-REQ* y *RNG-RSP*, se deberán repetir hasta que la BS decida que la potencia de transmisión y el offset del nodo (MSS), estén debidamente ajustados.

De la figura 5.14 se obtiene la siguiente ecuación:

$$T_i = T_{MAP} + T_{DCD} + T_{UCD} + T_{MAP} + A + B + T_{MAP} + T_{MAP} + (4 \times T_{MAP}) + T_{MAP} + T_{MAP} + (2 \times T_{MAP}) \quad (5.1)$$

Donde: T_i = tiempo de inicialización (retardo de inicialización).
 T_{MAP} = tiempo entre dos mensajes MAP consecutivos.
 T_{DCD} = Tiempo entre dos mensajes DCD consecutivos.
 T_{UCD} = Tiempo entre dos mensajes UCD consecutivos.
A = Tiempo (variable) que transcurre de acuerdo al número de intentos (colisiones) necesarios para poder enviar el primer mensaje *RNG-REQ*.
B = Tiempo (variable) que transcurre de acuerdo al número de repeticiones de los mensajes *RNG-REQ* y *RNG-RSP*, para un ajuste de potencia y offset adecuado.

Si consideramos $T_{DCD} = T_{UCD}$ y simplificando (5.1), obtenemos:

$$T_i = (12 \times T_{MAP}) + (2 \times T_{DCD}) + A + B \quad (5.2)$$

El parámetro **A** se puede calcular de la siguiente forma:

$$A = \left[\frac{2^0}{\#slot} \right] (T_{MAN} + T16) + \left[\frac{2^1}{\#slot} \right] (T_{MAN} + T16) + \left[\frac{2^2}{\#slot} \right] (T_{MAN} + T16) + \dots \quad (5.3)$$

1 colisión 2 colisiones 3 colisiones

Por lo tanto:

$$A = \sum_i^a \left[\frac{2^i}{\#slot} \right] (T_{MAN} + T16) \quad (5.4)$$

Donde: a = Número de colisiones.

$\# slots$ = Número de *slots* que son asignados por región *initial maintenance*.

i = Ventana de *backoff* inicial.

T_{MAN} = Tiempo entre dos regiones *initial maintenance* para *ranging*.

$T16$ = Tiempo de espera para asignación de ancho de banda. Después de este tiempo, el MSS considera que el mensaje con la solicitud de ancho de banda ha colisionado.

Para nuestro caso, B representará un número fijo que indicará el número de veces que se repite el proceso de *ranging* hasta que la BS considere que todos los parámetros involucrados ya están debidamente ajustados.

La ecuación de tiempo de inicialización (5.1), finalmente se puede resumir de la siguiente forma:

$$Ti = (12 \times T_{MAP}) + (2 \times T_{DCD}) + \sum_i^a \left[\frac{2^i}{\#slot} \right] (T_{MAN} + T16) + B \quad (5.5)$$

5.4.2 GRÁFICAS DE RETARDO BAJO DIFERENTES CONDICIONES DE OPERACIÓN

Ahora, buscaremos encontrar con ayuda de gráficas, como se comporta el retardo de inicialización cuando variamos dos de los siguientes 3 parámetros: tamaño del mensaje DL-MAP, cantidad de minislot asignados en la región de *initial maintenance* y el número de colisiones que ocurren para enviar el primer mensaje *RGN-REQ*. Los parámetros que no varían son:

$T16 = 10$ ms (el valor mínimo posible que esta variable puede tomar es 10 ms [24]).

$T_{UCD} = T_{DCD} = 1$ segundo (valor propuesto de acuerdo con [49]).

$T_{MAN} = 0.5$ segundos (valor propuesto de acuerdo con [49]).

$B = 3$ (número de veces que se ejecuta el proceso de *ranging* para un ajuste exitoso de los parámetros involucrados).

En las gráficas que se presentan a continuación, "*#slots*" es la cantidad de *slots* asignados en cada región de mantenimiento.

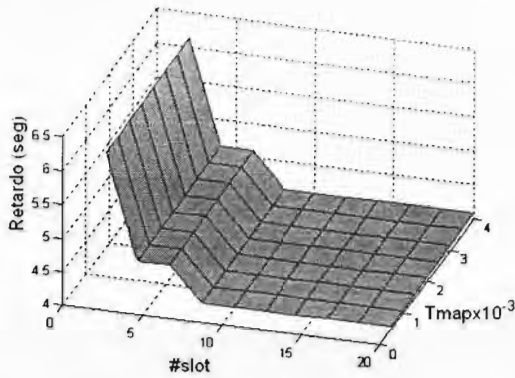


Figura 5.15 - Gráfica de retardo de proceso de inicialización considerando 4 colisiones.

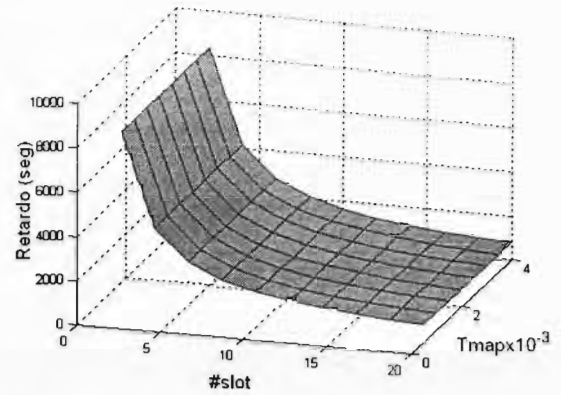


Figura 5.16 - Gráfica de retardo de proceso de inicialización considerando 15 colisiones.

En la gráfica 5.16 se puede apreciar que cuando tenemos una red sumamente saturada con un promedio de 15 colisiones para mandar una solicitud, los tiempos de retardo por inicialización se disparan. En la figura 5.15 podemos ver que el tamaño del mapa poco influye, ya que el tiempo T_{MAN} no cambia, sin embargo, la cantidad de *slots* asignados por región de mantenimiento si influye considerablemente. Los retardos obtenidos son de 4.5 segundos para 5 y 4 minislot, 5.5 segundos para 3 minislot, 6 segundos para 2 minislot y 9.5 segundos para 1 minislot³. En la figura 5.17, de nuevo puede verse que el retardo de inicialización se eleva de forma exponencial a partir de las 11 colisiones aproximadamente cuando contamos con 5 minislot por región de mantenimiento.

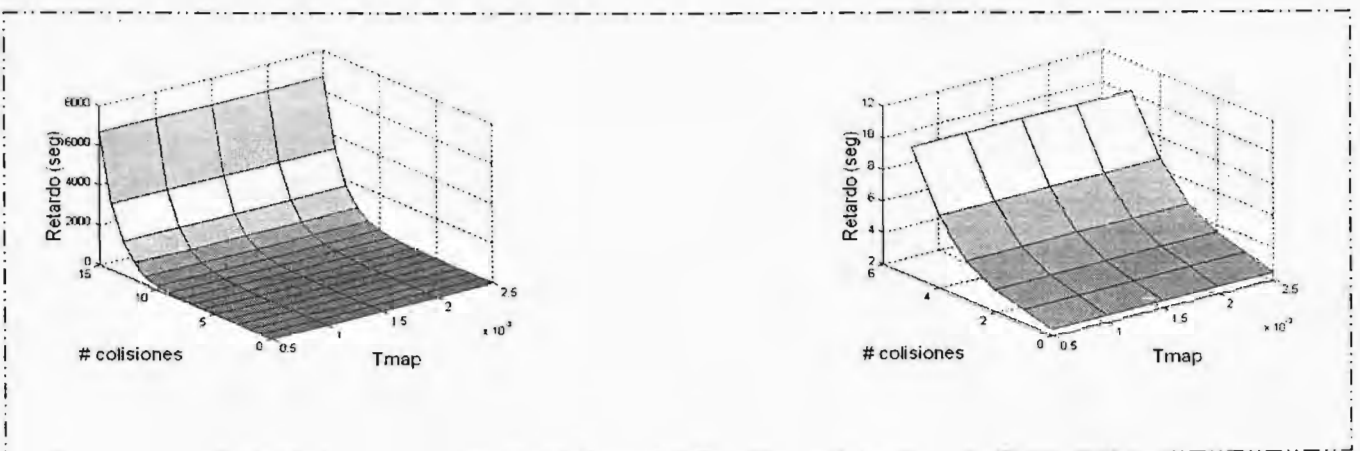


Figura 5.17 - Gráficas de retardo de proceso de inicialización considerando 1 y 5 *slots*.

³ En la práctica los valores que se utilizan para la región de mantenimiento van de 1 a 5 minislot [3.11].

La razón del porque el número de colisiones hace crecer exponencialmente el retardo de inicialización, es porque el algoritmo *exponential backoff* hace crecer exponencialmente la ventana de *backoff*.

En la figura 5.18 podemos ver que cuando existen pocas colisiones, el número de *slots* de mantenimiento asignados no influye mucho, esto es debido a que la ventana de *backoff* no es muy grande y el usuario no necesita muchos *slots* de donde escoger. Por lo tanto, la cantidad de *slots* asignados por región de mantenimiento más que acelerar el procedimiento de inicialización, servirían para desminuirlo cuando existen muchas colisiones.

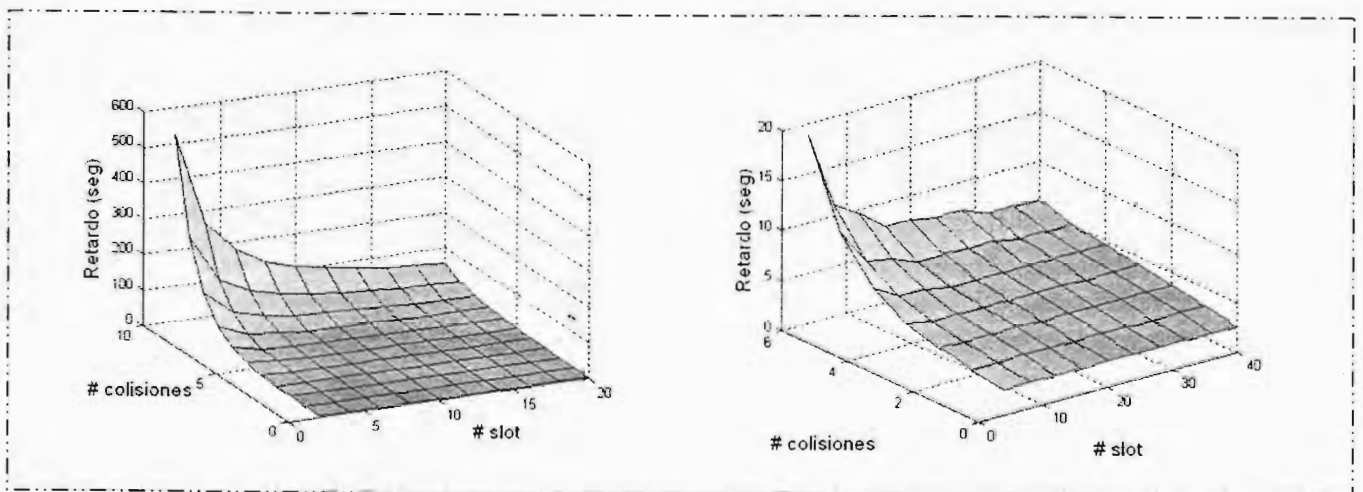


Figura 5.18 - Gráficas de retardo de proceso de inicialización considerando $T_{MAP} = 2$ ms.

Para poder garantizar una cierta calidad y servicio, necesitamos desminuir los tiempos de inicialización considerablemente. En la siguiente sección, se muestra mediante simulaciones que el mecanismo de *handoff* propuesto puede garantizar calidad y servicio al disminuir los tiempos de inicialización, debido en gran parte, a que se evitan las colisiones al no entrar en la región de contención.

5.5 RESULTADO DE SIMULACIONES

5.5.1 SERVICIO BE

Tráfico Internet: Las siguientes gráficas, muestran los resultados obtenidos de un escenario donde todos los nodos están generando tráfico tipo Internet (32 kbps), con un servicio de QoS BE.

Para este caso, podemos calcular el número máximo de usuarios que el sistema puede soportar de acuerdo a las siguientes ecuaciones:

$$\text{nodos_por_BS} = \frac{(\text{num_slots_por_mapa} - \text{num_slot_para_contención})}{\text{duración_del_mapa}} \times \text{MSPS} \quad (5.6)$$

Donde:

- nodos_por_BS = nodos con tráfico Internet que soporta una BS.
- num_slots_por_mapa = Número de slot que cada mapa puede programar.
- num_slot_para_contención = Número de slot utilizados en la región de contención.
- duración_del_mapa = tiempo en segundos que un mapa puede programar.
- MSPS = minislot por segundo que un nodo solicita.

Podemos calcular MSPS mediante la siguiente ecuación

$$\text{MSPS} = \mu \times \gamma \quad (5.7)$$

Donde:

- μ = Promedio en minislot que un nodo solicita.
- γ = Arribos de paquetes por segundo = $1/\lambda$.

Finalmente, calculamos μ mediante la siguiente ecuación

$$\mu = \text{tmp1} + \text{tmp2} + \text{tmp3} + \text{tmp4} + \dots + \text{tmpx} \quad (5.8)$$

Donde:

- tmp = tamaño de los paquetes utilizados en la distribución (figura 5.8) en minislot (figura 5.9).

De acuerdo a las formulas 5.6 - 5.8, la cantidad de usuarios que una BS puede soportar con 44 minislot por mapa, 8 slots para contención, 2 ms de duración del mapa, y tráfico tipo Internet, es de 63 usuarios.

Las gráficas que se obtuvieron de las simulaciones se muestran a continuación:

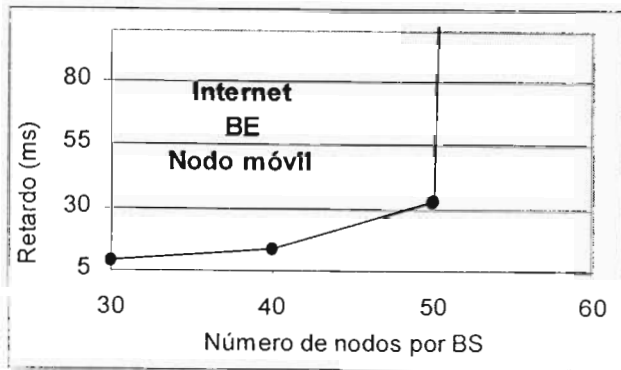


Figura 5.19 – Retardo promedio del nodo móvil.

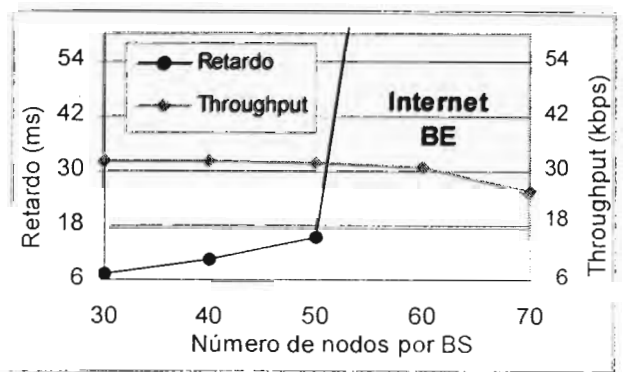


Figura 5.20 – Retardo promedio de todos los nodos.

De la figura 5.20 se puede deducir que la BS se satura poco antes de los 60 nodos, y de la figura 5.19 podemos notar que en el nodo móvil los retardos se disparan antes de los 60 nodos, y como consecuencia, el proceso de *handoff* no se está llevando a cabo. La diferencia respecto al valor obtenido mediante la ecuación 5.6 y los resultados de las simulaciones, se debe a que las ecuaciones no consideran los retardos por contención.

Cuando hablamos de un nodo móvil que opera bajo una QoS de BE, los retardos por cambio de estación base no pueden garantizarse dentro de un rango, ya que estas dependerán de las colisiones resultantes al momentos de re-establecer la conexión con la nueva BS. Para el caso de la figura 5.21, donde las dos estaciones base (BS servidora y BS objetivo) cuentan con el mismo número de usuarios, el retardo del primer paquete enviado por la nueva BS, se aproxima al promedio de los retardos del nodo móvil (13.48 ms). En la figura 5.22, se muestra el *throughput* para un MSS con 40 usuarios. La variación del *throughput* se debe a la distribución exponencial de los arribos y la distribución del tamaño de los paquetes utilizado para modelar tráfico tipo Internet. En el apéndice D.1 se muestran más gráficas para este caso.

