



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA ELÉCTRICA – TELECOMUNICACIONES

**“TÉCNICAS DE RESOLUCIÓN DE COLISIONES EN REDES
INALÁMBRICAS MULTISALTO WiMAX PARA EL
ESTÁNDAR 802.16J”**

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:

JOSÉ HELIO GONZÁLEZ PIZENO

TUTOR: DR. VÍCTOR RANGEL LICEA. FACULTAD DE INGENIERÍA

MÉXICO, D. F. JUNIO 2013



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

DEDICATORIA

A Dios por ser la guía espiritual y apoyo fundamental en mi vida.

A mis padres y hermanos por su apoyo y amor.

A Sandra Álvarez por ser el amor de mi vida, gracias por tu paciencia y apoyo.

A mis amigos por su confianza, consejos y apoyo.

AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Víctor Rangel Licea por dirigir, supervisar y brindar su tiempo en la realización de esta tesis.

A la DGAPA UNAM por las becas otorgadas en los proyectos de investigación PAPIIT: IN108910 “Diseño de algoritmos de reservación de capa cruzada en redes móviles y mesh de banda ancha” y PAPIIT: IN114713 “Diseño y análisis de algoritmos de calendarización en redes LTE y WiMAX”.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por la beca otorgada en el proyecto CONACYT 105279 “Diseño de técnicas de reservación de capacidad en redes inalámbricas de banda ancha móviles”.

A la Universidad Nacional Autónoma de México por permitirme realizar mis estudios de posgrado.

Índice

| | |
|--|----|
| Capítulo I Introducción | 1 |
| 1.1 Antecedentes | 2 |
| 1.2 Definición del problema | 3 |
| 1.3 Consideraciones para la eficiencia de la red | 5 |
| 1.4 Objetivos | 6 |
| 1.5 Metodología | 6 |
| 1.6 Contribución y relevancia | 7 |
| 1.7 Estado del arte | 7 |
| 1.8 Estructura de la tesis | 8 |
| | |
| Capítulo II Estado del Arte | 9 |
| 2.1 Introducción | 10 |
| 2.2 Artículos de relevancia | 10 |
| 2.2.1 Diseño de la estructura de la trama para redes IEEE 802.16j | 10 |
| 2.2.2 Codificación base para redes multisaltos en IEEE 802.16j | 11 |
| 2.2.3 Algoritmo de optimización para contenciones en redes IEEE 802.16j | 12 |
| 2.2.4 Evaluación del rendimiento de técnicas de contención para redes WiMAX | 12 |
| 2.2.5 Optimización de reservación de ancho de banda y colocación de RS en IEEE 802.16j | 14 |
| 2.2.6 Probabilidad de colisión en la etapa de ranging | 15 |
| 2.2.7 Prioridad de ancho de banda en redes IEEE802.16j | 15 |
| 2.2.8 Análisis del rendimiento de repetidores (RS) transparentes y no transparentes en redes multisaltos WiMAX | 17 |
| 2.2.9 Análisis de throughput en repetidores transparentes y no transparentes para redes multisaltos WiMAX | 18 |
| 2.2.10 Asignación multinivel de recursos en redes WiMAX | 19 |
| 2.2.11 Perspectiva general de las redes IEEE 802.16j | 19 |
| 2.3 Conclusión | 21 |
| | |
| Capítulo III Descripción del Estándar IEEE 802.16j | 22 |
| 3.1 Introducción | 23 |
| 3.2 Capa física (PHY) | 24 |
| 3.2.1 Descripción en el dominio del tiempo y frecuencia. | 24 |
| 3.2.2 Slot y región de datos | 26 |
| 3.2.3 Mapeo de los datos en OFDMA | 26 |
| 3.2.4 Estructura de la trama | 29 |
| 3.2.4.1 Duplexación por división de frecuencia (FDD) | 30 |
| 3.2.4.2 Duplexación por división de tiempo (TDD) | 30 |
| 3.2.5 Estructura de la sub trama de UL y sub trama de DL en modo TDD | 31 |
| 3.2.6 Estructura de la trama en modo Transparente | 32 |
| 3.2.7 Estructura de la trama en modo no Transparente | 34 |
| 3.3 Capa MAC | 37 |
| 3.3.1 Entrada e inicialización a la red | 38 |

| | |
|--|-----------|
| 3.4 Asignación de ancho de banda y mecanismos de petición | 42 |
| 3.4.1 Peticiones | 42 |
| 3.4.2 Petición de ancho de banda en redes RS con programación distribuida. | 43 |
| 3.4.3 Petición de ancho de banda en redes RS con programación centralizada. | 44 |
| 3.4.4 Reservaciones | 44 |
| 3.4.5 Reservaciones de ancho de banda en redes RS con programación distribuida. | 44 |
| 3.4.6 Reservaciones de ancho de banda en redes RS con programación centralizada. | 46 |
| 3.5 Ranging inicial y periódico en redes MR-BS/RS | 46 |
| 3.5.1 Comportamiento de MR-BS y RS durante ranging inicial | 46 |
| 3.5.1.1 Ranging inicial en modo transparente | 47 |
| 3.5.1.2 Ranging inicial en modo no transparente | 49 |
| 3.5.2 Comportamiento de MR-BS y RS durante ranging periódico | 51 |
| 3.6 Contención | 54 |
| 3.6.1 Contención CDMA BWR en redes RS | 54 |
| 3.6.1.1 Contención CDMA BWR en redes RS con programación centralizada | 54 |
| 3.6.1.2 Contención CDMA BWR en redes RS con programación distribuida | 56 |
| 3.6.2 Asignación de código único CDMA a RS | 57 |
| 3.7 Resolución de contenciones | 58 |
| 3.7.1 Oportunidades de transmisión | 59 |
| 3.7.2 Resolución de contención mediante Backoff | 60 |
| 3.8 Conclusiones | 62 |
| | |
| Capítulo IV Modelo de Simulación OPNET | 63 |
| 4.1 Introducción | 64 |
| 4.2 Modelo OPNET | 64 |
| 4.2.1 Dominio de red (Network Domain) | 65 |
| 4.2.2 Dominio de nodo (Node domain) | 65 |
| 4.2.3 Dominio del proceso (Process domain) | 66 |
| 4.2.4 Código Proto C | 66 |
| 4.3 Modelo de simulación | 67 |
| 4.3.1 Diseño de la estación base (BS) | 69 |
| 4.3.2 Diseño de la estación repetidora (RS) | 70 |
| 4.3.3 Diseño de la estación suscriptora (SS) | 71 |
| 4.3.4 Servidor de aplicaciones | 73 |
| 4.3.5 Objetos de Applications, Profile y WiMAX | 74 |

| | |
|---|-----------|
| Capítulo V Implementación y Resultados | 75 |
| 5.1 Introducción | 76 |
| 5.2 Implementación de la técnica | 77 |
| 5.2.1 Técnica de resolución de contenciones en IEEE 802.16 | 77 |
| 5.2.2 Técnica de resolución de contenciones con códigos CDMA | 78 |
| 5.2.3 Técnica con códigos CDMA y uso de RS | 79 |
| 5.2.4 Modelo de simulación | 80 |
| 5.3 Resultados | 94 |
| 5.3.1 Resultados obtenidos haciendo uso de diferentes rangos de código CDMA | 94 |
| 5.3.2 Resultados utilizando diferente número de RS | 98 |
| 5.3.3 Resultados con 100 usuarios y utilización de RS | 102 |
| 5.3.4 Resultados con diferente uso de intervalos de códigos CDMA junto con RS | 104 |
| 5.4 Conclusiones | 108 |
| Referencias | 110 |
| Glosario | 113 |