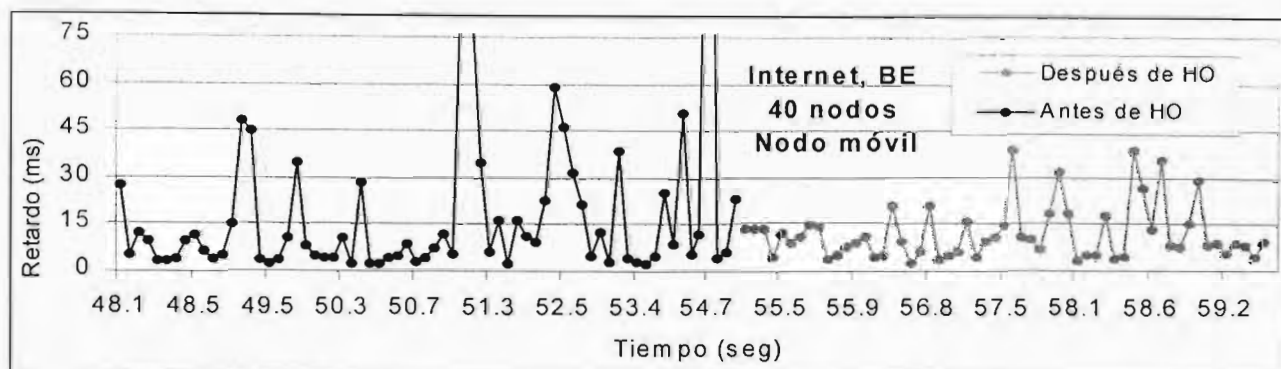


Figura 5.21 - Retardo del nodo móvil durante el proceso de *handoff* con 40 usuarios.

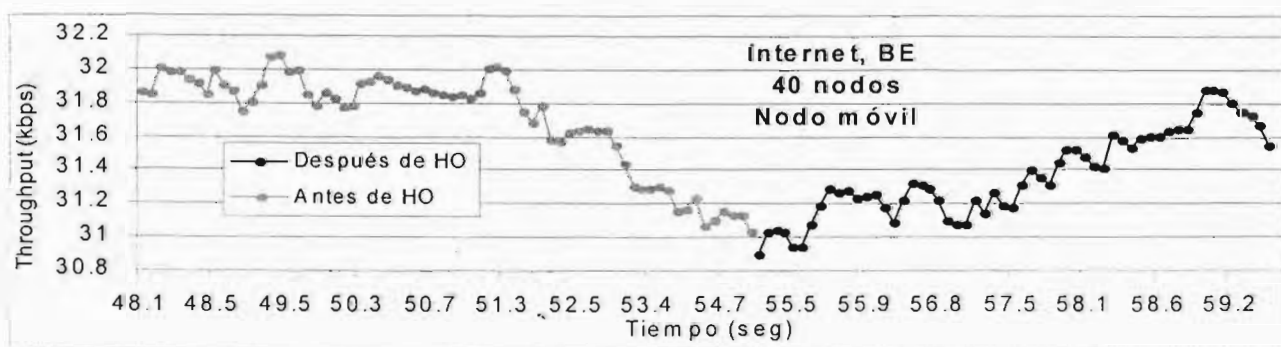


Figura 5.22 - *Throughput* del nodo móvil durante el proceso de *handoff* con 40 usuarios.

Tráfico G723.1: Cuando tenemos nodos que generan tráfico tipo G723.1, podemos calcular la capacidad máxima de nodos por BS mediante las siguientes ecuaciones:

$$num_usuarios = \frac{tasa_para_reservación}{tasa_por_usuario} \tag{5.9}$$

Donde: $tasa_para_reservación$ = Ancho de banda para reservación.
 $tasa_por_usuario$ = Tasa de transmisión que cada usuario está generando.

A su vez:

$$tasa_para_reservación(bps) = \frac{\left(\frac{(Bw)(tm)}{fm}\right)(srpm)}{slot_por_mapa} \tag{5.10}$$

Donde: Bw = Ancho de banda del canal.
 tm = según el esquema de modulación: QPSK=2, 16-QAM = 4, 64-QAM= 6.
 fm = 1 + factor *rolloff* (= 1.25 para este caso).
 $srpm$ = *slots* para reservación por mapa.

$$tasa_por_usuario(bps) = \left(\frac{stu}{pt}\right)(bytes_por_slot) \tag{5.11}$$

Donde: stu = número de *slots* reservados periódicamente por usuario.
 pt = periodo de reservación por usuario.

Recordemos antes que nada, que el codec G723.1 se utiliza para enviar voz sobre IP, por lo tanto, para tener un buen servicio primero debemos verificar que los retardos no excedan los 50 ms o los 150 ms si utilizamos supresores de eco. De la figura 5.23, donde tenemos los retardos promedio para un nodo móvil en relación al número de nodos por BS, podemos apreciar que, de los 90 nodos en adelante, los retardos están por encima del límite adecuado. El valor teórico de saturación de acuerdo con las ecuaciones 5.9 - 5.11 es de 90 nodos, si consideramos que los nodos tienen que entrar en contención cada que ocupan enviar un paquete, comprendemos porqué los retardos se disparan un poco antes de los 90 nodos. La figura 5.24 muestra los retardos promedio para todos los nodos.

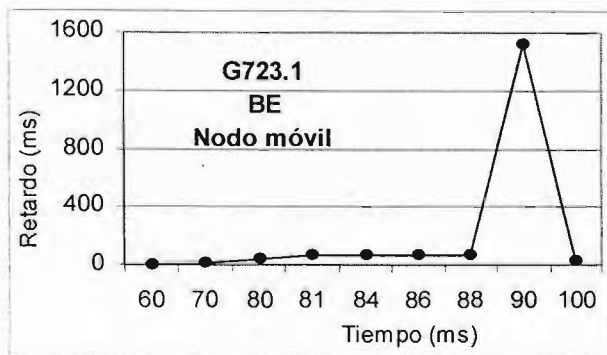


Figura 5.23 – Retardos para un nodo móvil con tráfico G723.1 bajo BE.

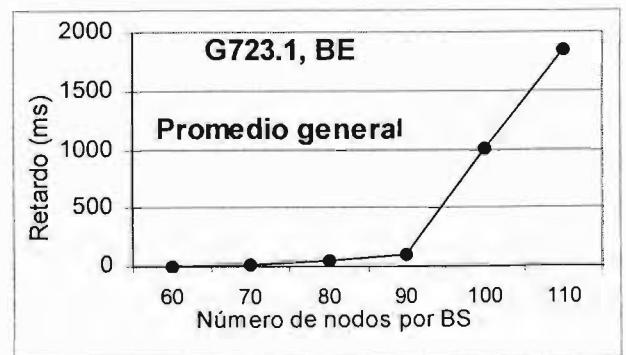


Figura 5.24 – Retardo promedio para todos los nodos, con tráfico G723.1 bajo BE.

El crecimiento del retardo que se aprecia en la figura 5.24, es debido a que la BS está sobre saturada, ocasionando que no pueda atender a los nodos dentro de un tiempo razonable.

Las figura 5.25 y 5.26, muestran que el retardo por procedimiento de *handoff* va de acuerdo con los retardos promedio de los paquetes. Esto se debe a que el MSS para iniciar el procedimiento de *handoff* debe entrar en contención para enviar la solicitud de inicio de *handoff*, aunque los siguientes intercambios de mensajes se lleven a cabo mediante reservación unicast.

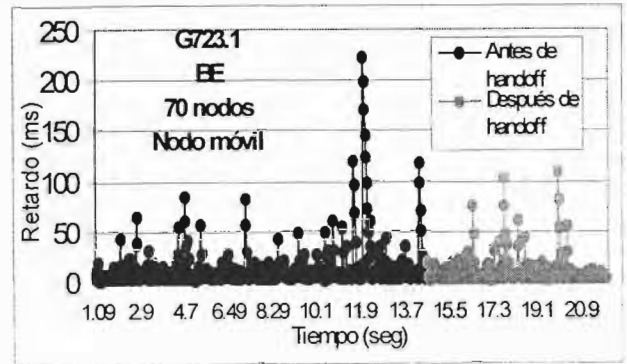
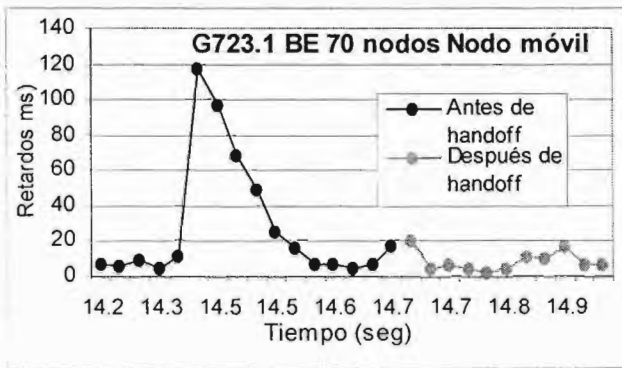


Figura 5.25 – Retardos de un MSS justo en el momento de *handoff* en una BS con 70 nodos bajo un servicio BE y tráfico G723.

Figura 5.26 – Retardos de un MSS en una BS con 70 nodos bajo un servicio BE y tráfico G723.1.

Las gráficas 5.28 muestra el retardo de nodo móvil justo en el momento de que ejecuta el procedimiento de *handoff* cuando la BS está casi saturada. De nuevo, el procedimiento de *handoff* podría pasar desapercibido tal y como se muestra en la figura 5.28. Sin embargo, los retardos son tan grandes que el servicio de VoIP resultaría inservible en estas condiciones de trabajo, ya que 6% (42/693) de los paquetes pasan de 150 ms, y 21 % (147/693) de los paquetes sobrepasan los 50 ms. Para mantener los retardos dentro de un rango aceptable, ocuparíamos que la BS se encontrara muy por debajo de su capacidad máxima. En el apéndice D.2, se muestran más gráficas para este caso.

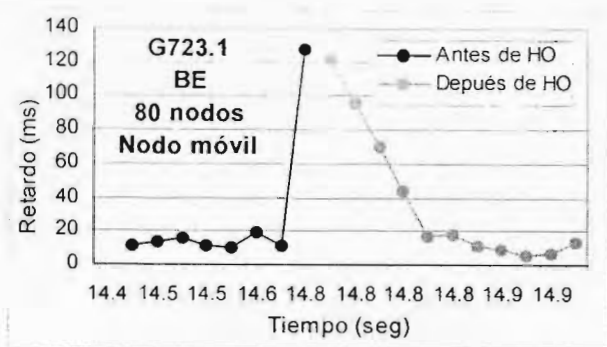


Figura 5.27- Retardo de los paquetes justo en el momento de *handoff* para un MSS que opera bajo BE con tráfico G723.1 con 80 nodos.

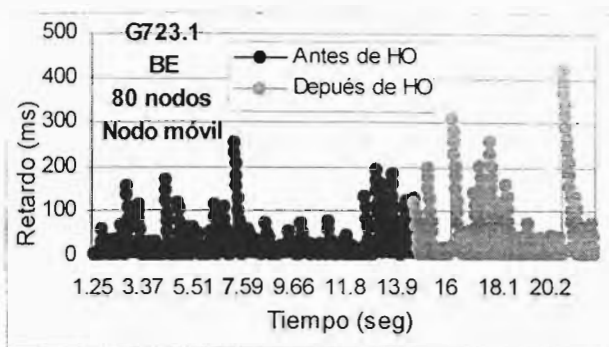


Figura 5.28 - Retardo de un MSS durante el proceso de *handoff* con 80 nodos bajo BE y tráfico G723.1.

5.5.2 SERVICIO UGS

En las siguientes simulaciones, se cuenta con un servicio UGS para todo los nodos que se encuentren operando, los cuales a su vez, transmiten simulando tráfico de VoIP de acuerdo con las especificaciones del codec G723.1.

Bajo un servicio exclusivamente UGS y con la mismas características para todos los usuarios, podemos calcular la capacidad máxima de usuarios que cada BS puede soportar mediante las ecuaciones 5.9 - 5.11. Para el caso del sistema que estamos modelando, los mapas tienen una duración igual a 2ms y 36 *slots* disponibles para reservación de los 44 disponibles, dejando 8 para contención (al menos que se especifique lo contrario). Entonces, la capacidad máxima de cada estación base será de 90 nodos (o 270 nodos por las tres estaciones bases).

En la figura 5.29, se pueden apreciar los retardos que sufren los paquetes generados por un MSS que ha ejecutado un proceso de HO poco después del segundo 4.5119.

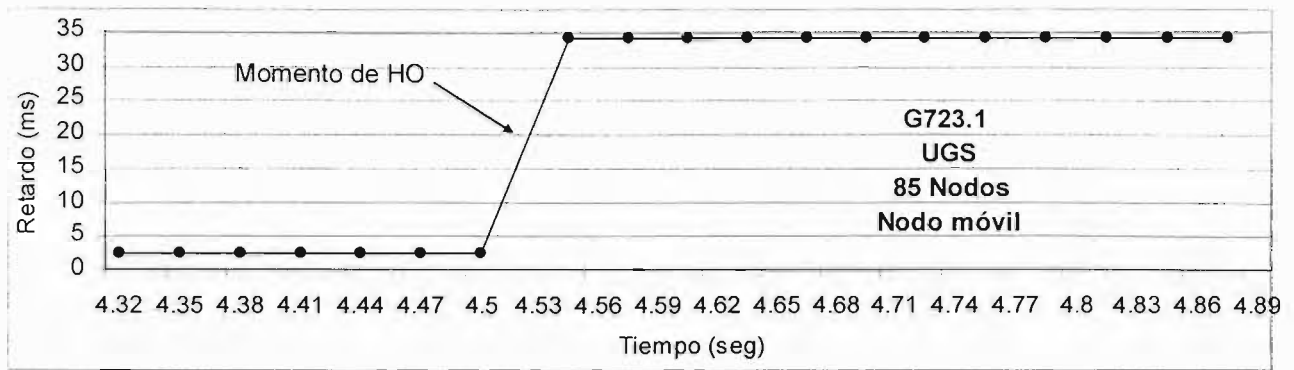


Figura 5.29 - Retardo instantáneo para un nodo que ejecuta *handoff* poco después del segundo 4.5119.

La razón por la que se aprecia un aumento de aproximadamente 30 milisegundo después de ejecutar el procedimiento de HO, es porque durante el cambio de conexión se le prohíbe transmitir al nodo. Sin embargo, éste sigue generando paquetes cada 30 milisegundos por lo que después de ejecutar el cambio de conexión, el nodo tiene un paquete en el buffer esperando a ser transmitido, el cual, se desfasa un tiempo como se aprecia en la figura 5.30.

En la figura 5.31, se muestra lo que sucedió con el *throughput* para el mismo caso.

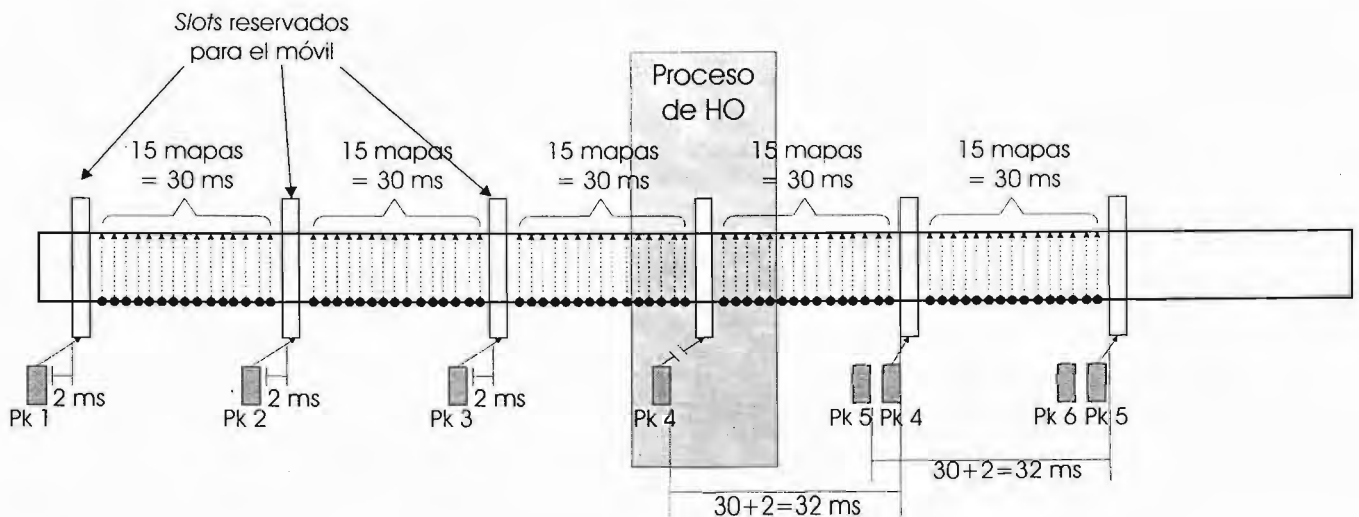


Figura 5.30 - Ilustración del retraso fijo de aproximadamente 30 ms que sufren los nodos móviles, debido al proceso de *handoff*.