Índice de Figuras

| | |
|--|----|
| Figura 1.1 Modulación adaptativa | 4 |
| Figura 1.2 Usuarios conectados a diferentes estaciones repetidoras (RS) | 4 |
| Figura 3.1 Uso de RS intermediario en una red MR de tres saltos | 23 |
| Figura 3.2 Estructura de tiempo de un símbolo OFDMA | 25 |
| Figura 3.3 Sub portadoras OFDMA. | 25 |
| Figura 3.4 Ejemplo de una región de datos que define una asignación OFDMA | 26 |
| Figura 3.5 Ejemplo del mapeo o correlación de los slots OFDMA a sub canales y símbolos en el DL. | 27 |
| Figura 3.6 Ejemplo del mapeo o correlación de los slots OFDMA a sub canales y símbolos en el UL. | 29 |
| Figura 3.7 Duplexación por división de frecuencia | 30 |
| Figura 3.8 Duplexación por división de tiempo | 30 |
| Figura 3.9 Sub trama DL y UL en modo TDD | 31 |
| Figura 3.10 Estructura de la trama BS en modo transparente. | 32 |
| Figura 3.11 Estructura de la trama RS en modo transparente | 33 |
| Figura 3.12 Estructura de la trama BS en modo no transparente | 35 |
| Figura 3.13 Estructura de la trama RS en modo no transparente | 36 |
| Figura 3.14 Modelo de protocolo de referencia para el estándar IEEE802.16 | 38 |
| Figura 3.15 Entrada e inicialización a la red de RS | 39 |
| Figura 3.16 Entrada e inicialización a la red de SS | 40 |
| Figura 3.17 Reducción de latencia en la retransmisión de petición BWR | 43 |
| Figura 3.18 Reservación periódica de ancho de banda en redes con administración centralizada | 45 |
| Figura 3.19 Ranging y ajustes automáticos para ranging inicial en modo transparente. | 48 |
| Figura 3.20 Ranging y ajustes automáticos para ranging inicial en modo no transparente. | 50 |
| Figura 3.21 Ranging y ajustes automáticos para ranging periódico en modo transparente | 52 |
| Figura 3.22 Ranging y ajustes automáticos para ranging periódico en modo no transparente | 53 |
| Figura 3.23 BWR Petición/asignación para un RS en modo de administración centralizado | 56 |
| Figura 3.24 Ejemplo de una petición IE con tres oportunidades de transmisión | 59 |
| Figura 3.25 Algoritmo de Backoff | 60 |
| Figura 3.26 Ejemplo de contención para un SS | 61 |

Índice

| | |
|--|-----|
| Figura 4.1 Diagrama de estado de OPNET para los modelos de simulación | 65 |
| Figura 4.2 Modelo de red | 67 |
| Figura 4.3 Ejemplo de estadísticas de throughput, retardo y colisiones respectivamente | 68 |
| Figura 4.4 Estructura de la estación base (BS) | 69 |
| Figura 4.5 Proceso “hijo” wimax_bs_control | 70 |
| Figura 4.6 Estructura de la RS | 70 |
| Figura 4.7 Proceso “hijo” wimax_rs_control | 72 |
| Figura 4.8 Estructura del SS | 72 |
| Figura 4.9 Proceso “hijo” wimax_ss_control | 72 |
| Figura 4.10 Estructura del servidor | 73 |
| Figura 4.11 Objetos del modelo de red | 74 |
| Figura 5.1 Ejemplo de colisión | 77 |
| Figura 5.2 Ejemplo del uso de códigos CDMA | 78 |
| Figura 5.3 Distribución del tamaño de paquete | 80 |
| Figura 5.4 Red con 200 usuarios | 82 |
| Figura 5.5 Distribución PDF DistEthLR | 82 |
| Figura 5.6 Parámetros de simulación | 83 |
| Figura 5.7 Proceso de contención | 93 |
| Figura 5.8 Throughput con 200 usuarios y diferentes intervalos de códigos CDMA | 94 |
| Figura 5.9 Retardo con diferentes intervalos de códigos CDMA | 95 |
| Figura 5.10 Colisiones con diferentes intervalos de códigos CDMA | 96 |
| Figura 5.11 Throughput con diferentes intervalos de códigos CDMA con 200 usuarios y 4 RS | 98 |
| Figura 5.12 Retardo con diferentes intervalos de códigos CDMA con 200 usuarios y 4 RS | 99 |
| Figura 5.13 Colisiones con diferentes intervalos de códigos CDMA con 4 RS | 100 |
| Figura 5.14 Throughput con 100 usuarios y ningún, 1, 3 y 5 RS | 102 |
| Figura 5.15 Retardo con 100 usuarios con ningún, 1, 3 y 5 RS | 103 |
| Figura 5.16 Throughput y retardo para 4, 6, 8 y 10 códigos CDMA con y sin RS para 200 usuarios | 106 |

Índice de Tablas

| | |
|---|-----|
| Tabla 2.1 Comparación entre modo transparente y modo no transparente | 17 |
| Tabla 2.2 Resumen del promedio del throughput | 18 |
| Tabla 2.3 Principales diferencias entre el estándar IEEE 802.16e y el estándar IEEE 802.16j | 20 |
| Tabla 2.4 Comparación entre modo transparente y no transparente | 20 |
| Tabla 3.1 Valor de la ventana de contención para diferente número de colisiones | 58 |
| Tabla 5.1 Parámetros de la red | 80 |
| Tabla 5.2 Código para colisiones | 86 |
| Tabla 5.3 Intervalo de código CDMA para diferentes propósitos | 87 |
| Tabla 5.4 Código RS para formar y enviar tuplas CDMA | 92 |
| Tabla 5.5 Retardo con 200 usuarios sin RS | 96 |
| Tabla 5.6 Número de colisiones sin RS con 200 SS | 96 |
| Tabla 5.7 Retardo con 200 usuarios con RS y 200 SS | 100 |
| Tabla 5.8 Número de colisiones con 4 RS y 200 SS | 101 |
| Tabla 5.9 Retardo con 100 usuarios con ningún, 1, 3, y 5 RS | 104 |
| Tabla 5.10 Número de colisiones con ningún, 1, 3 y 5 RS | 104 |
| Tabla 5.11 Número de colisiones para 4, 6, 8 y 10 códigos CDMA con y sin RS | 107 |

Resumen

Las redes inalámbricas presentan una gran ventaja con respecto a los demás medios de comunicación, la comodidad de brindar acceso a usuarios sin la necesidad de cables. Dentro de estas redes encontramos a las redes WiMAX (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*), este tipo de red obedece al estándar IEEE 802.16j, esta tecnología consiste de una estación base (*Base Station, BS*), usuarios activos (*Subscriber Station, SS*) y para esta versión “j” del estándar, se introduce estaciones repetidoras (*Relay Station, RS*).

Los usuarios se conectan a la estación base más cercana para tener acceso a la red, un usuario puede llegar a conectarse hacia la estación base a través de uno o varios repetidores. El conectarse a través de un repetidor dependerá de en donde se recibe mejor nivel o potencia de la señal, si desde la estación base o desde el repetidor, decidiendo la estación base cual es la conexión más conveniente a establecer.

En el estándar IEEE802.16j existen dos tipos de repetidores, transparentes y no transparentes. El objetivo de los repetidores transparentes es la de brindar cobertura en áreas donde la señal de la estación base es muy débil, para los repetidores no transparentes es el brindar una mayor capacidad de datos que fluye a través del sistema, conocido esto como *throughput*.

En redes con muchos usuarios, los cuales saturan el canal de comunicación debido a una gran cantidad de datos que transmitir, acontece lo que se conoce como colisiones. Las colisiones ocurren cuando dos o más usuarios transmiten en el mismo instante o ranura de tiempo, cuando esto pasa, decimos que hubo una colisión. Por lo que los usuarios que ocasionaron la colisión tendrán que esperar un tiempo de espera para poder transmitir nuevamente.

El método de *Backoff*, formalmente conocido como *Truncated Binary exponential backoff (TBEB)*, es un algoritmo el cual penaliza con tiempos de espera a usuarios que hayan ocasionado una o varias colisiones. El tiempo de espera se duplica para cada usuario que vuelva a ocasionar una colisión, esto lo hace poco eficiente, por lo que es importante investigar en nuevos métodos para resolver las colisiones.

Actualmente existen varios estudios de cómo resolver las colisiones (ver Capítulo II), pero con la introducción de estaciones repetidoras en el estándar IEEE 802.16j, en este trabajo de tesis se investiga la ventaja que proveen las estaciones repetidoras en la disminución del número de colisiones que ocurren en una red en saturación.

Se investiga también el uso de códigos *CDMA*, esto consiste en que cada usuario transmita una reservación con un código *CDMA* escogido aleatoriamente dentro de un intervalo o rango de códigos, esto hace que diferentes usuarios transmitan con un código único. Aunque los usuarios transmitan en la misma oportunidad, disminuye la probabilidad de colisionar gracias a que cada uno posee un código *CDMA* diferente para transmitir. El problema que se presenta es que el intervalo de códigos *CDMA* que se puede utilizar no puede ser muy grande, un intervalo o rango muy grande de códigos *CDMA* hace que el sistema sea muy complejo. Un intervalo o rango pequeño de códigos *CDMA* a escoger, hace que la probabilidad de que un usuario colisione sea mayor en comparación con un intervalo grande de códigos *CDMA*. En este trabajo de tesis se busca un intervalo o rango adecuado de códigos *CDMA* que pueda utilizar el sistema.

Tomando ventaja de los códigos *CDMA*, se utilizan listas o *tuplas* en la estación repetidora, estas consisten en información básica de cada usuario que utiliza un repetidor y que solicita ancho de banda. Se genera un único mensaje que contiene *tuplas*, el cual se envía a la estación base para que esta atienda las solicitudes de los usuarios. Cada mensaje enviado, desde la estación repetidora hacia la estación base, se le asigna un código *CDMA* aleatorio. Esto ocasiona que haya un orden en el envío y recepción de las solicitudes y reservaciones de ancho de banda, mostrando una reducción en el retardo de contención y observando una disminución en el número de colisiones en el sistema.

Se estudian las ventajas y desventajas que se presentan cuando se utilizan cada una de las técnicas, para esto, se analizan parámetros importantes como los son el *throughput*, el retardo y el número de colisiones que registra la red, buscando así cual es la más eficiente y mostrando el comportamiento de cada técnica utilizada.

Capítulo I

Introducción

A lo largo de la humanidad, siempre se ha tenido la necesidad de comunicación, en un principio la distancia representaba un problema importante ya que la comunicación era lenta e imprecisa, en la actualidad existe una infinidad de formas de comunicación en donde el mundo entero esta comunicado por diversos fines (industria, entretenimiento, investigación, desarrollo, atención a desastres, etc.).

En nuestros días existen principalmente dos maneras o medios para comunicarse, vía alámbrica e inalámbrica. Las transmisiones inalámbricas constituyen una eficaz herramienta que permite la transferencia de voz, datos y vídeo sin la necesidad de cableado estructurado. Esta transferencia de información es lograda a través de la emisión de ondas de radio electromagnéticas, teniendo dos ventajas: movilidad y flexibilidad del sistema en general.

Dentro de la comunicación inalámbrica encontramos diversas tecnologías, dentro de las cuales la tecnología *WiMAX* es utilizada para redes de área metropolitana, esta provee servicio de ancho de banda, cobertura y calidad de servicio (*Quality of Service QoS*¹).

1.1 Antecedentes

La tecnología de acceso inalámbrico de banda ancha (*Broadband Wireless Access, BWA*²) es una tecnología de cuarta generación para la provisión de servicios digitales en el mercado de las telecomunicaciones (telefonía celular, Internet de gran velocidad, videoconferencias, servicios multimedia, etc.) debido a su gran capacidad de transmisión de datos (de 1 a 134.4 Mbps), cobertura (1-30 km), sofisticadas funciones de acceso para el soporte de diferentes tipos de calidad de servicio, facilidad de configuración y bajo costo de operación.

*WiMAX*³ está basada en *IP*, es una tecnología de acceso inalámbrico de banda ancha que ofrece un rendimiento similar a las redes 802.11/*Wi-Fi* pero con mayor cobertura y calidad de servicio que las redes celulares. *WiMAX* es un acrónimo que significa *Worldwide Interoperability for Microwave Access* (Interoperabilidad mundial para acceso por microondas). El cual es un sistema de comunicación digital inalámbrica, también conocida como IEEE 802.16, que se destina principalmente para la telefonía celular en redes de área metropolitana.

¹*QoS* acrónimo para *Quality of Service*, referirse al glosario.

²*BWA* acrónimo para *Broadband Wireless Access*, referirse al glosario.

³*WiMAX* acrónimo para *Worldwide Interoperability for Microwave Access*, referirse al glosario.

WiMAX puede proporcionar acceso inalámbrico de banda ancha (*BWA*) de hasta 50 km para estaciones fijas, y de 5-15 km para estaciones móviles. Por el contrario, el estándar inalámbrico *WiFi/802.11* de red de área local se limita en la mayoría de los casos a sólo de 30 a 100 metros.