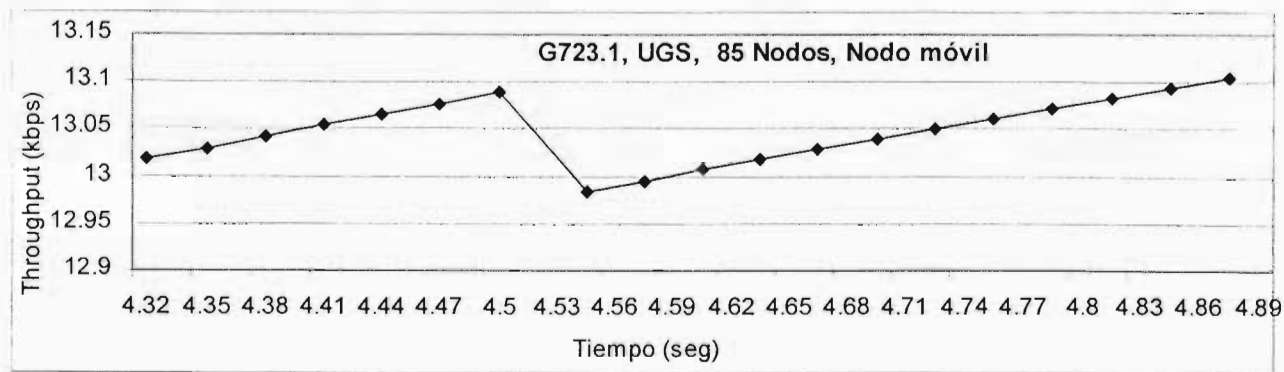


Figura 5.31 - *Throughput* instantáneo para un nodo que ejecuta *handoff* poco después del segundo 4.5119.

La caída en el *throughput* que se aprecia en la gráfica de la figura 5.31 se debe a que el paquete generado durante el proceso de *handoff*, no fue transmitido.

En la figura 5.32, se tiene el caso de una estación base que se encuentra a su máxima capacidad. Puede notarse que además de los 30 ms de retardo esperado después de ejecutar el procedimiento de HO, se nota un constante aumento en el mismo. Esto es porque la BS que está recibiendo al nuevo nodo, ya sobrepasa en un usuario su capacidad máxima, por consecuencia le cuesta trabajo despacharlo. Por eso es importante que la estación base que reciba al nuevo nodo no sobrepase su capacidad en ningún momento.

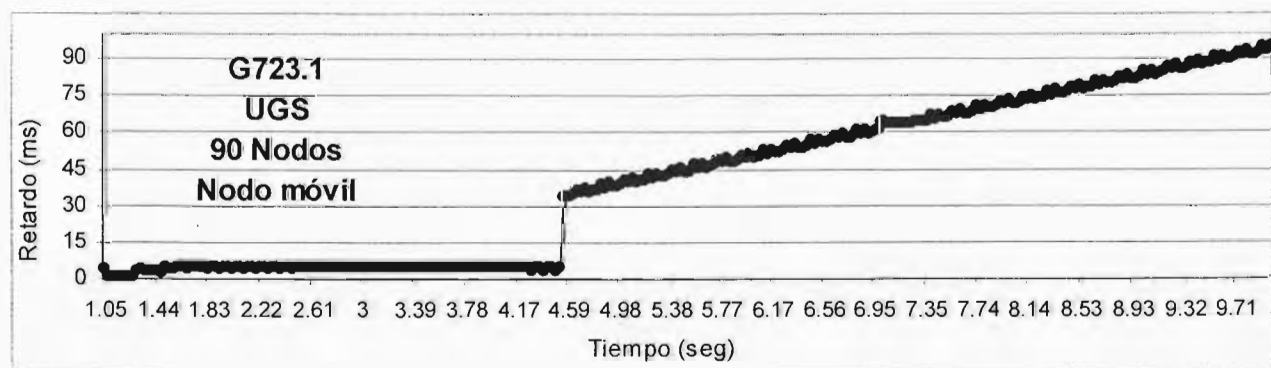


Figura 5.32 - Retardo instantáneo para un MSS que ejecuta el procedimiento de *handoff* hacia una BS que se encuentra a su máxima capacidad.

Para evitar que se generen los 30 ms aproximados de retardo adicional en un MSS que ha ejecutado el procedimiento de *handoff*, se proponen las siguientes opciones:

- a) **Eliminar los paquetes generados en el lapso de HO.** Está permitido perder algunos paquetes (siempre y cuando no se pierdan más del 3% de los paquetes de voz) sin perder considerablemente la calidad de la conexión. Sin embargo, los retardos deben mantenerse lo más bajo posible.
- b) **Conceder más slots.** Concederle al MSS los *slots* necesarios para que transmita todos los paquetes generados durante el proceso de *handoff*.
- c) **Aprovechar los momentos de silencio.** Si consideramos que un usuario común no está continuamente hablando, podríamos aprovechar estos momentos de silencio para ajustar el retardo enviando el paquete que se encuentre en ese momento en la cola de espera.

a) Eliminar los paquetes generados en el lapso de HO.

Como puede apreciarse en las figuras 5.33 y 5.34, cuando se utiliza la opción de eliminar los paquetes que se generaron durante el procedimiento de *handoff*, el retardo no sufre variación, aunque el *throughput* si resiente una disminución. El aumento en el retardo de los paquetes que se aprecia en la figura 5.34 es debido al mecanismo de servicio UGS implementado y no al mecanismo de *handoff*. La baja en el *throughput* que se aprecia en la figura 5.33 es debido a que los paquetes generados durante el proceso de *handoff* son eliminados. En el apéndice D.3, se encuentran más gráficas para este caso.

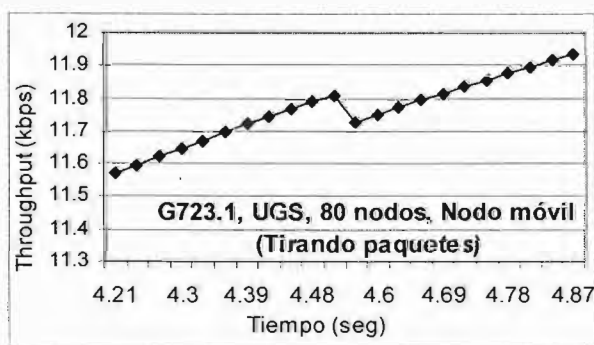


Figura 5.33 - *Throughput* del MSS con 80 nodos tráfico G723.1 servicio UGS tirando paquetes.

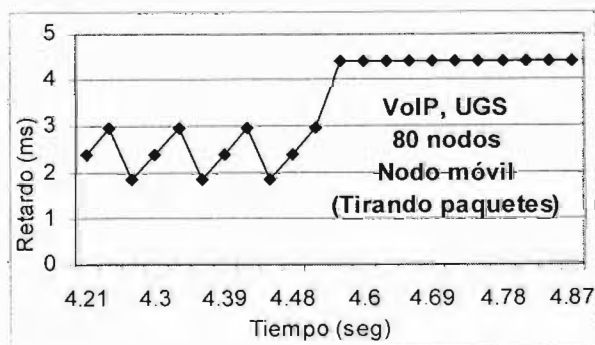


Figura 5.34 - Retardo del MSS con 80 nodos bajo UGS con tráfico G723.1 tirando paquetes.

b) Conceder más *slots*.

En las figuras 5.35 y 5.36, se muestran las gráficas donde la opción de implementar más *slots* para el envío de paquetes generados durante el proceso de *handoff* se ha implementado. Nótese que en las gráficas se manejan 95 usuarios sin ningún problema de sobre cupo, esto es, porque para estas simulaciones se utilizaron solo 2 *slots* para contención, con lo que de acuerdo a las formulas 5.9-5.11, podemos soportar hasta 105 usuarios por estación base.

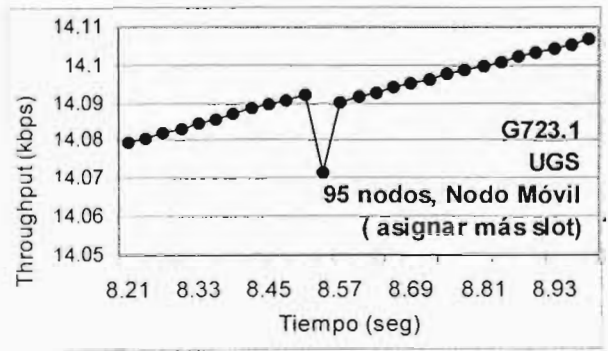
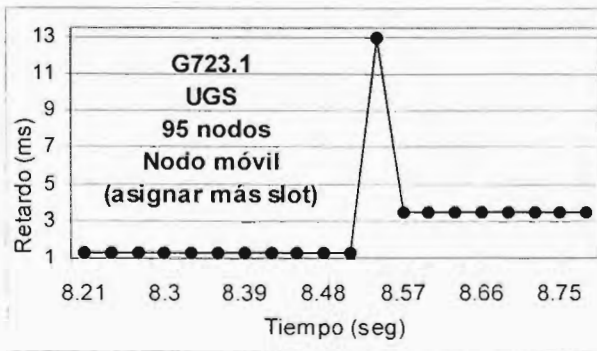


Figura 5.35 – Retardo de nodo móvil con 95 usuarios, cuando se asignan más *slots* después del proceso de *handoff*.

Figura 5.36 – *Throughput* del MSS con 95 nodos, cuando se asignan más *slots* después del proceso de *handoff*.

Como puede observarse en la figura 5.35, el retardo que aumenta durante el proceso de *handoff*, es nuevamente ajustado debido a que la nueva estación base le ha asignado al MSS, los *slots* necesarios para que transmita el paquete que quedó pendiente durante la etapa de *handoff*. El ligero aumento de retardo que se sigue apreciando, es debido al mecanismo UGS y no al proceso de *handoff*. En la figura 5.36, se aprecia que el *throughput* se recupera mucho más rápido que en el caso donde no se asignan más *slots*. En el apéndice D.4, se pueden encontrar más gráficas para este caso.

c) Aprovechar los momentos de silencio.

En la figura 5.37, se muestra el resultado de un procedimiento de *handoff* cuyos parámetros de simulación (ver tabla 5.4) se han colocado para que el MSS transmita durante dos segundos y después,

se mantenga en silencio durante los siguientes dos segundos antes de empezar nuevamente a transmitir y continuar sucesivamente.

variable	Tipo de distribución	valor
on_period_dist	Constant	0.03 (seg)
on_period_arrival_dist	Constant	2 (seg)
off_period_dist	Exponential	2 (seg)
pksize_dist	Constant	54 (bytes)

Tabla 5.4 – Parámetros para una simulación con ráfagas de transmisión de dos segundos.

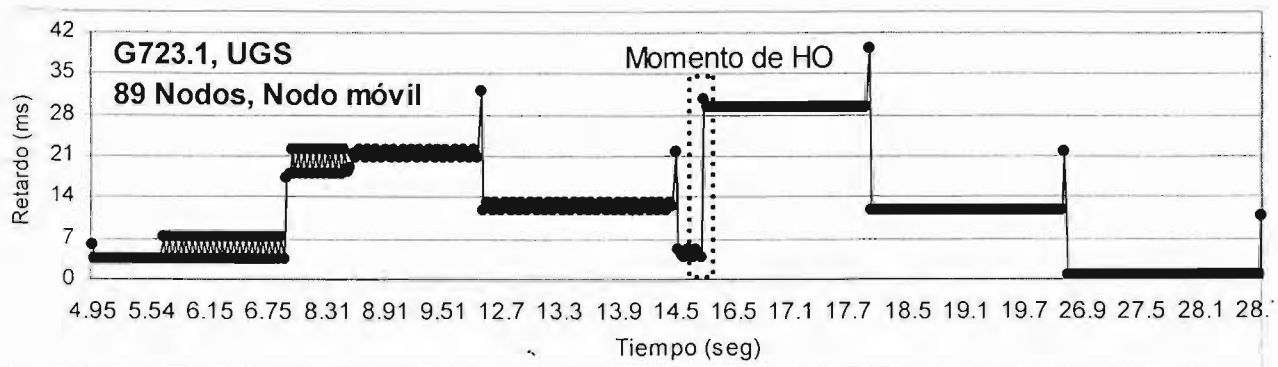


Figura 5.37 – Retardos por un MSS que ejecuta el procedimiento de *handoff*, transmitiendo en ráfagas de 2 segundos⁴.

Como era de esperarse, después de ejecutar el procedimiento de HO (segundo 16.16) los paquetes sufren un retardo extra de aproximadamente 30 milisegundos. Sin embargo, este retardo es eliminado cuando el MSS es reprogramado para transmitir durante las siguientes ráfagas de datos.

⁴ Nota: Esta gráfica no es continua en el tiempo.

5.6 CONCLUSIONES

El procedimiento de *handoff* modelado en este capítulo, es satisfactorio de acuerdo a los objetivos trazados en un principio. Se ha demostrado mediante simulaciones confiables, que un cambio rápido de conexión entre estaciones base se puede lograr de acuerdo con la QoS requerida.

En el caso de servicio **best effort**, los retardos por *handoff* varían de acuerdo con la densidad de nodos en la estación base donde el MSS está operando. De tal forma que en una red muy saturada, el cambio de conexión entre estaciones base resultará lenta, pero un MSS que está operando bajo estas condiciones, no puede exigir (y hasta resultaría sobrado) un proceso de *handoff* con retardo muy pequeños. En las gráficas donde se muestra el retardo de los paquetes durante un tiempo muy largo, el retardo por proceso de *handoff* no se distingue de un retardo común.

Cuando contamos con un servicio UGS, los retardos por proceso de *handoff* se han logrado mantener por debajo de los 50 ms. Si bien, en un principio teníamos un aumento fijo de 30 ms debido al proceso de *handoff*, se demostró que se pueden utilizar varios métodos para evitarlo.

Tanto en **best effort** como en UGS, se debe evitar que el proceso de *handoff* se realice hacia una estación base que se encuentre a su máxima capacidad, de lo contrario el proceso de *handoff* pudiera no completarse, dejar al MSS en malos términos con la nueva estación base o incluso, desestabilizar a los demás nodos. Por esto, las estaciones base deben contar con técnicas de control de admisión.

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES

6.1 INTRODUCCIÓN

A lo largo de la historia, se ha demostrado que la sociedad está constantemente evolucionando, aunque nunca antes, a una velocidad como la actual. La ciencia y la tecnología tienen que mantenerse a la par de las exigencias, y las telecomunicaciones están jugando un papel importante dentro de este cambio. Nunca antes, la economía de un país, el crecimiento de las empresas, la prevención de desastres naturales o la vida cotidiana en general, había dependido tanto de mantener una forma de comunicación entre los bandos implicados.

El estándar IEEE 802.16, ha surgido casi de forma natural como una alternativa a las grandes demandas en telecomunicaciones. IEEE 802.16 se ajusta a las exigencias modernas, tiene facilidad de crecimiento y de implementación, soporta datos multimedia, QoS, telefonía (VoIP), teleconferencias, transporte independiente del protocolo utilizado (Ethernet, ATM, IP, TCP, etcétera), utiliza lo último en técnicas de modulación, modulación adaptativa, etcétera. Todo esto mediante una conexión inalámbrica.

El trabajo presente colabora a los esfuerzos por situar al estándar IEEE 802.16 como una tecnología de vanguardia, al hacer propuestas y proponer soluciones contra los obstáculos que implica la movilidad.

Esta tesis está enfocada en el procedimiento de *handoff* (cambio de conexión entre dos estaciones base) y demuestra que se cuenta con los elementos necesarios para mantener la comunicación dentro de los parámetros exigidos durante el cambio de conexión, al mismo tiempo que se cumplen las exigencias citadas por el grupo de trabajo *IEEE 802.16e*, encargado de estudiar y establecer las propuestas de movilidad sobre dicho estándar, la cuales se mencionan a continuación:

- 1) Soportar usuarios móviles a velocidades de automóvil.
- 2) Soportar también a los anteriores usuarios fijos (802.16a), sin que estos tengan que sufrir modificaciones.
- 3) Soportar *Handoff* entre las estaciones base o entre sectores definidos.
- 4) Limitarse a bandas con licencia ideales para movilidad, en el rango de [2-6] GHz.

6.2 RESULTADOS

Se ha desarrollado una propuesta de *handoff* funcional, que ha sido probada bajo dos formas distintas de operación: UGS y BE. Y con dos formas distintas de tráfico: Internet y VoIP de acuerdo a las especificaciones del codec G723.1.

En lo que a tráfico de Internet con un servicio BE respecta, se ha obtenido que el tiempo de ejecución de *handoff*, varía de forma directamente proporcional al número de usuarios en operación, ya que a mayor cantidad de usuarios, mayor número de colisiones y por lo tanto, mayores retardos. Lo mismo sucede para el caso de VoIP sobre BE.

Si consideramos que BE está diseñado precisamente para usuarios cuyos servicios no son exigentes, entonces se ha cumplido el objetivo de desarrollar un mecanismo de *handoff* que no necesita consumir recursos innecesarios, para un servicio que no lo necesita.