IEEE 802.16 es el nombre de un grupo de trabajo del comité IEEE 802 el cual desarrolla la especificación de la tecnología (estándar) y *WiMAX* asegura la conformidad (verificada en laboratorios y agencias de certificación) e interoperabilidad (pruebas entre diferentes fabricantes) para certificar productos de IEEE 802.16[14].

WiMAX opera en frecuencias con licencia y sin licencia, proporcionando así un entorno regulado y un modelo económico viable para los operadores inalámbricos.

Actualmente hay cuatro sistemas *WiMAX*:

- Fijo (IEEE 802.16-2004)
- Móvil (IEEE.16e-2005)
- Malla (IEEE 802.16-Mesh)
- Multisaltos *Relay*⁴ (IEEE 802.16j-2009)[15]

Dentro de estos cuatro sistemas, se toma el estándar 802.16j-2009 [15] el cual incluye la utilización de repetidores (*Relay Stations, RS*), los cuales incrementan la cobertura y capacidad de datos en la red en donde estén desplegados.

En este sistema se introducen nuevas arquitecturas, modos transparente y no transparente, control de flujo, parámetros y demás adecuaciones que definen a este estándar, el cual se verá más a detalle en el Capítulo III.

1.2 Definición del problema

El sistema *WiMAX* utiliza usuarios suscriptores (*Subscriber Stations, SS*) los cuales para brindarles servicio se conectan a su estación base (*Base Station, BS*). La conexión entre la *BS* y la *SS* se conoce como enlace de bajada (*Downlink*⁵ o *DL*) y el enlace de *SS* a *BS* se conoce como enlace de subida (*Uplink*⁶ o *UL*). Se utiliza además la modulación adaptativa la cual consiste en la existencia de áreas delimitadas donde dependiendo de la proximidad de la *SS* a la *BS* se tendrá una mejor modulación con una tasa de transferencia de datos mayor, ver figura 1.1.

⁴*Relay* término que refiere a repetidor o estación repetidora, referir se al glosario.

⁵*Downlink* término que refiere al enlace de bajada, desde la estación base hacia los usuarios.

⁶*Uplink* término que refiere al enlace de subida, desde los usuarios hacia la estación base.

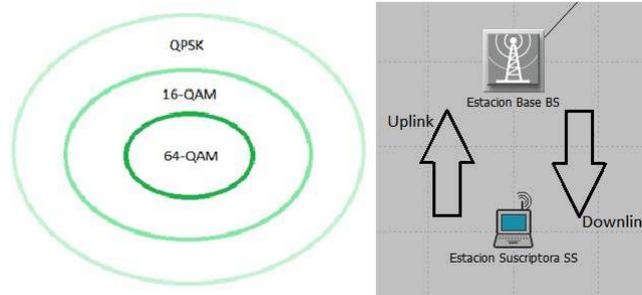


Figura 1.1 Modulación adaptativa.

El estándar 802.16j especifica el uso de multisaltos (*Multi-Hops*⁷), los saltos son el número de estaciones repetidoras (RS) que tiene que utilizar un usuario (SS) para alcanzar o llegar a su estación base (BS), esto permite que se pueda extender la cobertura y capacidad. Lo anterior es muy útil ya que presenta ventajas como es el eliminar sombras de cobertura (ausencia de señal) y brindar servicio a SS aislados de cobertura, dando más cabida a usuarios en la red, ver figura 1.2.

Sin embargo, existen ciertas desventajas, uno de esos problemas es que al tener un número muy grande de usuarios activos conectados a la BS, se saturan los canales de transmisión, provocando un bajo rendimiento a causa del número excesivo de colisiones por mensajes de reservación. El mecanismo de reservación se realiza en el enlace UL donde en la trama o frame⁸ de UL existe un área reservada de contención (slots de contención) donde los SS piden su reservación de ancho de banda y la cual varía dependiendo del número de usuarios, este mecanismo se verá más a detalle en el Capítulo III.

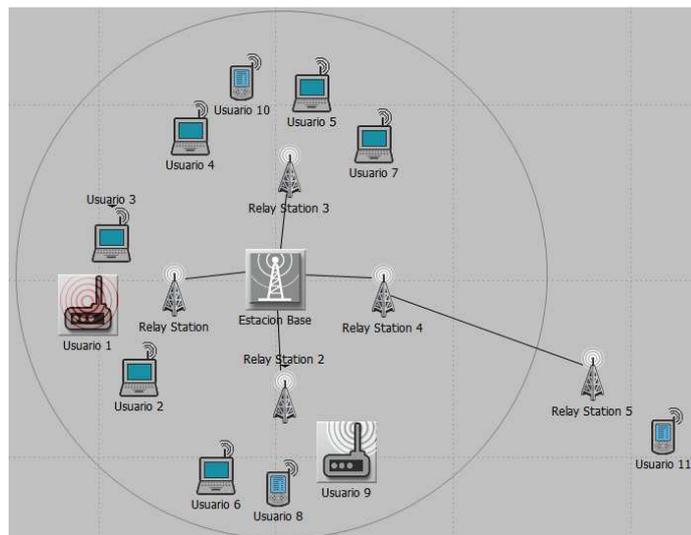


Figura 1.2 Usuarios conectados a diferentes estaciones repetidoras (RS).

⁷Multi-Hops término utilizado cuando se usan varios repetidores contando a cada uno como un salto.

⁸Frame término que se refiere a trama, utilizado como un conjunto de datos en la capa MAC.

Cuando dos o más estaciones transmiten sus mensajes de reservaciones en el mismo instante o *slot*⁹ de contención se genera una colisión, el algoritmo adoptado en redes WiMAX para la resolución de colisiones es el Algoritmo de *Backoff*¹⁰ (*Exponencial Backoff Algorithm, EBA*), el cual es utilizado por el estándar IEEE 802.16 por su fácil implementación, pero este presenta baja eficiencia en condiciones de congestión.

El algoritmo de *Backoff* aumenta el retardo promedio de los paquetes, porque cuando se incrementa el número de colisiones, el número de intentos de un SS por transmitir es cada vez mayor. Por lo que es necesario que se mejoren o investiguen otros algoritmos de resolución de colisión (*Contention Resolution Algorithms, CRA*) donde se resuelva de manera más rápida la colisión, reduciendo el retardo y obtener así una mayor eficiencia para el sistema.

Encontrar nuevas técnicas para resolver colisiones más eficazmente es un camino viable para incrementar el número de transmisiones simultáneas, lo que incrementaría la capacidad de transmisión.

1.3 Consideraciones para la eficiencia de la red

Existen dos métodos fundamentales para el análisis de una red, el modelo teórico y el modelo de simulación, en el modelo teórico se busca dar una explicación matemática a cierto proceso mediante análisis, medido cuantitativamente. En el modelo simulado se busca obtener resultados mediante la experimentación (prueba y error), analizando y/o comparando los diferentes resultados obtenidos para su posterior análisis.

Ambos modelos son de igual importancia, ya que los resultados obtenidos de ambos nos dan un amplio panorama y entendimiento sobre lo que se está analizando y queriendo probar.