Para el caso de una QoS de tipo UGS, donde se probaron lo mecanismo de *handoff* con un servicio de VoIP, se ha demostrado que se pueden cumplir con las exigencia de retardo, al no sobrepasar los 50 ms de tiempo, con lo que canceladores de eco, no serán una necesidad.

Por otro lado, es cierto que la posibilidad de perder un paquete durante el cambio de conexión entre las estaciones base es grande, sin embargo, podemos prescindir perfectamente de un solo paquete sin notar una degradación en la calidad de la conexión.

A pesar de esto, se probó un mecanismo de *handoff* donde se asigna al usuario, los *slots* necesarios para que no pierda uno solo de los paquetes durante el cambio de conexión, aunque esto implica por supuesto, el consumo momentáneo del doble de ancho de banda por parte del MSS.

El procedimiento de *handoff* desarrollado en esta tesis, no está ligado a servicios de VoIP con el codec G723.1 cuando hablamos de un servicio de QoS de UGS, ya que la reservación de *slots* es independiente del mismo. Por lo que cualquier aplicación distinta a VoIP, que trabaje bajo este mecanismo de UGS, también tiene garantizada un mecanismo de *handoff* con la eficiencia que se ha demostrado para el codec G723.1.

6.3 TRABAJOS A SEGUIR

En la última versión del estándar IEEE 802.16-2004 [24], puede verse un apartado para implementación de OFDM (Multiplexaje por División de Frecuencias ortogonales) y OFDMA (Acceso Múltiple por División de Frecuencias Ortogonales). A su vez, en [62] pueden verse propuestas de OFDM y OFDMA enfocados a movilidad.

La implementación de estas técnicas, debe suponer mejoras dentro del mecanismo de *handoff*. Por ejemplo, cambiar de código en lugar de cambiar de canal de frecuencia durante el cambio de conexión entre dos estaciones base, o la búsqueda de *beacons* sin necesidad de conmutar entre frecuencias, o la distancia de cobertura que también debe mostrar mejoras al utilizar canales de transmisión más angostos que introduzcan menos ruido, entre otros beneficios más.

Por lo tanto, un análisis riguroso de procedimientos de *handoff* utilizando OFDM y OFDMA como técnicas de acceso, deberá realizarse, y así, poder conocer las bondades que con esto, se puedan reportar.

O bien, por otro lado tenemos que el estándar IEEE802.16 maneja 4 tipos diferentes de calidad y servicio, que va de acuerdo con el servicio que el usuario necesita. Estos niveles son: UGS (Unsolicited

Grant Service), rtPS (Real Time Polling Service), nrtPS (Non Real Time Polling Service) y BE (Best Effort) como se definen más detalladamente en el capítulo 3.

La propuesta de esta tesis se basa en la implementación de un mecanismo personalizado de *handoff* por cada nivel de calidad y servicio, ya que existe una estrecha relación entre la complejidad del sistema, la rapidez, y la cantidad de recursos que se consumen al ejecutar un cambio de conexión.

Las simulaciones se hicieron con los niveles de calidad y servicio extremos, es decir, UGS (el más exigente de los cuatro) y BE (el menos exigente de los cuatro).

Aunque ya se demostró que este mecanismo funciona para el caso más exigente, queda la posibilidad de adaptar y medir el desempeño de mecanismos de *handoff*, en los dos niveles de calidad y servicio restantes.

Finalmente, este modelo de simulación solo incluye las capas MAC y física dentro del estándar IEEE 802.16. Si bien, se consideraron los encabezados que cada una de las capas superiores agrega, no se modeló realmente el comportamiento de las mismas. Una implementación considerando el comportamiento de las capas superiores como TCP sería otra línea de investigación interesante. De esta forma, se podría analizar distintas aplicaciones como TELNET, TFP (File Transfer Protocol), HTTP (Hyper Text Transfer Protocol), DNS (Domain Name System), SMTP (Simple Mail Transfer Protocol), NFS (Network File System), etcétera.

REFERENCIAS

- [1] Arunachalam, A., "Global standardization Effort of BWA Based on Cable Modem", Emerging technologies symposium: broadband, wireless Internet access, pp. 1-4, 2000
- [2] Bernhard H. Walke, "Mobile Radio Networks, Networking Protocols and Traffic Performance", John Wiley and Sons, Ltd., Second Edition, ISBN 0471 49902 1, 2002
- [3] Bhagavath, V. K., "Emerging high-speed xDSL access services: architectures, issues, insights, and implications", IEEE Communications Magazine, Vol. 37, Issue 11, pp. 106-114, Nov. 1999
- [4] Bolcskel, H., Paulraj, A.J., Hari, K.V.S., Nabar, R.U., LU, W.W., "Fixed broadband wireless access: state of the art, challenges, and future directions," IEEE Communication Magazine, vol. 39, pp. 106-107, Jan. 2001
- [5] Campbell T. Andrew, Gomez Javier, Kim Sanghyo, Wan Chieh-Yih., "Comparison of IP Micromobility Protocols", IEEE Wireless Communications, Vol. 9, Issue 1, pp. 72-82, Feb. 2002
- [6] Changhoi, Koo., Sohyun, Kim., Jungje, Son., "Inter-BS communication for IEEE 802.16e Handoff," project: IEEE 802.16 Broadband Wireless Access Working Group, document "IEEE C802.16e03/29r1", may 2003
- [7] Clark, Martin P. "ATM networks: principles and use", J. Wiley, ISBN 0471967017, 1996
- [8] Row, B.P., Widjaja, L., Kim, L.G., Sakai, P.T., "IEEE 802.11 wireless local area network", IEEE Communications magazine, Vol. 40, Issue 9, pp. 116-126, Sept. 1997
- [9] Danesh, M., Zuniga, J. C., Concilio, F., "Fixed low-frequency Broadband Wireless Access Radio Systems," IEEE Communication Magazine, Vol. 39, Issue 9, pp. 134-138, Sept. 2001
- [10] Utta-Roy, A., "An overview of cable modem technology and market perspectives", IEEE Communications Magazine, Vol. 39, Issue 6, pp. 81-88, June 2001
- [11] Ehrlich, N., "The Advanced Mobile Phone Service", IEEE Communication Magazine, Vol. 17, Issue 2, pp. 9-16, March 1979
- [12] ElGebaly, H., "Characterization of multimedia stream of an H.323 terminal," Intel Technology Journal, Vol. Q2, 1998.
- [13] ETSI ES 200 800, "Digital video broadcasting: Interaction channel for cable TV distribution systems (CATV)," ETSI, version 1.3.1, October 2001
- [14] ETSI ES 200 800 v.1.2.1, "Digital Video Broadcasting: Interaction Channel for cable TV Distribution System (CATV)", ETSI, Apr. 2000

-
- [15] Fazel, K., Decanis, C., Klein, J., Licitra, G., Lindh, L., Lebret, Y.Y., "An overview of the ETSI-BRAN Hiperaccess physical layer air interface specification," The 13th IEEE International Symposium on, Vol. 1, pp. 49-53, Sept. 2002
- [16] Ferrer, C., Oliver, M., "Overview and capacity of the GPRS (General Packet Radio Service)", Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, The ninth IEE International Symposium on, Vol. 1, pp 106-110, 8-11 Sept. 1998
- [17] Fish, Roger, "DOCSIS Cable Modem Service Overview," Consumer Electronics, ICCE, Digest of Technical Paper. International Conference on, pp. 77-77, June 2000
- [18] Gagnaire, M., "An overview of broad-band access technologies," proceeding of the IEEE, Vol. 85, pp. 1958-1972, Dec. 1997
- [19] Hamling, C., "An overview of GSM data services", Roaming with Data, IEE Colloquium on, pp. 2/1-2/8, 6 Mar 1995
- [20] Hawa, M., Petr, D. W., "Quality of service scheduling in cable and broadband wireless access system," Quality of Service, 2002. Tenth IEEE International Workshop on, pp. 247-255, 15-17 May. 2002
- [21] Hsu, John, Y., "Computer networks: architecture, protocols and software", Arthec House, ISBN 0890068526, 1996
- [22] IEEE 802.14 14/95-061R2, "Evaluation models for digital bi-directional IEEE 802.14 MAC protocol," IEEE 802.14 subcommittee, Jan. 1996
- [23] IEEE Std 802.16TM-2001, "IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks. Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems" The Institute of Electrical and Electronic Engineers, 6 December 2001
- [24] IEEE Std 802.16TM-2004 "Part 16: Air interface for Fixed Broadband Wireless Access System", The Institute of Electrical and Electronic Engineers, 1 October 2004
- [25] IEEE Std 802.16aTM-2003 "Part 16: Air interface for Fixed Broadband Wireless Access System - amendment 2: Medium Access Control Modifications and Additional Physical Layer Specifications for 2-11 Ghz", The Institute of Electrical and Electronic Engineers, Inc., 1 April 2003
- [26] IEEE Std 802.16.2TM-2004 "Coexistence of Fixed broadband Wireless Access System", The Institute of Electrical and Electronic Engineers, Inc., 17 March 2004
- [27] IEEE 802.16-02/48r4 "Amendment to IEEE standard for local and Metropolitan Area Network - Parts 16: Interface for Fixed and Mobile Broadband Wireless Access Systems - Amendment for Physical and Medium Access Control Layer for Combined Fixed and Mobile Operation in Licensed Bands", IEEE 802.16 Working Group on Broadband Wireless Access.

-
- [28] ITU-T Recommendation G.723.1, "Speech coders: Dual rate speech coder multimedia communications transmitting at 5.3 and 6.3 Kbits/s," ITU-T, 1996
- [29] Itzik, Kitroser., "Handoff/Sleep-mode changes," project: IEEE 802.16 Broadband Wireless Access Working Group, document "IEEE C802.16e-03/34, July 14 2003
- [30] Itzik, Kitroser., "IEEE 802.16e Handoff draft," project: IEEE 802.16 Broadband Wireless Access Working Group, document "IEEE C802.16e-03/20r1, Mar. 2003
- [31] Itzik, Kitroser., Yossi, Segal., Yigal, Leibal., Zion, Hadad., "IEEE 802.16e Mobility Enhancement," project: IEEE 802.16 Broadband Wireless Access Working Group, document "IEEE C802.16e03/05", Jan. 2003
- [32] Joachim, Tisal, "GSM Cellular Radio Telephony", John Wiley & Sons, ISBN 0 471 96826 9, 1997
- [33] Jordan, R., Abdallah, C. T., "Wireless communications and networking: an overview", IEEE Antennas and propagation magazine, Vol. 44, Issue 1, pp. 185-193, Feb. 2002
- [34] Kar, M., White, G., "DOCSIS™ 2.0 – The next revolution in cable modem technology," Consumer Electronics, ICCE. Digest of Technical Papers. International Conference on, pp. 152-153, 18-20 Jun. 2002
- [35] Kos, T., Zovko-Cihlar, B., Grgic, S., "New services over CATV network", EUROCON'2001, Trends in communication, International Conference on. Vol. 2, pp. 442-445, 4-7 July 2001
- [36] Kriaris, I., "Third Generation Mobile Network Architectures for the Universal Mobile Telecommunications System (UMTS)," Bell labs Technical Journal, pp. 99-117, Summer 1997
- [37] McNair, J., Akyildiz, I. F., Bender, M. D., "An inter-system handoff technique for the IMT-2000 system," INFOCOM 2000. Nineteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies, proceedings, IEEE. Vol. 1, pp. 208-216, 26-30 March 2000
- [38] Mohammad A. Tahman, "Guide to ATM system and technology", Artech House, Inc, ISBN 0890063060, 1998
- [39] Padovan, N., Ryan, M., Godara, L., "An overview of third generation mobile communications system: IMT-2000," TENCON '98. 1998 IEEE Region 10 International Conference on Global Connectivity in Energy, Computer, Communication and Control, Vol. 2, pp. 360-364, 17-19 Dec. 1998
- [40] Perkins, Charles E., "Mobile IP" IEEE Communications magazine, Vol. 40, Issue 5, pp. 66-82, May 2002
- [41] Perkins, C. E., "Mobile IPv6 and seamless Mobility," project: IEEE 802.16 Broadband Wireless Access Working Group, document "IEEE C802.16e-03/11", Jan. 2003
-

-
- [42] Prasad, N. R., "GSM evolution towards third generation UMTS/IMT 2000", Personal Wireless Communication, 1999 IEEE International Conference on, pp 50-54, 1999
- [43] R. W. Dobinson, M. Dobson, S. Haas, B. Martin, M. J. LeVince and F. Saka, "IEEE 802.3 Ethernet, current status and future prospects at the LHC", Nuclear Science Symposium Conference Record, IEEE Vol. 3, pp. 26/7-2613, 2000
- [44] Rangel, V., "Performance Evaluation and Optimisation of the DVB/DAVIC Cable Modem Protocol", Ph. D. Dissertation, The University of Sheffield, June 2002
- [45] Rangel, V., Edwards, R., "Performance analysis and optimization of the digital video broadcasting/digital audio visual council cable modem protocol for the delivery of isochronous stream", Global telecommunications conference, GLOBECOM '01 IEEE, Vol. 1, pp. 430-434, 2001
- [46] Raychaudhury, Dipankar., "Wireless ATM networks: architecture, system design and prototyping", IEEE personal communications, Vol. 3, Issue 4, pp. 42-49, August 1996
- [47] Richardson, K. W., "UMTS overview", Electronic & Communication Engineering Journal, Vol. 12, Issue 3, pp. 93-100, June 2003
- [48] Sdralia, V., Holcombe, M., "Ranging Schemes for Fast Dynamic Recovery of DOCSIS Networks", Proceeding Ninth IEEE International conference on. pp. 154-159, 10-12 October 2001
- [49] Sdralia, V., Tzerefos, Polychris., Smythe Colin., "Recovery Analysis of the DOCSIS Protocol After Service Disruption", Broadcasting, IEEE transaction on, Vol. 47, Issue 4, pp. 337-385, Dec. 2001
- [50] Smythe, C., Basso, C., Hartley, S., Tzerefos, P., Cvetkovic, S., "Standards for interactive multimedia delivery across CATV infrastructures", Broadcasting convention, International, pp. 43-48, 12-16 Sept. 1997
- [51] SP-RFIV1.1-I01-990311, "Data Over Cable Service Interface Specifications. Radio Frequency Interface Specifications", Cable Television Laboratories, Inc. 11 March 1999
- [52] Spencer, N., "An overview of digital telephony standards", The Design of Digital Cellular Handset (Ref. No. 1998/240), IEE Colloquium on, pp. 1/1-1/7, 4 March 1998
- [53] S. Bregni, "A historical perspective on telecommunications network synchronization", IEEE Communications Magazine, Vol. 36, Issue 6, pp. 158-166, Jun. 1998
- [54] Thomas Sheldon, "Novell Netware: The complete reference", McGraw Hill, ISBN 0-07-9881594-0, c 1990
- [55] Vladimir, Yanover., "Handover in 802.16e MAC," project: IEEE 802.16 Broadband Wireless Access Working Group, document "IEEE C802.16e03/01", Jan. 2003
-

PÁGINAS WEB

- [56] The ATM Forum., "<http://www.atmforum.org>"
- [57] Cable labs., "<http://www.cablemodem.com>"
- [58] European Conference of Postal and Telecommunications Administrations o Conférence Européenne des Postes et Télécommunications "<http://www.cept.org>"
- [59] European Telecommunications Standards Institute., <http://www.etsi.org>"
- [60] Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., "<http://www.ieee.org>"
- [61] Amendment to IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks - Part 16: Air Interface for Fixed and Mobile Broadband Wireless Access Systems - Amendment for Physical and Medium Access Control Layers for Combined Fixed and Mobile Operation in Licensed Bands., "http://www.ieee802.org/16/docs/02/80216-02_48r4.pdf"
- [62] IEEE 802.16 Task Group e (Mobile WirelessMAN ®)., "<http://www.ieee802.org/16/tge/index.html>"
- [63] IEEE 802.16 Task Group e: Mobility., "<http://www.ieee802.org/16/mobile/index.html>"
- [64] International Telecommunications Union., "<http://www.itu.int/home/index.html>"
- [65] OPNET MODELER., "<http://www.opnet.com/products/modeler/home.html>"
- [66] Wavesat., "<http://www.wavesat.com>"
- [67] WiMAX forum., "<http://www.wimaxforum.org>"
- [68] Wi-Fi Alliance., "<http://www.wi-fi.org>"

APÉNDICE A

GLOSARIO

BACKBONE:	Red diseñada para interconectar canales de distribución de menor velocidad, dispositivos, o usuarios dispersos.
Bandwidth stealing:	El uso por parte de un SS o MSS, de una porción del ancho de banda que se le cedió como respuesta a una petición de ancho de banda para enviar otra solicitud de ancho de banda en lugar de enviar datos.
BE:	Best Effort (sección 3.4.4).
Beacons:	Avisos que son constantemente enviados en modo broadcast por una BS, para notificar de su presencia. Estos avisos pueden contener información relativa a la configuración de la BS o de la red.
BER:	Del inglés "Bit Error Rate", relación de bit por error.
BRAN:	Broadband Radio Access Networks
BS:	Base station (Estación base). *
BWA:	Broadband Wireless Access (Redes de acceso inalámbrico de banda ancha).
CDMA:	Code Division Multiple Access (Acceso Múltiple por división de código).
CID:	Connection Identifier. Cada conexión tiene un CID único asociado.
CM:	Cable MODEM **
CMTS:	Cable MODEM Termination System. **
CPE:	Customer Premises Equipment (Equipo que pertenece al usuario final). **
CRC:	Cyclic Redundancy Check.
CSMA:	Carrier Sense Multiple Access (Acceso Múltiple por Censado de Portadora).
DAMA:	Demand Assigned Multiple Access. (Acceso Múltiple por Asignación de Demanda).
Data Grant:	Tiempo de transmisión que el CMTS le asigna a un CM para que éste pueda transmitir datos.
DL:	Downlink (enlace de bajada -hacia el subscriber-).
DL-MAP:	Downlink MAP message. Mensaje donde se define el uso del DL.
DOCSIS:	Data Over Cable Service Interface Specification [17].
Downlink:	Canal que utiliza una BS para comunicarse con un SS. *
Downstream:	Canal que utiliza la central para comunicarse con los usuarios. **
ETSI:	European Telecommunications Standards Institute [59].
ETSI BRAN:	Broadband Radio Access Network [24].
FDD:	Frequency Division Duplexing (Duplexaje por División de Frecuencias).
FDMA:	Frequency Division Multiple Access (Acceso múltiple por división de frecuencia).
FEC:	Forward Error Correction (técnica para corrección de errores).
FITL:	Fiber In The Loop. Redes de fibra óptica que proveen servicios de banda ancha que incluye FTTB, FTTC, y FTTH.
Fragmentación:	Permite partir un paquete grande en paquetes pequeños para su transmisión.
F.O.	Fibra Óptica.