Los parámetros que se deben considerar para medir la eficiencia de una red son el rendimiento (*throughput*), el retardo promedio de acceso (*Mean Access Delay*) y el número de colisiones.

- *Throughput*: Cantidad de datos que se transmiten entre dos dispositivos de red.
- *Mean Access Delay*: Es el tiempo que tarda un paquete de datos en enviarse y recibirse al dispositivo de red destino.
- *Colisión*: Es cuando dos o más usuarios transmiten en el mismo instante de tiempo dentro de una oportunidad de transmisión.

⁹*Slot* término para ranura o espacio que se utiliza en una oportunidad de transmisión.

¹⁰*Backoff* término para referirse al algoritmo que penaliza a SS con tiempos de espera para transmitir.

Para este trabajo de tesis, se mostrará diferentes técnicas de resolución de colisiones, la cual se estudia principalmente el uso de códigos *CDMA*¹¹ para hacer reservaciones, aumentando así la capacidad del sistema y optimizando los parámetros antes descritos.

1.4 Objetivos

Se busca un mejor control de acceso al medio (*Medium Access Control, MAC*¹²) haciendo uso de una implementación con códigos de acceso múltiple por división de código (*Code Division Multiple Access, CDMA*) para optimizar la técnica de resolución de contenciones, ya que el utilizado por el estándar (algoritmo *Backoff*) presenta deficiencias cuando hay tráfico excesivo en la red.

Con ayuda de esta nueva implementación se busca además reducir el retardo de contención el cual es el retardo que más afecta al retardo promedio de los paquetes.

Otro objetivo es extender el conocimiento actual de las redes inalámbricas de banda ancha y contribuir así al fortalecimiento y desarrollo de la investigación científica y tecnológica en el país.

1.5 Metodología

Tomando como guía y base el estándar IEEE 802.16 y el estándar IEEE 802.16j, se desarrollará esta tesis respetando los lineamientos establecidos y como referencia para comparación de resultados, obteniendo así conclusiones al final de esta tesis.

Para confiabilidad de resultados, es fundamental implementar y probar estas técnicas en simuladores de redes. El simulador de redes que se utiliza es el *Optimun Network Performance Modeler (OPNET*¹³) ya que esta herramienta cuenta con lo necesario para lograr el objetivo buscado, contando además con reconocimiento internacional como una herramienta útil y confiable en el área de investigación e implementación de redes de computadoras.

OPNET es un software bajo licencia, gracias al apoyo de los proyectos *PAPIIT* y *CONACyT* se logró pagar dichas licencias de operación para propósitos de investigación.

¹¹*CDMA* acrónimo para acceso múltiple por división de código.

¹²*MAC* acrónimo para control de acceso al medio, capa donde reside la tecnología *WiMAX*.

¹³ *OPNET* acrónimo el cual es un software para simular redes de comunicaciones.

1.6 Contribución y relevancia

El retardo (*Delay*) se compone de 4 partes importantes, Dq que es el retardo de encolamiento debido a la espera de un *SS*, Dc es el retardo de contención, Dg es el retardo de reservación y el retardo Dtx representa el tiempo de la transmisión de los paquetes desde la *SS* hacia la *BS*. Por lo tanto, el retardo promedio es la suma de los retardos anteriormente mencionados: $D=Dq + Dc + Dg + Dtx$, en el que el retardo de contención es el que más se busca reducir por ser el de más larga duración debido a colisiones.

Se propone la implementación y optimización de códigos *CDMA* en el proceso de *CRA* el cual busca reducir los tiempos de contención, para que el retardo promedio del envío de paquetes también disminuya y con esto poder garantizar que ciertas aplicaciones como por ejemplo voz, el cual el retardo es un factor importante a considerar, puedan ser posibles.

Se busca presentar un artículo para conferencia donde se incluya este trabajo de tesis para su posterior arbitraje, contribuyendo también dentro de la comunidad de *OPNET*, proporcionando así la oportunidad de experimentar y extender este trabajo.

1.7 Estado del arte

El estándar IEEE 802.16j surge en 2009, introduciendo el concepto de estaciones repetidoras (*RS*) los cuales aumentan la cobertura y *throughput* en la red, dentro del estándar surge el concepto de repetidores transparentes y repetidores no transparentes, los cuales amplían de manera importante el área de estudio y desarrollo en este estándar.

En la actualidad se han presentado diversos estudios y análisis en distintos temas dentro del estándar IEEE 802.16j, en el artículo "*Frame Structure Design for IEEE 802.16j Mobile Multihop Relay (MMR) Networks*"[1] se propone una trama o frame flexible, de tal manera que un *RS* pueda ser subordinada de otra *RS* para así delimitar áreas de repetidores, por lo que se logró reutilizar las frecuencias y la eficiencia de la capa *MAC* aumento en comparación en donde no se reutilizan, para ambos casos se utilizó 4 saltos. En otro artículo "*Network Coding-Based Relay for IEEE 802.16j Multihop Relay Network*"[2] plantea el problema que tiene el manejar más de tres *RS*, los cuales generan degradación del *throughput* y aumenta negativamente el retardo *end to end* por lo que se propone un código llamado "*Network Coding-based Relay scheme*" (*NC-based relay*) logrando un *throughput* de 140% de ganancia y una reducción de retardo de 83%.

En el tema de resolución de contenciones, existen diversos artículos que estudian esta área, por ejemplo el artículo “*QoS Guarantee-based Fast Handoff in IEEE 802.16j WiMAX MMR Networks*”[3] que plantea el problema de que el algoritmo *TBEB* (*truncated binary exponential backoff*), el cual es utilizado en el estándar IEEE 802.16j, no funciona adecuadamente cuando hay mucha congestión de tráfico en la red, para servicios en tiempo real, la ventana de *backoff* no hace diferencia entre prioridades de nodos, lo que se pretende en ese artículo es el proponer un nuevo algoritmo el cual reduzca las colisiones en la etapa inicial (*initial ranging, IR¹⁴*) y en la etapa de petición de ancho de banda (*bandwidth request, BWR¹⁵*), por lo que se propone dos ventanas de contención diferentes (*distributed differentiated contention window algorithm y adaptive waiting-penalty algorithm*), estos algoritmos muestran la probabilidad que tiene un nodo en colisionar y así ajustar la ventana, como resultado se muestra una baja probabilidad de colisión y acelera también el proceso de *handoff¹⁶*.

El artículo “*Performance Evaluation of Five New Adaptive Contention Slot Allocators for IEEE 802.16 Based Systems*”[4] nos muestra el rendimiento de cinco diferentes técnicas de resolución de contenciones en las cuales se busca asignar dinámicamente el número de slots de contención dependiendo de la cantidad de tráfico y colisiones en la red. En general se mostró una mejoría en *throughput* y retardo comparado con el algoritmo *EBA* utilizado en el estándar IEEE 802.16. En el Capítulo II se muestran más a detalle estos artículos junto con otros los cuales se basan este trabajo de tesis.

1.8 Estructura de la tesis

- Capítulo II. Artículos de relevancia en los cuales se basa esta tesis.
- Capítulo III. Descripción y detalles de la capa de acceso al medio y capa física (*MAC* y *PHY*), se describe las características pertinentes del estándar IEEE 802.16j, exponiendo también el algoritmo de resolución de contenciones utilizado actualmente.
- Capítulo IV. Se muestra las características principales del programa de simulación (*OPNET*) utilizado.
- Capítulo V. Implementación de las técnicas y comparación de resultados obtenidos en la parte de simulación para su discusión y análisis. Conclusiones.

¹⁴*Initial Ranging*, etapa inicial donde los usuarios se sincronizan con su estación base.

¹⁵*BWR* acrónimo para petición de ancho de banda.

¹⁶*Handoff*, término utilizado para cuando un SS se cambia de una estación base a otra.

Capítulo II

Estado del Arte

2.1 Introducción

Este capítulo consiste en mostrar los estudios e investigaciones en los cuales se basan este trabajo de tesis sobre el área de resolución de contenciones para el estándar IEEE 802.16j [15].

Se pretende mostrar la manera en que diversas instituciones y autores de renombre realizan estudios sobre esta área, el método de análisis utilizado, parámetros importantes que se tienen que considerar y resultados obtenidos.

Se presenta un resumen de diferentes investigaciones y publicaciones realizadas a nivel mundial sobre el estándar 802.16j, en donde se busca obtener posibles mejoras e innovaciones debido al uso de repetidores (*RS*), contribuyendo así a la perfección de las redes *WiMAX*.

2.2 Artículos de relevancia

2.2.1 Diseño de la estructura de la *trama* para redes IEEE 802.16j [1]

El artículo propone una *trama* flexible para 802.16j, partiendo de la ya establecida en 802.16e. En un repetidor multisalto (*multihop relay, MR*) se tiene una configuración en la cual se puede expandir la cobertura a estaciones móviles (*Mobile Stations, MS*) haciendo uso de *RS* las cuales a su vez se comunican a su *BS*. Una *RS* puede ser subordinada de otra *RS* y está a su vez se comunica con la *BS*. La comunicación entre *RS* y *BS* se llama enlace de repetidor (*relay link, RL*) y la comunicación de *MS* con su *RS* se llama enlace de acceso (*access link, AC*).

Esta nueva estructura de *frame* o *trama* está compuesta por su parte de *downlink (DL)* y *Uplink (UL)*, esto hace que la *MS* pueda recibir o transmitir desde o hacia su *BS* o *RS*. El *DL* o *UL* deben ser seguidos por una o múltiples zonas de *RS*, en donde *BS* y *RS* deben estar en transmisión, recepción o disponible.

La parte de señalamiento es importante ya que nos sirve para delimitar zonas de *RS*, el preámbulo será transmitido por los propios *BS* y *RS* para delimitar zonas de *UL* y *DL*.

En este artículo se parte de la suposición de un planificador (*Scheduling*) y modulación adaptativa perfecta. La introducción de *RS* en la 802.16e nos muestra una mayor capacidad desde el punto de vista de la cantidad de datos o *throughput*.

También muestra que el número de conexiones determina la capacidad de la *MAC*. En la IEEE 802.16e el encabezado es de un 50% de la eficiencia de degradación de la *MAC*, con *MMR* la degradación es aún mayor a medida que las conexiones aumentan.

Gracias al reuso de frecuencias la eficiencia de la *MAC* aumenta en comparación que en donde no se utiliza el reuso cuando se utilizan en ambos casos 4 saltos.

2.2.2 Codificación base para redes multisaltos en IEEE 802.16j [2]

En este artículo se muestra el problema que tienen las estaciones móviles (*Mobile Stations, MS*) cuando se conectan a sus estaciones repetidoras, (*relay stations, RS*) estas sufren significativamente de degradación de *throughput* y de retardo a medida que se incrementan los saltos, especialmente con más de tres saltos.

Se propone un código llamado *Network Coding-based Relay scheme (NC-basedrelay)* que permite combinar múltiples datos en el *wireless backhaul (WB)*, logrando así una sola transmisión en lugar de dos.

Esto se realiza en tres etapas.

- Etapa 1: *Buffering*.
- Etapa 2: *NC* codificador. Codifica los flujos de información mediante una operación XOR.
- Etapa 3: *NC* decodificador. Decodificar datos de una operación XOR.

Se diseñó la estructura del *frame* o *trama*, el cual utiliza diferentes zonas de *RS* que dependen si están en estado de transmisión, recepción o disponible.

Los resultados y análisis muestran un *throughput* de 140% de ganancia y una reducción de retardo de 83%.

2.2.3 Algoritmo de optimización para contenciones en redes IEEE 802.16j [3]

El estándar IEEE 802.16 se utiliza el algoritmo *TBEB* (*truncated binary exponential backoff*) para el proceso de resolución de contenciones. El problema reside en que el estándar no hace diferencia en la ventana de *backoff* entre diferentes prioridades de nodos. El estándar si utiliza diferentes ventanas para diferentes tipos de flujos de servicio, pero el mismo flujo con el mismo servicio utiliza la misma ventana lo cual genera colisión.

Este artículo propone un nuevo algoritmo, el cual minimiza las colisiones en contención en el *initial ranging* (*IR*) y en reservación de ancho de banda (*bandwidth request*, *BWR*). Esto se conforma de dos partes: ofrecer ventanas de contención diferentes para diferentes *SS* (*distributed differentiated contention window algorithm*, *D2CW*) y segundo el soportar diferentes regiones de penalización de espera para dos tipos de prioridades de nodo (nuevos y de *handoff*) (*adaptive waiting-penalty algorithm*, *AWP*) considerando además el retardo para garantizar conexiones en tiempo real (*real time polling service*, *rtPS*).

El análisis está basado en el modelo de cadenas de Markov, el cual se muestra las probabilidades de colisión para diferentes cambios de un estado a otro, para diferentes tipos de prioridad de nodo y anticipar así, si un nodo colisionará o no.

El resultado final dice que *TBEB* funciona bien en condiciones de carga ligera a moderada pero no para tráfico excesivo ya que hay un número grande de colisiones, es por eso que este algoritmo muestra una menor probabilidad de colisión, baja supresión de paquetes y rápido *handoff* en comparación con el estándar IEEE 802.16j.

2.2.4 Evaluación del rendimiento de técnicas de contención para redes WiMAX [4]

En este artículo, se analiza cinco técnicas *CSA* (*Contention Slot Allocators*) para el estándar IEEE 802.16 los cuales son: *Forced-CSA*, *Variable-CSA*, *Multicast-CSA*, *Collision Free-CSA* y *CDMA-CSA*. Estas técnicas ajustan de manera dinámica el número de *slot* de contención necesarios para resolver las colisiones acorde con la carga de tráfico.