GSM:	Global Systems for Mobile Communications.
Handoff	Proceso en el cual una estación móvil emigra de la conexión que le provee una estación base a otra conexión que le proveerá otra estación base.
Header:	Conjunto de bit que preceden un frame, block o paquete y el cual contiene información acerca del mensaje, tal como: dirección, tipo de frame, destino, etc.
HFC:	Hybrid Fiber/Coax. Medio de transmisión bidireccional que usa fibra óptica para llevar la señal desde la central o CMTS, hasta unos nodos de fibra. Y después utiliza cable coaxial para distribuir la señal entre los nodos de fibra y los clientes o CM.
HO:	<i>Handover</i> o <i>Handoff</i> .
IE:	Information element. Componente del mensaje MAP ya sea UL-MAP o DL-MAP que define las asignaciones de tiempo.
IEEE:	Institute of Electrical and Electronics Engineers. [60]
ISDN:	Integrated Service Digital Network.
ITU:	International Telecommunications Union [64].
IP:	Internet Protocol.
MAC:	Médium Access Control (Control de Acceso al Medio).
MAN:	Metropolitan Area Network (Red de área metropolitana).
MAP:	Bandwidth Allocation Map. Mensaje de administración que el CMTS o la BS, utiliza para designar las oportunidades de transmisión a los usuarios.
MODEM:	Combinación de las palabras en inglés MODulator-DEMulator. Dispositivo que modula y demodula señales para transmitir las sobre líneas de comunicación.
MSS:	Mobile Subscriber Station. Se refiere a un nodo, usuario, o SS móvil.
Multicast:	Técnica que permite copiar un paquete de datos, para transmitirlos a un grupo seleccionado de entre todos los posibles destinatarios.
NLOS:	Non Line Of Sight (Que no ocupa línea de vista).
OFDM:	Orthogonal Frequency Division Multiplexing. (Multiplexaje por división de frecuencias ortogonales).
OFDMA:	Orthogonal Frequency Division Multiple Access.
PAN:	Personal Area Network (Red de área personal).
Payload:	Carga útil (generalmente se refiere a los datos).
Piggyback:	Método para solicitar más tiempo de transmisión usando cabeceras extendidas sin necesidad de entrar en contención.
PSTN:	Public Switched Telephone Network (Central telefónica).
QoS:	Quality of Service (Calidad de Servicio).
Ranging	Proceso mediante el cual, los nodos y la BS controlan la calidad del enlace entre ellos.
Slot:	Ranura de tiempo.
SNR o S/N:	Del inglés "Signal to Noise Ratio", relación señal a ruido.
SS:	Del inglés "Subscriber Station", estación subscriptora.
S-CDMA:	Synchronous - Code Division Multiple Access.
TCP:	Transmission Control Protocol.
TDD:	Time Division Duplexing (Duplexaje por División de Tiempo).
TDM:	Time Division Multiplex (Multiplexaje por división de tiempo).
TDMA:	Time Division Multiple Access (Acceso múltiple por división de tiempo).
Tiempo de Backoff:	Tiempo que deja transcurrir un CM o un SS antes de empezar a transmitir. Los protocolos de contención son los que se encargan de establecer estos tiempos.

TLV:	Type Length Value.
UGS:	Unsolicited Grant Service (sección 3.4.4).
UL:	<i>Uplink</i> (enlace de subida -del subscriptor hacia la estación base-).
UL-MAP:	Mensaje MAP en el canal UL.
Uplink:	Canal que utiliza un SS para comunicarse con una BS. *
Upstream:	Canal que utiliza el usuario para comunicarse con la central. **
VoIP:	Voz sobre IP.
WATM:	Wireless ATM.
WAN:	Wide Area Network (Redes de área extraordinariamente muy grande).
WiFi:	Wireless Fidelity.
WiMAX:	Worldwide interoperability for Microwave Access [67].
WMAN:	Wireless MAN.
xDSL:	Se refiere al conjunto de variedades de "Digital Subscriber Line" que incluye: high bit rate DSL (HDSL), asymmetrical digital subscriber line (ADSL), y very high digital subscriber line (VDSL), entre otras más.

* IEEE 802.16

** DOCSIS

APÉNDICE B

ANEXOS SOBRE ANÁLISIS *HANDOFF*

Diagramas de flujo de mensajes en una comunicación inter-BS durante un procedimiento de *handoff* [6].

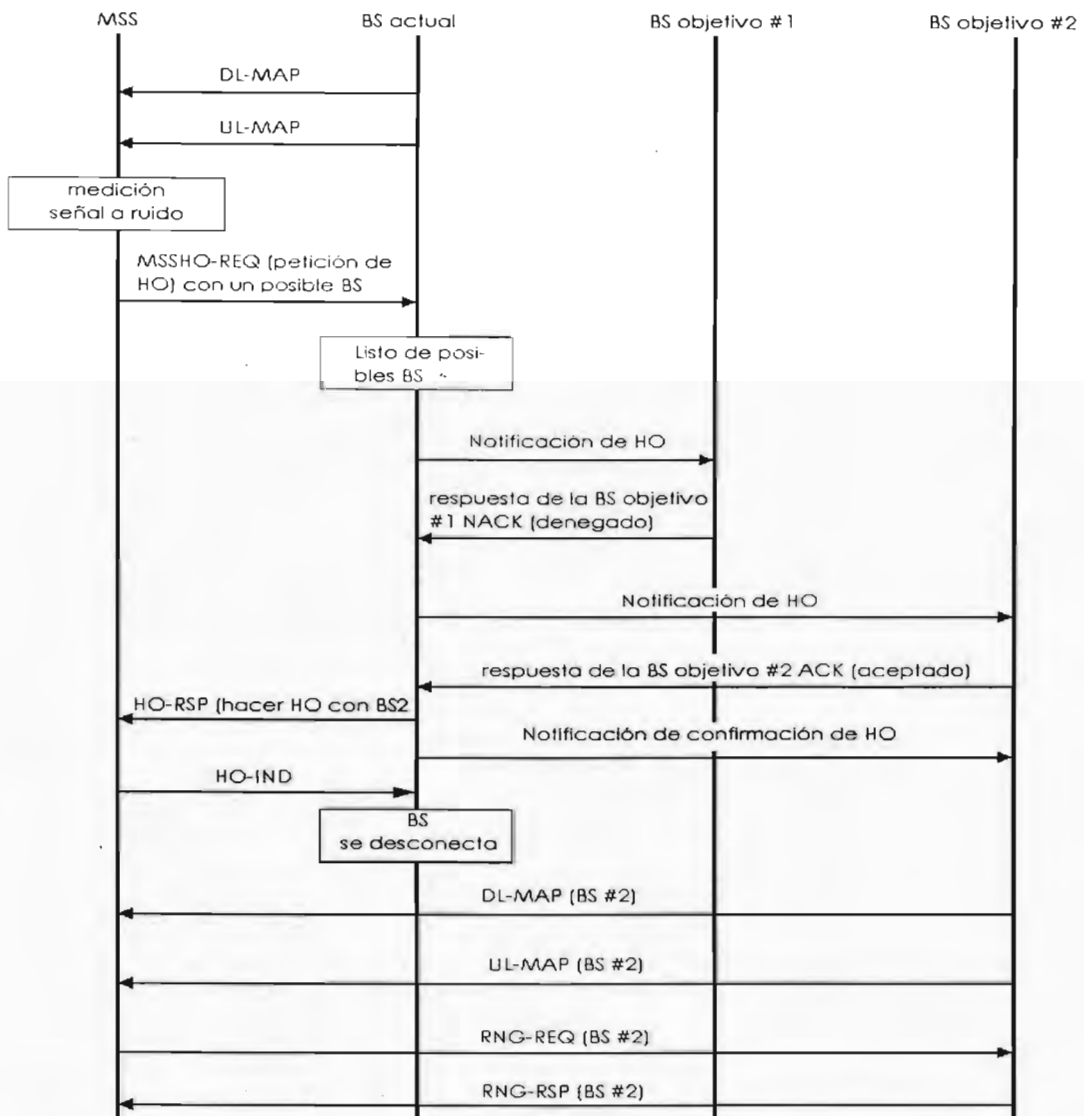


Figura B.1 - Ejemplo del flujo de mensajes inter-BS en un *handoff* iniciado por el MSS.

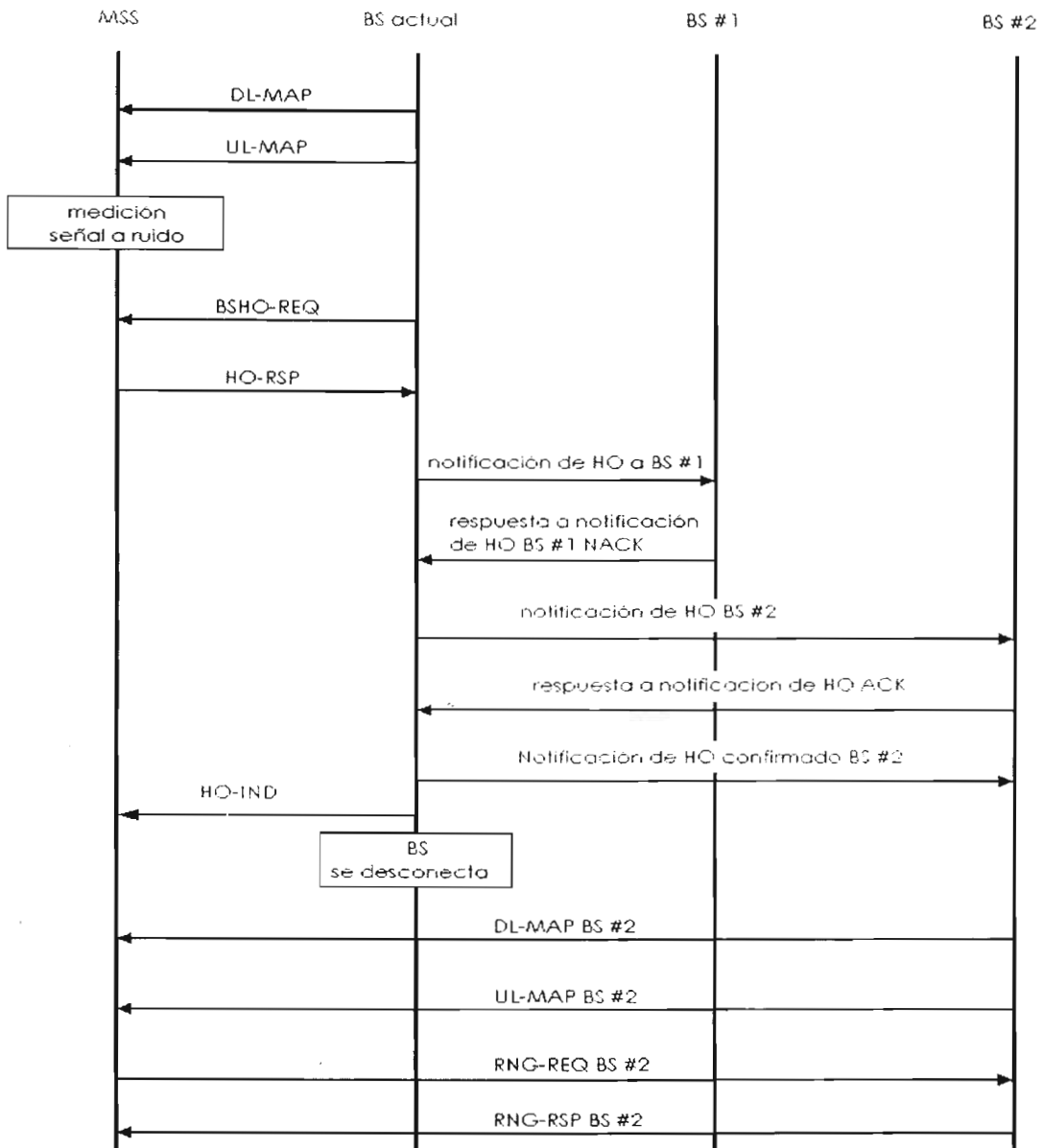


Figura B.2 - Ejemplo del flujo de mensajes de *handoff* activado desde la BS.

Mensajes utilizados en un procedimiento *handoff* tipo “break before make” se acuerdo con [30].

1) Mensajes vecino de aviso (Neighbor advertisement (NBR-ADV) mensaje): Un mensaje NBR-ADV deberá ser transmitido (broadcast) por una BS a intervalos de tiempo para definir las características de las BSs vecinas. Este formato deberá ser codificado en un formato de TLV en el cual los campos de tamaño y tipo son de un byte cada uno. Los parámetros que deberá incluir este mensaje son:

1.- *N_Neighbors*: Número de aviso de estación vecina.

Por cada aviso de estación vecina se deben incluir los siguientes parámetros:

1.1 *Neighbor BS-ID*: Igual que el parámetro de Base Station ID en el mensaje de DL-MAP de las estaciones base vecinas.

1.2 *Configuration Change Count*: Se incrementa en uno (y es módulos 256) cuando cualquiera de los valores relativos a la estación base vecina cambia. Si este valor permanece igual en varios mensajes NBR-ADV consecutivos. El MSS puede rápidamente olvidar la información relativa a la codificación TLV.

1.3 *Physical frequency*: Frecuencia física en múltiplos de 0.1 MHz.

Todos los demás parámetros son codificados como TLV. Entre estos están los mensajes DCD y UCD.

2) Mensaje de petición de tiempo para búsqueda (scanning interval allocation request “SCN-REQ”): Este mensaje puede ser enviado por un MSS para requerir tiempo de búsqueda de estaciones base vecinas y determinar su disponibilidad para realizar un futuro *handoff*. El MSS, debe incluir el tiempo que desea emplear para búsqueda.

3) Scanning information element: Este debe ser colocado en el mensaje DL-MAP por una BS en respuesta a un mensaje SCN-REQ enviado por un MSS. En este se puede denegar la solicitud de búsqueda del MSS. Este mensaje se puede enviar al MSS sin que se le sea solicitado.

4) Ranging Request/Response RNG-REQ/RSP: Un MSS puede usar el mensaje RNG-REQ en el intervalo de búsqueda (scanning interval) para asociarse con una BS vecina.

Se debe especificar el nivel de servicio que se espera, dirección MAC, CID e identificador del *Downlink* con el que está actualmente.

5) Mensaje BS HO Request (BSHO-REQ): enviado por la BS cuando quiere activar un HO. Se debe especificar el tiempo estimado antes de que se ejecute el HO, las BSs recomendadas para el HO, así como sus respectivas identificaciones.

6) Mensaje MSS HO Request (MSSHO-REQ): enviado por el MSS cuando quiere activar un HO. Se debe especificar el tiempo estimado antes de que se ejecute el HO, las BSs recomendadas para el HO, sus respectivas identificaciones y su relación señal a ruido.