El problema radica en que a mayor número de *slot* de contención se tengan se reducen las colisiones, pero también se reduce los *slot* para transmisión de datos y un menor número de *slot* de contención nos provocará mayor número de colisiones sobre todo en tráfico excesivo.

Estas 5 técnicas muestran una técnica de colocar y aumentar *slots* de contención conforme a las necesidades de la red, habiendo así una mejoría en comparación con el algoritmo *TBEB* (*truncated binary exponential backoff*).

Simple-CSA. Esta técnica asigna *slot* de contención a los *slots* que no son usados como *slot* de datos. Con alto tráfico existen pocos *slots* de contención por lo que el riesgo de colisión es alto.

IEEE 802.14-CSA. Utiliza el mismo mecanismo establecido para el estándar IEEE 802.14 (CATV) el cual utiliza colocar de manera variable los *slot* de contención. Ajusta de manera dinámica los *slots* de datos a *slots* de contención.

Forced-CSA. Basado en el algoritmo *splitting tree*, para cada colisión se agrega un nuevo espacio de contención reservado solo para los involucrados en esa colisión en el siguiente mapa de *UL*.

Variable-CSA. Variabilidad dependiendo de la carga de tráfico actual, colisiones, tamaño de paquetes y tamaño de solicitudes, se estima el número de *slots* que deben ser convertidos a *slot* de contención.

Multicast-CSA. Cada vez que ocurre una colisión se asigna una nueva región llamada "*m*" y los involucrados en la colisión solo pueden transmitir en su correspondiente región.

CollisionFree-CSA. Se envía una solicitud *unicast* a los *SS* en una forma de *Round Robin* de tal manera que de forma equitativa se reparte toda el área de contención.

CDMA-CSA. Los *SS* pueden transmitir su solicitud de ancho de banda usando un código de contención, es un pseudocódigo con 64 códigos de contención donde la probabilidad de tener una colisión es baja.

El retardo (*Delay*) se compone de 4 partes importantes, D_q es el retardo de encolamiento debido a la espera de un *SS* por el siguiente *UL-MAP* el cual contiene un periodo de acceso de contención, D_c es el retardo de contención el cual es el tiempo en que un *SS* transmite una petición y este espera a que sea recibido exitosamente mediante una respuesta, en este retardo pueden ocurrir colisiones en el que, por ejemplo, dos *SS* diferentes transmitan su petición en el mismo *slot* de contención, este es el retardo que más se busca reducir. D_g es el retardo de reservación el cual es el tiempo en que el *scheduler* en la estación base (*BS*) tarde en conceder la reservación para el *SS*. El retardo D_{tx} representa el tiempo actual de la transmisión de los paquetes desde la *SS*.

Por lo tanto, el retardo promedio de acceso (*mean access delay*) es la suma de los retardos anteriormente mencionados: $D=Dq + Dc + Dg + Dtx$.

El análisis final muestra que existe una mejora con estas cinco técnicas en las que para el *throughput*, la técnica de *Collision Free-CSA* fue la que mejor obtuvo el valor teórico esperado en comparación con *CDMA-CSA* y *Variable-CSA* que fue de las más bajas en comparación. En términos de *Mean Access Delay* hubo una mejoría significativa ya que para *CDMA-CSA* fue el que menor retardo mostró mientras que para *IEEE 802.14-CSA* y *Variable-CSA* se obtuvo el mayor retardo. Para las técnicas *Multicast-CSA*, *Collision Free-CSA* y *Forced-CSA* son las que se mantienen en un rango promedio y solo requieren un mínimo de software.

2.2.5 Optimización de reservación de ancho de banda y colocación de RS en IEEE 802.16j [5]

Este artículo presenta una estructura de la *trama* optimizada, junto con el mecanismo de reservación de ancho de banda y colocación de la RS en una red MMR (*Mobile Multihop Relay*), para maximizar así la utilidad.

Los usuarios toman de manera dinámica la decisión de transmitir hacia la estación base (BS) o por medio de *relay* (RS) mediante un algoritmo el cual en cada iteración también se considera la cantidad de ancho de banda en la RS.

Para reservar y optimizar el ancho de banda para la transmisión de la RS y la BS se utiliza un proceso de decisión de Markov el cual toma de manera dinámica a los usuarios que transmiten hacia la BS o hacia la RS.

El colocar la RS de manera óptima no solo minimiza el costo de instalación, maximiza la ganancia de los usuarios activos que transmiten por la RS. Debido a la incertidumbre del número de usuarios activos en el área de servicio, se formula un programa estocástico.

Después de analizar los resultados, se observa que el mejor lugar para colocar el RS está determinado por el promedio de número de usuarios activos conectados a la RS. Basado en esta ubicación, la cantidad de reservación de ancho de banda es optimizada, por lo que claramente el colocar el RS basado en un programa logra una mayor ganancia.

2.2.6 Probabilidad de colisión en la etapa de *ranging* [6]

Este artículo habla sobre los parámetros que intervienen cuando un *SS* colisiona al tratar de enviar un mensaje o petición a su *BS*. Donde ocurre la mayor probabilidad de que ocurra una colisión es en la etapa de *ranging*, esta etapa es parte del procedimiento de control de admisión, consiste cuando un *SS* ajusta los parámetros con los cuales el *SS* trabajara con la *BS*, esos parámetros son: sincronización y ajuste de potencia de señal.

Existen cuatro tipos de *ranging*: *ranging* inicial, *ranging* periódico, *ranging* de petición de ancho de banda y *ranging* de *handoff*. Durante el proceso de *ranging* se utiliza códigos *CDMA*, estos códigos nos sirven para disminuir la interferencia o colisión cuando un usuario selecciona un espacio reservado (*slot*) con un código *CDMA* escogido aleatoriamente. Cuanto mayor sea el número de códigos *CDMA* disponibles, mayor será la oportunidad de transmitir, la desventaja es que existe un número limitado de códigos para esta etapa y se necesita además equipos más complejos y costosos.

Otro parámetro importante es la ventana de contención, esta ventana define el número de oportunidades de transmisión presentes durante el *frame* o *trama*, este aumenta en factor de 2, cuanto mayor sea la ventana de contención, mayor será el tiempo de espera para un *SS*, por lo que aumentará el retardo o tiempo de espera.

Se analiza y varía los parámetros de ventana de contención, número de usuarios y número de códigos *CDMA* utilizados. Se obtuvieron diferentes modelos y resultados de probabilidad de colisión al variar los parámetros anteriormente descritos.

Se llegó a la conclusión de que los principales puntos o parámetros a tomar en cuenta para poder disminuir la probabilidad de colisión depende de tres dominios: *CRA* (algoritmo de resolución de contención) donde se duplica la ventana de contención cada vez que un *SS* colisiona, número disponible de códigos *CDMA* para *ranging* y el número de usuarios presentes en la red. Para obtener una oportunidad de transmisión exitosa, se necesita trabajar en estos tres dominios para disminuir la colisión.