7) Mensaje HO Response (HO-RSP): enviado por el MSS o la BS como respuesta a un mensaje *HO-REQ*. Se debe especificar el tiempo estimado antes de que suceda el HO. Las BSs recomendadas para el HO y sus respectivas identificaciones. Cuando sea la BS quien envíe este mensaje, también se debe incluir el nivel con el cual las BSs recomendadas podrían cumplir los requerimientos de QoS.

8) Mensaje HO Indication (HO-IND): Enviado por el MSS para indicar que se ha efectuado el HO.

9) Fast ranging (Paging) information element: Debe ser colocado en el mensaje UL-MAP por la BS para que el MSS pueda ejecutar el procedimiento de ranging sin necesidad de entrar en contención (competencia con otros usuarios).

10) REG-RSP TLVs para una re-conexión: es un anexo al mensaje *REG-RSP* para que se pueda reconocer a un MSS a través de su dirección MAC de una forma un poco más rápida.

APÉNDICE C

MODELO DE PROPAGACIÓN

La potencia de recepción en la BS se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$P_{t_rx} = Pr_dBm - ss_termal_noise - 30 \text{ (dBm)} \quad (C-1)$$

Donde: P_{t_rx} = Potencia de recepción en la BS.
 ss_termal_noise = ruido térmico.

A su vez:

$$Pr_dBm = EIRP + BS_antena_gain - path_loss \quad (C-2)$$

Donde: BS_antena_gain = Ganancia de antena de la BS (dBi).

Para calcular "EIRP":

$$EIRP = SS_antena_gain + P_{tx} \quad (C-3)$$

Donde: SS_antena_gain = Ganancia de antena del nodo (dBi).
 P_{tx} = Potencia de transmisión del nodo (dBm).

Para calcular "path_loss" (perdida por propagación):

$$path_loss = PL_D + shadow_fading \quad (C-4)$$

Donde: $shadow_fading$ = valor aleatorio de una distribución gausseana donde la media y la distribución estándar se toman de la tabla A.1.

Para calcular "PL_D" se utiliza la siguiente ecuación.

$$PL_D = \left(A + 10 \times n \times \text{Log}_{10} \left(\frac{Dist}{Do} \right) + Cf + Ch \right) \quad (C-5)$$

Donde: $Dist$ = Distancia entre el nodo y la BS (metros).
 Do = 100 metros.
 Ch = se toma de la tabla A.1.

El parámetro "A", "n" y "Cf" se calculan de la siguiente manera:

$$A = 20 \times \text{Log}_{10} \left(\frac{4 \times \pi \times D_o}{\lambda} \right) \tag{C-6}$$

Donde: $\lambda = 300\,000\,000 / \text{Frecuencia central (Hz)}$.
 $D_o = 100$ metros.

$$n = a - b \times hr + \frac{c}{hr} \tag{C-7}$$

Donde: "a", "b" y "c" se toman de la tabla A.1.
 $hr = \text{Altura de la antena de la BS (metros)}$.

$$Cf = 6 \times \text{Log}_{10} \left(\frac{fc + BW}{fc} \right) \tag{C-8}$$

Donde: $fc = \text{Frecuencia central (Hz)}$.
 $BW = \text{ancho de banda del canal (Hz)}$.

Parámetros	Categoría A (zonas con muchos obstáculos)	Categoría B (zona media)	Categoría C (zona con pocos obstáculos)
Media	10.6	9.6	8.2
Distribución estándar	2.3	3	1.6
a	3.6	4	4.6
b	0.005	0.0065	0.0075
c	20	17.1	12.6
Ch	-10.7xLog10(ht/2)		-20xLog10(ht/2)

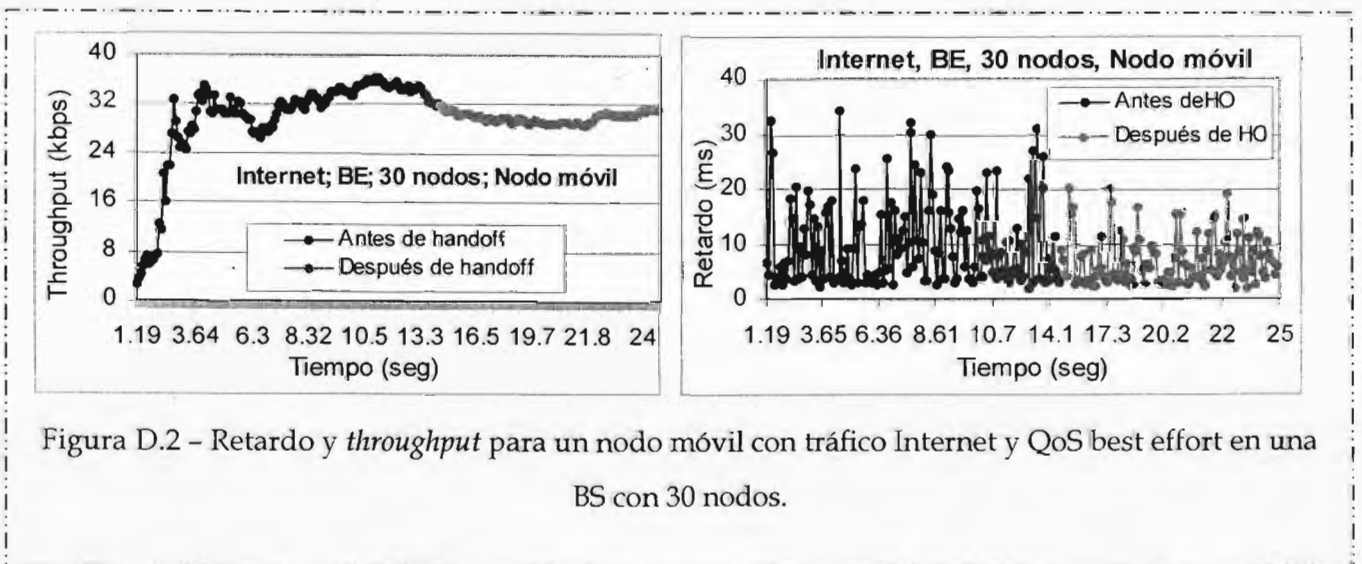
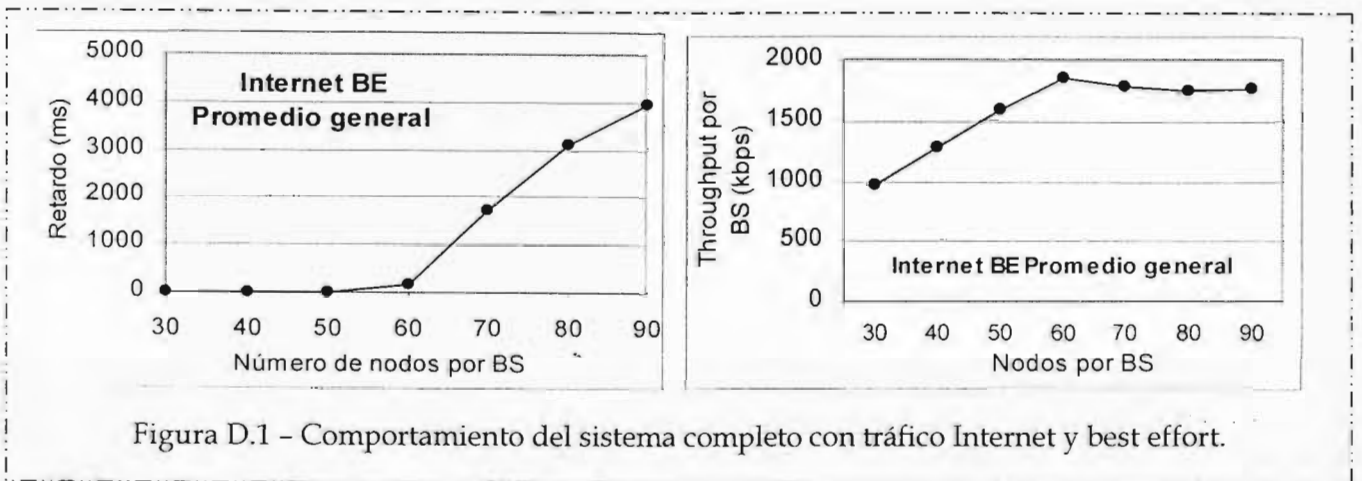
ht = Altura del transmisor del nodo (metros).

Tabla C.1 - Parámetros del modelo de propagación de acuerdo a la categoría del terreno.

APÉNDICE D

GRÁFICAS DE DESEMPEÑO DEL MECANISMO DE HANDOFF PROPUESTO

Nodos con tráfico de tipo Internet (32 kbps) y QoS Best Effort.



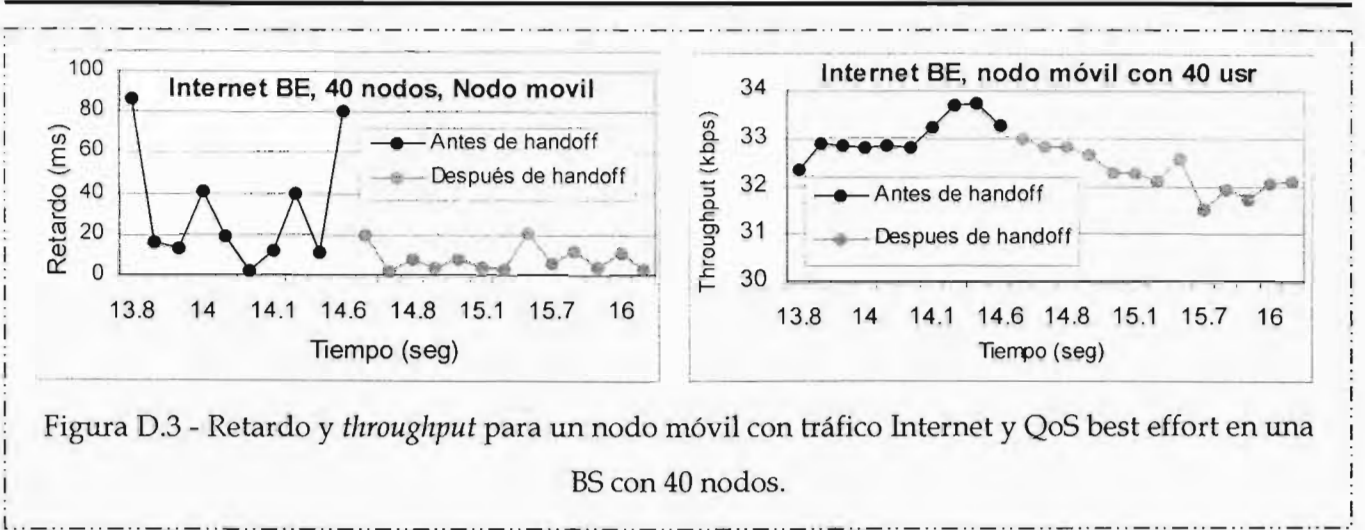


Figura D.3 - Retardo y *throughput* para un nodo móvil con tráfico Internet y QoS best effort en una BS con 40 nodos.

Nodos con tráfico G723.1 y servicio Best Effort.

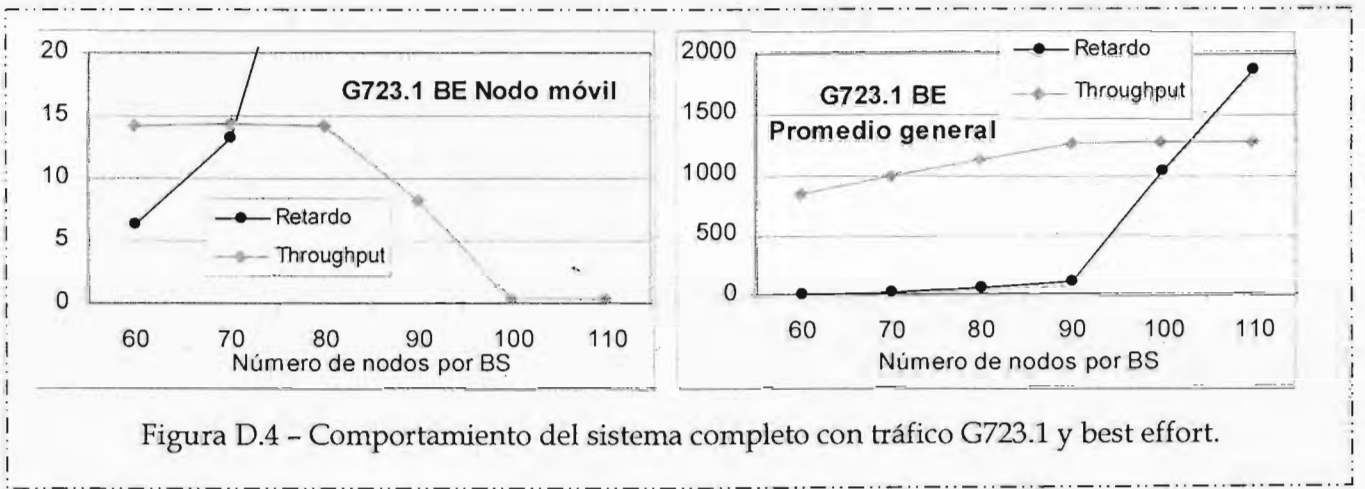


Figura D.4 - Comportamiento del sistema completo con tráfico G723.1 y best effort.

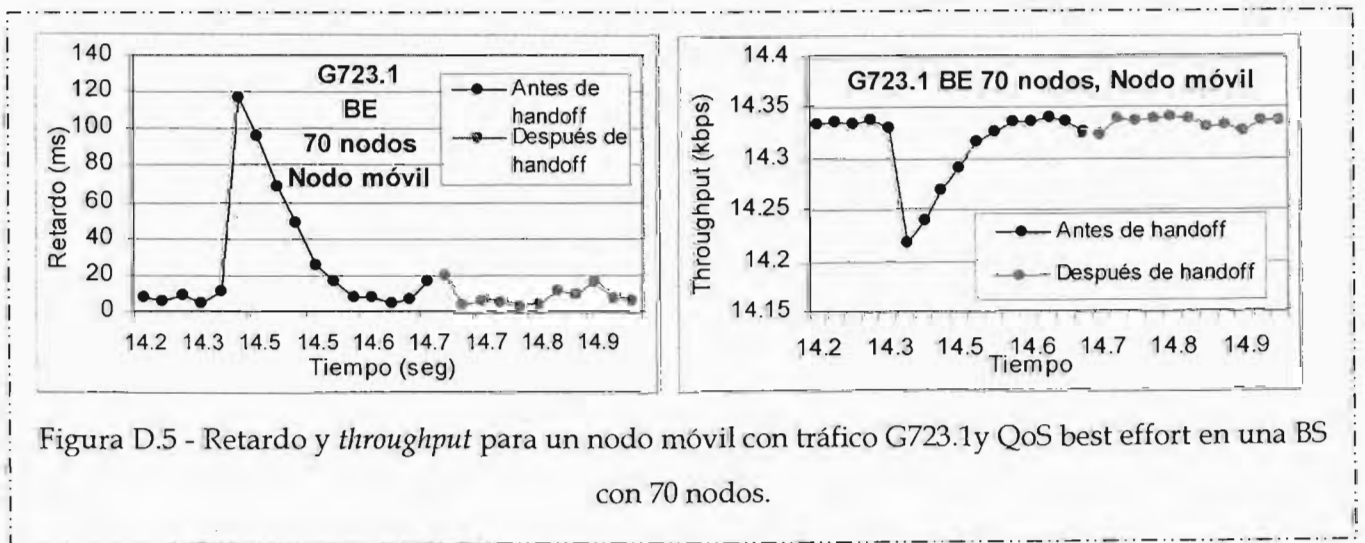
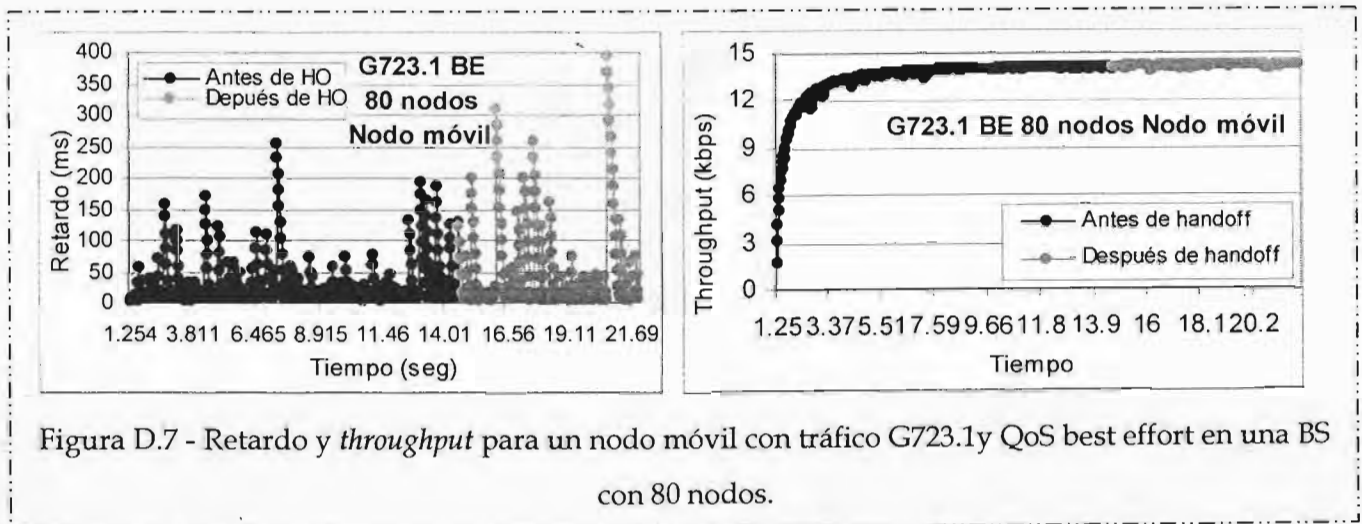
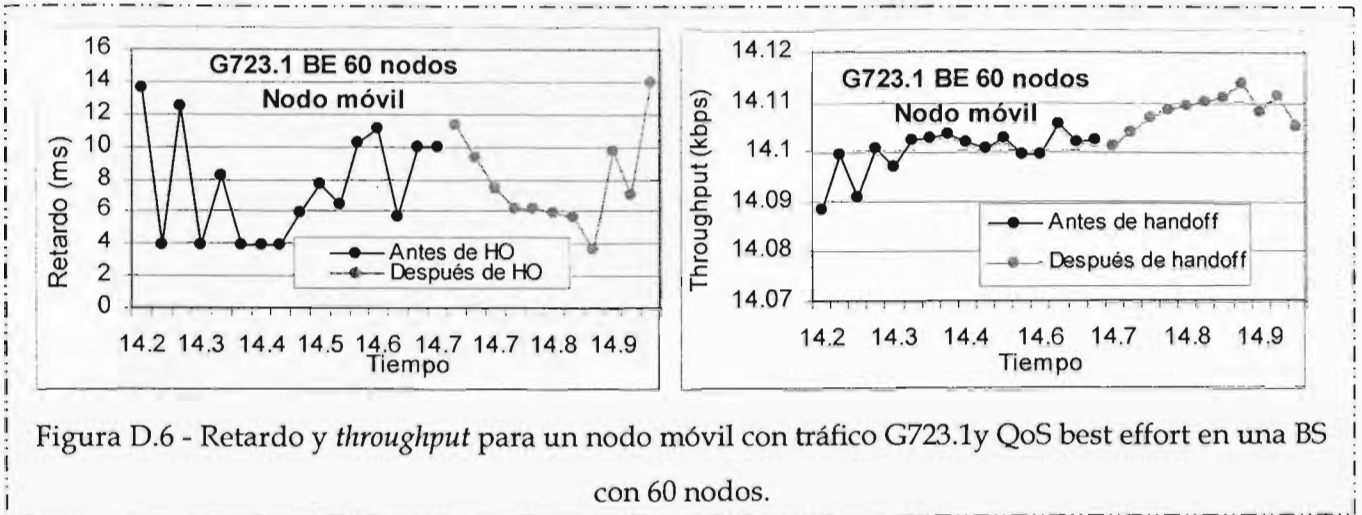


Figura D.5 - Retardo y *throughput* para un nodo móvil con tráfico G723.1 y QoS best effort en una BS con 70 nodos.



Nodos con tráfico G723.1 y servicio UGS, en la modalidad de eliminar los paquetes que se generan durante la etapa de *handoff*.

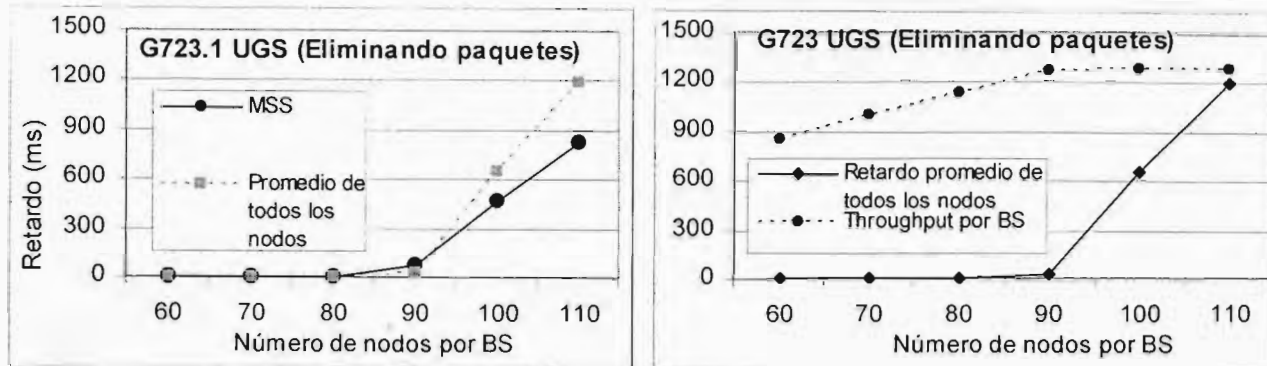


Figura D.8 - Comportamiento del sistema completo con tráfico G723.1 y UGS tirando paquetes.

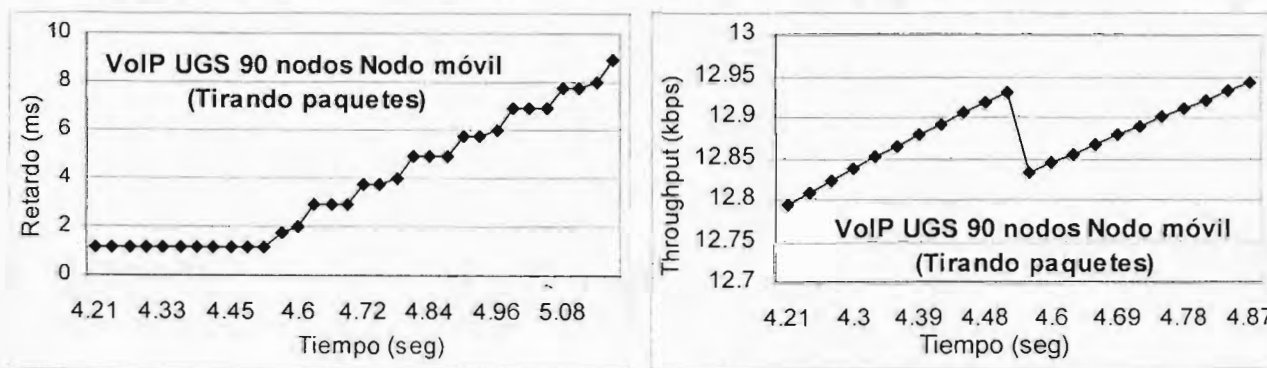


Figura D.9 - Retardo y *throughput* para un nodo móvil con tráfico G723.1y QoS UGS en una BS con 90 nodos que al hacer el *handoff* se satura.

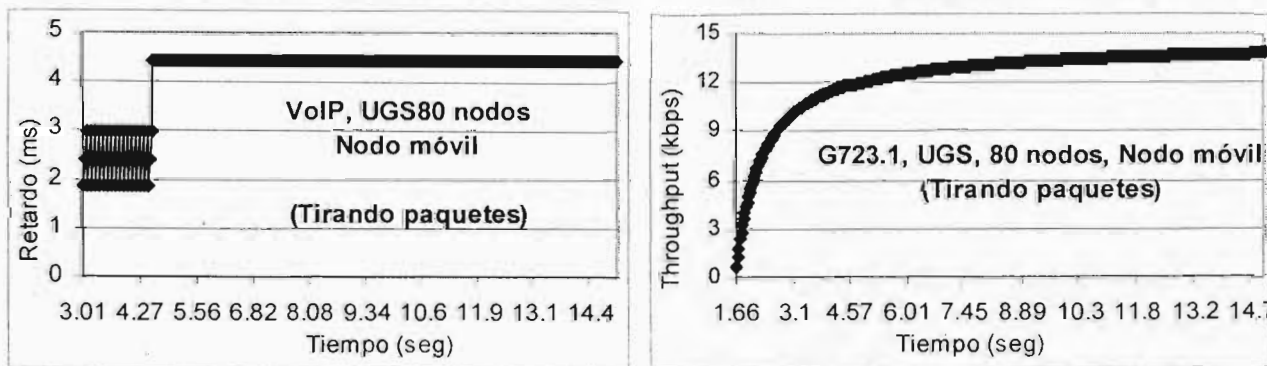


Figura D.10 - Retardo y *throughput* para un nodo móvil con tráfico G723.1y QoS UGS en una BS con 80 nodos.

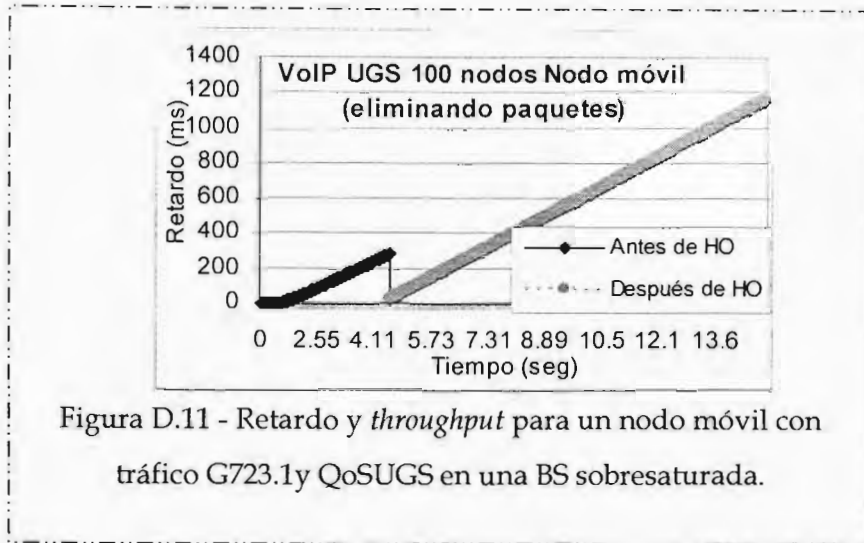


Figura D.11 - Retardo y *throughput* para un nodo móvil con tráfico G723.1y QoSUGS en una BS sobresaturada.

Nodos con tráfico G723.1 y servicio UGS, en la modalidad “asignar más *slots*” para el envío de los paquetes generados durante la etapa de *handoff* (42 *slots* por mapa disponibles).

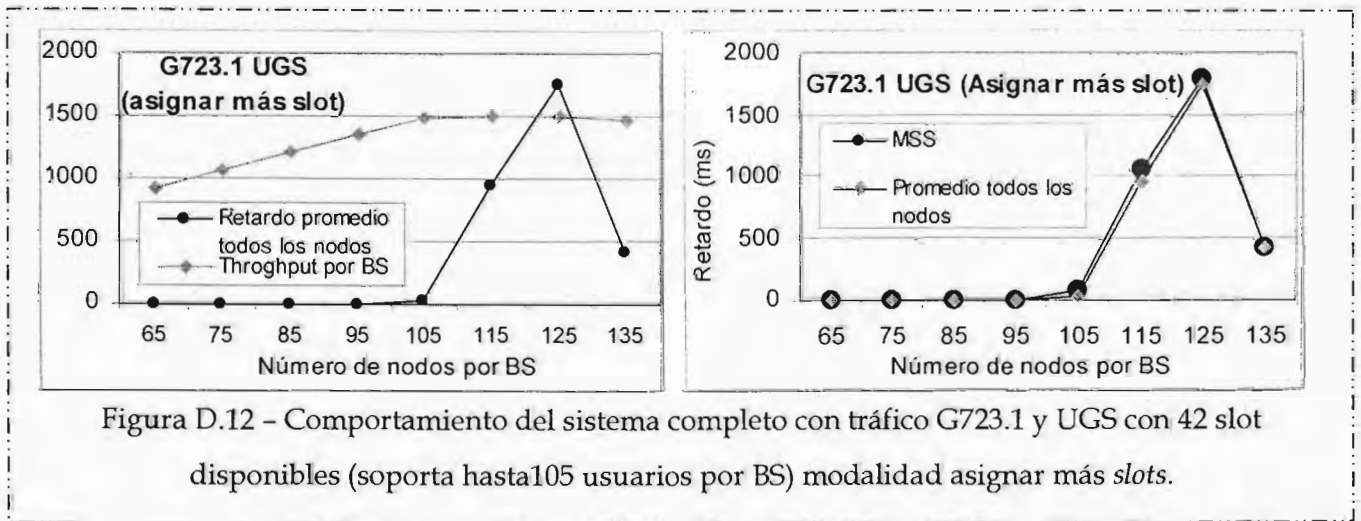


Figura D.12 - Comportamiento del sistema completo con tráfico G723.1 y UGS con 42 slot disponibles (soporta hasta 105 usuarios por BS) modalidad asignar más *slots*.

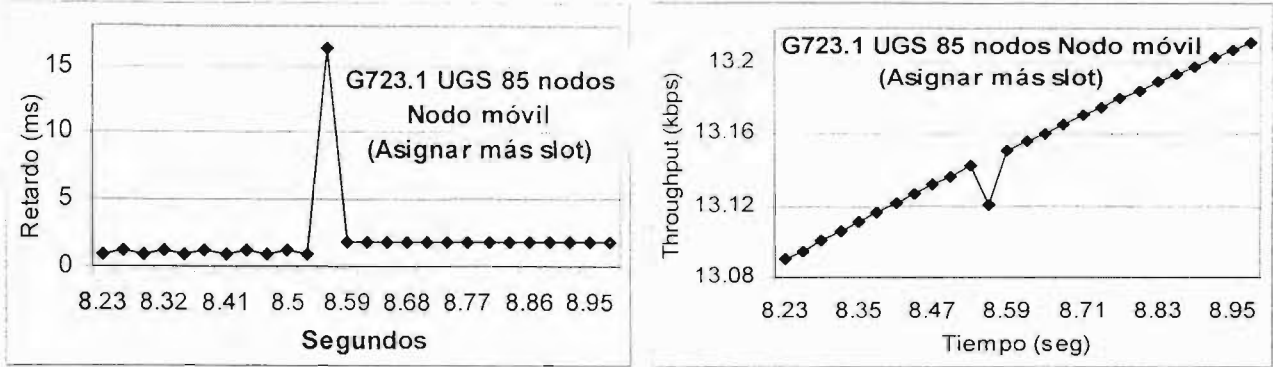


Figura D.13 - Retardo y *throughput* para un nodo móvil con tráfico G723.1y QoS UGS en una BS con 85 nodos.

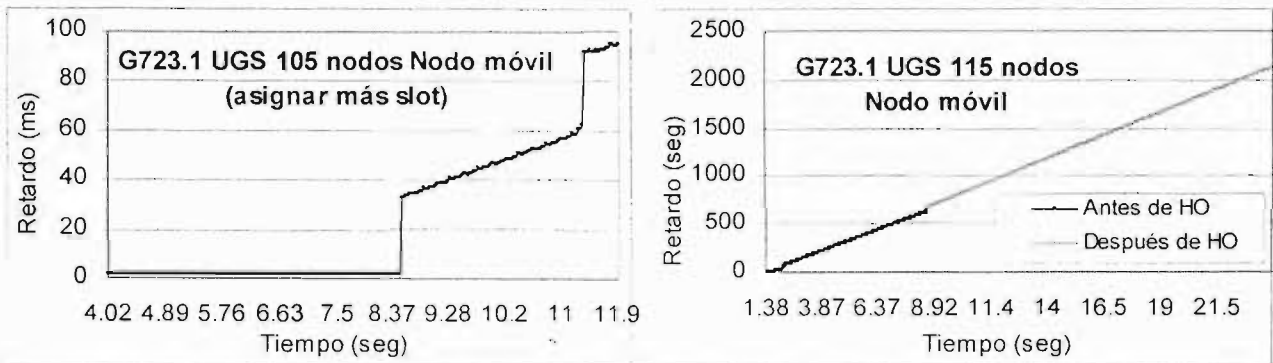


Figura D.14 - Retardo y *throughput* para un nodo móvil con tráfico G723.1y QoS UGS en una BS con que está saturada con 105 nodos.

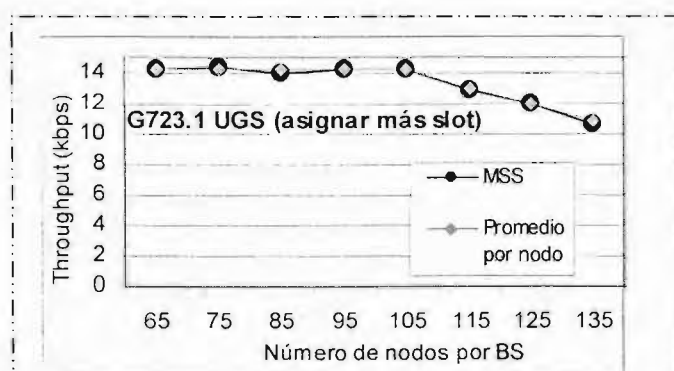


Figura D.15 - Comparación de *throughput* de un nodo móvil con respecto a los demás nodos.

APÉNDICE E

ALGORITMO DE *HANDOFF*

FUNCIONES DENTRO DEL BLOQUE HE_MAC DE LA BS

```
/******  
* Obtain the port attributes for each bs's -UNAM 27 sep 2004- **  
* Revision History **  
* 27 Sep 2004. UNAM -jecg- **  
*****/  
static void Get_BS_I_O_ports(void)  
{  
    FIN (Get_BS_I_O_ports ());  
    if (op_prg_odb_ltrace_active("func_track")) printf("\t\t\t\t\tFUNCTION - Get_BS_I_O_ports \n");  
    switch (parent_id)  
    {  
    case BS1_OBJ_ID:  
        port_in_a = 3; port_in_b = 1; port_out_a = 5; port_out_b = 3; break;  
    case BS2_OBJ_ID:  
        port_in_a = 2; port_in_b = 100; port_out_a = 4; port_out_b = 101; break;  
    case BS3_OBJ_ID:  
        port_in_a = 1; port_in_b = 102; port_out_a = 3; port_out_b = 103; break;  
    } FOUT; }  
  
/******  
* send_HO_BS_REQ() **  
* This function sends a ho message (HO_BS_REQ) to the mobile station that have **  
* poor SNR level to inciate bs change **  
* Revision History **  
* 6 sep 2004. UNAM **  
*****/  
static void send_HO_BS_REQ (int cm_sid, double snr_received)  
{  
    Packet* ho_ind_pkt; Packet* hdr_ptr; int hdr_size;  
    FIN (send_HO_BS_REQ ());  
    if (op_prg_odb_ltrace_active("func_track")) printf("\t\t\t\t\tFUNCTION - send_HO_BS_REQ \n");  
    if (op_prg_odb_ltrace_active("ho_procedure"))  
    {  
        printf("\n\n\t\t\t\t\t*****\n"  
            "\t\t\t\t\tArrive packet to CMTS %d from CM %d with power low %lfn"  
            "\t\t\t\t\tFunction send_HO_BS_REQ has been activated at %lfn"  
            "\t\t\t\t\t*****\n", parent_id, cm_sid, snr_received, time_now); }  
    ho_ind_pkt = op_pk_create_fmt (CMTS_HO_BS_PK_FMT);  
    op_pk_nfd_set (ho_ind_pkt, "MAC MSS", cm_sid); op_pk_total_size_set (ho_ind_pkt, HO_IND_PK_SIZE);  
    hdr_ptr = op_pk_create_fmt (CMTS_MNG_MAC_HD_FMT); op_pk_nfd_set (hdr_ptr, "EHDR_ON", EHDR_OFF);  
    hdr_size = MAC_Header_Base_sz; //7 sep 2044 UNAM  
    op_pk_total_size_set (hdr_ptr, 8 * hdr_size);  
    if (op_prg_odb_ltrace_active ("ho_procedure"))  
    {  
        printf ("\n\n\t\t\t\t\t*****\n"  
            "\t\t\t\t\tCMTS create HO_BS_REQ message. Type %s, Size %d, by BS %d to CM %d At %lfn"  
            "\t\t\t\t\tThe CMTS has reserved 5 slot in maintenance region\n"  
            "\t\t\t\t\t*****\n\n\n",  
            CMTS_HO_BS_PK_FMT, (int)op_pk_total_size_get(ho_ind_pkt), parent_id, cm_sid, time_now); }  
    encap_pkt (ho_ind_pkt, hdr_ptr, cm_sid, CMTS_MSG_TYPE_BS_HO_REQ);  
    max_prop_delay = (2343.6/300000000) + 0.000000355; // (max_dist/light_speed) + t_proc  
    request_indication (cm_sid, 5, IE_TYPE_STATION_MAINT);  
    FOUT; }
```



```

if (op_prg_odb_ltrace_active("ho_procedure"))
{
    printf("\t\t\t*****\n"
           "\t\t\tSending HIO_REQ message by MSS %d at %lf\n"
           "\t\t\t*****\n\n", station_SID, time_now);
    ho_init = 1;
    FOUT; }

/*****
* send_auto_HO_REQ
* This function trigger de HO procces due the service BS
* signal power is low.
* A Ho_req packet should be sent to the child process.
* Revision History
* 29 oct 2004 UNAM (jceg) * Initial Development (no finished)
*****/
static void send_auto_HO_REQ ()
{
    Packet* msg_ptr;
    FIN (send_HO_REQ ());
    if (op_prg_odb_ltrace_active("func_track")) printf("\t\t\tFUNCTION - send_auto_HO_REQ = %s\n", CMTS_HO_PK_FMT);
    if (op_prg_odb_ltrace_active("ho_procedure"))
    {
        printf("\n\n\t\t\t*****\n"
               "\t\t\tThe MSS %d detect low power in the signal from service BS. now is creating a HO_REQ message\n"
               "\t\t\t*****\n\n\n",
               station_SID);
    }
    // * Create HO_REQ (handoff request) message
    station_MAC = station_SID;
    op_ima_sim_attr_get(OPC_IMA_INTEGER, "N_ADV",&n_adv); //warning: n_adv is use in there_arc_good_beacon function.
    op_ima_sim_attr_get(OPC_IMA_INTEGER, "BS1_MAC_ADDRESS",&mac_bs1);
    op_ima_sim_attr_get(OPC_IMA_INTEGER, "BS1_SNR",&snr_bs1);
    op_ima_sim_attr_get(OPC_IMA_INTEGER, "BS1_count_UCD",&ucd_count_bs1);
    op_ima_sim_attr_get(OPC_IMA_INTEGER, "BS1_COUNT_DCD",&dcd_count_bs1);
    op_ima_sim_attr_get(OPC_IMA_INTEGER, "BS1_NET_ID",&net_id_bs1);
    op_ima_sim_attr_get(OPC_IMA_INTEGER, "BS2_MAC_ADDRESS",&mac_bs2);
    op_ima_sim_attr_get(OPC_IMA_INTEGER, "BS2_SNR",&snr_bs2);
    op_ima_sim_attr_get(OPC_IMA_INTEGER, "BS2_count_UCD",&ucd_count_bs2);
    op_ima_sim_attr_get(OPC_IMA_INTEGER, "BS2_COUNT_DCD",&dcd_count_bs2);
    op_ima_sim_attr_get(OPC_IMA_INTEGER, "BS2_NET_ID",&net_id_bs2);
    op_ima_sim_attr_get(OPC_IMA_INTEGER, "BS3_MAC_ADDRESS",&mac_bs3);
    op_ima_sim_attr_get(OPC_IMA_INTEGER, "BS3_SNR",&snr_bs3);
    op_ima_sim_attr_get(OPC_IMA_INTEGER, "BS3_count_UCD",&ucd_count_bs3);
    op_ima_sim_attr_get(OPC_IMA_INTEGER, "BS3_COUNT_DCD",&dcd_count_bs3);
    op_ima_sim_attr_get(OPC_IMA_INTEGER, "BS3_NET_ID",&net_id_bs3);

    if (BS_target < 0) // es un nodo de la bs_3 que va hacia la bs_1
    {
        mac_bs1 = BS1_OBJ_ID; snr_bs1 = snr_bs1 + 2; mac_bs2 = BS2_OBJ_ID; snr_bs2 = snr_bs2; }
    else if (BS_target == 0) // es un nodo de la bs_2 que va hacia la bs_1
    {
        mac_bs1 = BS1_OBJ_ID; snr_bs1 = snr_bs1 + 2; mac_bs2 = BS3_OBJ_ID; snr_bs2 = snr_bs3; }
    else if (BS_target % 2 == 0) // es un nodo de la bs_1 que va hacia la bs_2
    {
        mac_bs1 = BS3_OBJ_ID; snr_bs1 = snr_bs3; mac_bs2 = BS2_OBJ_ID; snr_bs2 = snr_bs2 + 2; }
    else if (BS_target % 2 != 0) // es un nodo de la bs_1 que va hacia la bs_3
    {
        mac_bs1 = BS2_OBJ_ID; snr_bs1 = snr_bs2; mac_bs2 = BS3_OBJ_ID; snr_bs2 = snr_bs3 + 2; }

    msg_ptr = op_pk_create_fmt(CMTS_HO_PK_FMT);
    op_pk_nfd_set(msg_ptr, "n_adv", n_adv); op_pk_nfd_set(msg_ptr, "station mac", station_MAC);
    op_pk_nfd_set(msg_ptr, "mac bs1", mac_bs1); op_pk_nfd_set(msg_ptr, "snr bs1", snr_bs1);
    op_pk_nfd_set(msg_ptr, "ucd count bs1", ucd_count_bs1); op_pk_nfd_set(msg_ptr, "dcd count bs1", dcd_count_bs1);
    op_pk_nfd_set(msg_ptr, "net id bs1", net_id_bs1); op_pk_nfd_set(msg_ptr, "mac bs2", mac_bs2);
    op_pk_nfd_set(msg_ptr, "snr bs2", snr_bs2); op_pk_nfd_set(msg_ptr, "ucd count bs2", ucd_count_bs2);
    op_pk_nfd_set(msg_ptr, "dcd count bs2", dcd_count_bs2); op_pk_nfd_set(msg_ptr, "net id bs2", net_id_bs2);
    op_pk_nfd_set(msg_ptr, "automa", 1); op_pk_total_size_set(msg_ptr, 8 * HO_REQ_SIZE);

```

```

if (op_prg_odb_ltrace_active("CM_pk_HO"))
{
    printf("\t SS [%d, %d] sending message of type %s, size %d at %f\n", station_address, station_SID,
        CMTS_HO_PK_FMT, op_pk_total_size_get(msg_ptr), time_now); }
op_pro_invoke(CM_Child_prh, msg_ptr);
if (op_prg_odb_ltrace_active("ho_procedure"))
{
    printf("\t\t\t*****\n"
        "\t\t\tSending HO_REQ message by MSS %d at %f\n"
        "\t\t\t*****\n\n", station_SID, time_now); }

ho_init = 1;
FOUT; }

/*****
** ask_permitse_to_continue ***
** This function check the ie_list_timer_ho if already exit the event. If not, give ***
** the permitse. If ye reject the permitse ***
** Revision History ***
** NOV 01, 2004 - UNAM * initial Development -jceg- ***
*****/
static int ask_permitse_to_continue (int mss_SID, int EVENT)
{
    int permitse, i, list_size = 0; INFO_TIMER_HO *ie_list_timer_ho_ptr;
    FIN (ask_permitse_to_continue (mss_SID, EVENT));
    if (op_prg_odb_ltrace_active("func_track")) printf("\t\t\t FUNCTION - MSS - ask_permitse_to_continue\n");
    update_list_timer_ho ();
    if (op_prg_odb_ltrace_active("timer_list"))
        printf("\n\nAt this time, the system is checking if the event %d for the user MSS_SID %d "
            "in the past has an already activated timer.\n", EVENT, mss_SID);
    list_size = op_prg_list_size(ie_list_timer_ho); permitse = 1;
    for (i = 0; i < list_size; i++)
    {
        ie_list_timer_ho_ptr = (INFO_TIMER_HO*) op_prg_list_access(ie_list_timer_ho, i);
        if (mss_SID == ie_list_timer_ho_ptr->sid)
            if (EVENT == ie_list_timer_ho_ptr->event)
            {
                permitse = 0; break; }
    }
    if (op_prg_odb_ltrace_active("timer_list"))
    {
        if (permitse == 0)
            printf ("\t\tThe system has rejected the permitse because already exist the event %d for the user %d\n", EVENT, mss_SID);
        else if (permitse == 1 ) printf ("\t\tThe system has accepted the petition\n");
        else printf ("\t\t\n\n\n *** error ***\n\n\n"); }
    FRET (permitse); }

/*****
** register_event_in_timer_list ***
** This function added to the ie_list_timer_ho, the event to register. This ***
** function is called when the function ask_permitse_to_continue give a yes ***
** Revision History ***
** NOV 01, 2004 - UNAM * initial Development -jceg- ***
*****/
static void register_event_in_timer_list (int mss_SID, int EVENT, double timeout)
{
    INFO_TIMER_HO *ie_list_timer_ho_ptr;
    FIN (register_event_in_timer_list (mss_SID, EVENT, timeout));
    if (op_prg_odb_ltrace_active("func_track")) printf("\t\t\t FUNCTION - MSS - register_event_in_timer_list\n");
    ie_list_timer_ho_ptr = op_prg_mem_alloc (sizeof(INFO_TIMER_HO));
    ie_list_timer_ho_ptr->sid = mss_SID; ie_list_timer_ho_ptr->event = EVENT;
    ie_list_timer_ho_ptr->time_out = timeout;
    op_prg_list_insert (ie_list_timer_ho, ie_list_timer_ho_ptr, OPC_LISTPOS_TAIL);
    if (op_prg_odb_ltrace_active("timer_list"))
    {
        printf ("\n\nThe system has registered this event at %f:\n\tMSS = %d\tevent = %d\texpired time = %f\tBS ID = \n",
            time_now, mss_SID, EVENT, timeout); // time_now, mss_SID, EVENT, timeout, parent_id); }
    FOUT; }

```



```

/*****
** print_info_timer_ho          ***
** This function print the lines into the ie_list_timer_ho list.      ***
** Revision History            ***
** NOV 01, 2004 - UNAM * initial Development -jecg-                  ***
*****/
static void print_info_timer_ho ()
{
    int i, list_size = 0; INFO_TIMER_HO *ie_list_timer_ho_ptr;
    FIN(print_info_timer_ho());
    if (op_prg_odb_ltrace_active("func_track")) printf("\t\tFUNCTION - print_info_timer_ho MSS ID %d\n", station_SID);
    list_size = op_prg_list_size(ie_lst_timer_ho);
    printf("\n list of the active timer at %f\n (event 1 = HO_REQ petition)\n (event 2 = HO_REQ_BS petition)\n\n", time_now);
    for (i = 0; i < list_size; i++)
    {
        ie_list_timer_ho_ptr = (INFO_TIMER_HO*) op_prg_list_access(ie_lst_timer_ho, i);
        printf("\t\tMSS ID = %d;\tEVENT = %d;\tTIME OUT = %f;\tBS ID = %d\tpos = %d\n",
            ie_list_timer_ho_ptr->sid, ie_list_timer_ho_ptr->event,
            ie_list_timer_ho_ptr->time_out, ie_list_timer_ho_ptr->bs_id_timer, i);
    }
    FOUT; }

/*****
** update_list_timer_ho        ***
** This function update the ie_list_timer_ho list. erase the event who timeout ***
** already expired (time_out < time_now) ***
** Revision History            ***
** NOV 01, 2004 - UNAM * initial Development -jecg-                  ***
*****/
static void update_list_timer_ho (void)
{
    int i, list_size = 0, replay; INFO_TIMER_HO *ie_list_timer_ho_ptr;
    FIN(update_list_timer_ho());
    if (op_prg_odb_ltrace_active("func_track")) printf("\t\tFUNCTION - MSS - update_list_timer_ho\n");
    list_size = op_prg_list_size(ie_lst_timer_ho); replay = 0;
    for (i = 0; i < list_size; i++)
    {
        ie_list_timer_ho_ptr = (INFO_TIMER_HO*) op_prg_list_access(ie_lst_timer_ho, i);
        if (ie_list_timer_ho_ptr->time_out <= time_now)
        {
            if (op_prg_odb_ltrace_active("timer_list"))
            {
                printf("\n\nThe next line has been erase :\n"
                    "\t\tMSS ID = %d;\tEVENT = %d;\tTIME OUT = %f;\tBS ID = \tpos = %d\tat %f\n",
                    ie_list_timer_ho_ptr->sid, ie_list_timer_ho_ptr->event,
                    ie_list_timer_ho_ptr->time_out, i, time_now);
                op_prg_list_remove (ie_lst_timer_ho,i); replay = 1; break; }
            if (replay == 1) update_list_timer_ho ();
            if (op_prg_odb_ltrace_active("timer_list")) print_info_timer_ho ();
        }
    }
    FOUT; }

/*****
** there_are_good_beacon      ***
** This function check if there are beacons registered, and if they have good snr ***
** registered                  ***
** Revision History            ***
** NOV 01, 2004 - UNAM * initial Development -jecg-                  ***
*****/
static int there_are_good_beacon ()
{
    int permise;
    FIN (there_are_good_beacon ());
    if (op_prg_odb_ltrace_active("func_track")) printf("\t\tFUNCTION - MSS - there_are_good_beacon\n");
    permise = 0;
    if (snr_bs1 >= 13.9) permise == 1;
    else if (snr_bs2 >= 13.9) permise == 1;
    FRET (permise); }

```