2.2.7 Prioridad de ancho de banda en redes IEEE802.16j [7]

En este artículo se propone la idea de priorizar a usuarios que tengan aplicaciones o servicios de mayor importancia que los usuarios que tengan servicios de menor importancia. El esquema *TBEB* (*truncated binary exponential backoff*) no soporta prioridad de transmisión de datos, por lo que se propone que datos con mayor prioridad tenga un mayor éxito de transmitir que los que tienen una prioridad menor.

Esto quiere decir que los usuarios con diferentes prioridades para transmitir datos utilizan el mismo *TBEB*, causa una misma probabilidad de colisión para ambas prioridades (alta y baja), por lo que esto afecta más a datos con la mayor prioridad que el resto.

Esto se realiza en un escenario donde existe repetidores (*RS*), debido a esto, existe dos tipos de modos de operación dentro de los *RS*, modo transparente y modo no transparente. En el modo transparente, el *RS* solo puede aceptar mensajes que son para la *BS* mediante el reenvío de ellos. El modo no transparente, genera además sus propios mensajes hacia el *SS*. El propósito de utilizar *RS* es de incrementar la cobertura para modo transparente. El modo no transparente es más complicado que el modo transparente debido a que aumenta el *throughput*.

En este artículo se utiliza el modo transparente con planificación centralizada, por lo que pone el control de todos los mensajes de los *SS* en el *MR-BS (Multi-Hop Base Station)*.

Este esquema utiliza dos métodos para aumentar la probabilidad de éxito para datos con mayor prioridad, el primero es que cuando los datos de alta prioridad tratan de transmitir, utiliza dos códigos *CDMA* simultáneos en diferentes *slots* al mismo tiempo, por el contrario para datos de baja prioridad, se utiliza un solo código *CDMA* en un solo *slot*. El segundo método consiste en aumentar el número de códigos de *ranging* para los datos de alta prioridad, de tal manera que sea mayor el número de códigos *CDMA* para datos de alta prioridad en comparación con los datos de baja prioridad. Como resultado, se busca reducir la probabilidad de colisión para datos de alta y baja prioridad.

Se realizaron dos escenarios, uno donde los usuarios con datos de alta prioridad sea el 40% del total de números de usuario, siendo así el 60% restante para datos de baja prioridad. El segundo escenario consiste en donde el 60% son para datos de alta prioridad mientras que el 40% restante sea para datos con baja prioridad.

Se concluyó que sin importar el número o porcentaje de usuarios *SS* con datos de alta y baja prioridad, el promedio de tiempo de contención, el promedio de retardo y *throughput* se ven mejorados significativamente para datos de alta prioridad en comparación con el *TBEB* utilizado actualmente. Para los datos de baja prioridad, se dice que no existe una desventaja grande ya que estos datos pueden soportar tiempos de retardo mayores por lo que el impacto al rendimiento a la red es mínima.

2.2.8 Análisis del rendimiento de repetidores (RS) transparentes y no transparentes en redes multisaltos WiMAX [8]

En este artículo se analiza el rendimiento de la red cuando se utiliza el modo transparente y modo no transparente para comparación. Existen varios tipos de *relay* dependiendo donde se desplieguen. Están los RS que están desplegados de manera fija, se utilizan para aumentar la cobertura en los bordes de la célula, proveyendo así cobertura en áreas donde no hay debido a sombras de cobertura como por ejemplo dentro de edificio y/o diferentes obstrucciones de señal. Están también los RS situados dentro de edificios, túneles o bajo tierra, generalmente son simples y baratos, pueden ser fijos o portables y pueden ser reposicionados en cualquier momento. Además esta los RS en configuración *Ad-hoc*, los cuales no son fijos y suelen ser temporales, solo cuando un gran evento ocurre, se necesita que los RS le ayuden al BS o MR-BS a aumentar la cobertura y capacidad de la red. El último tipo es cuando se utilizan RS móviles, colocados en vehículos, trenes, etc, estos proveen un acceso fijo a SS móviles que se mueven dentro o hacia la cobertura del RS.

Existen dos modos diferentes de *relay*, el modo transparente y el modo no transparente, en donde el modo no transparente es utilizado principalmente para mejorar la capacidad de la red, mientras que el transparente es utilizado para aumentar la cobertura de la red. Dos diferentes mecanismos de asignación de recursos y de planificación son especificados para cada modo. La comparación de estos dos modos se muestra en la tabla 2.1.

| IEEE 802.16j | Modo Transparente | Modo No Transparente |
|-------------------------------------|-------------------|--------------------------|
| Planificador | Centralizado | Centralizado/Distribuido |
| Número de saltos | 2 | 2 o mas |
| Rendimiento | Alto | Bajo |
| Extender cobertura | No | Si |
| Costo/Complejidad | Bajo | Alto |
| Reenvío de información de la trama. | No | Si |

Tabla 2.1 Comparación entre modo transparente y modo no transparente.

Se analiza el rendimiento del *throughput* en transmisiones de UL (enlace de subida) y DL (enlace de bajada), empleando *half-duplex* y *full-duplex*, con ambos modos transparente y no transparente, con un planificador (*Schedule*) centralizado.

El estudio muestra que se obtiene una tasa de 0.491 Mbps para *UL*, mientras que para el *DL* se obtiene una cifra casi 10 veces mayor para ambos modos transparente y no transparente. Los resultados se muestran en la tabla 2.2.

| Comportamiento de <i>SS</i> | Promedio <i>Throughput</i> | |
|-------------------------------|----------------------------|------------------------------|
| | <i>Relay</i> transparente | <i>Relay</i> no transparente |
| Estacionaria (<i>UL/DL</i>) | 0.471 / 4.456 | 0.471 / 4.457 |
| Móvil (<i>UL/DL</i>) | 0.471 / 4.444 | 0.471 / 4.442 |
| Eficiencia | 98.42% | 98.41 % |

Tabla 2.2 Resumen del promedio del *throughput*.

La selección del tipo del modo de *relay* es crucial para la administración y manejo de la red para optimizar el rendimiento del *throughput*,

2.2.9 Análisis de *throughput* en repetidores transparentes y no transparentes para redes multisaltos *WiMAX* [9]

Mientras la tecnología *WiMAX* avanza, las especificaciones para multisaltos en *RS* fue introducida para satisfacer las necesidades y/o demanda de extensión de cobertura y mejoramiento de la capacidad de la red, proveyendo así buena cobertura y maximizando el *throughput*. Existen varios tipos de estaciones repetidoras (*RS*), *RS* fijas, *RS* móviles, *RS* dentro de edificios, *RS* portables y Ad-hoc *RS*.

Las ventajas de una red multisaltos *RS* son menos complejas de diseñar e implementar que una *BS*, bajando así el costo total del sistema y habilitando un rápido despliegue. Múltiples *RS* entre el *SS* y *BS* son soportados.

Existen dos modos, el modo transparente y el modo no transparente, el primero aumenta la capacidad de la red mientras que el segundo mejora la cobertura de la red.

En este artículo, se realizó un análisis y simulación para observar el *throughput* de transmisiones de *UL* y *DL* en estaciones *SS* móviles y fijas con velocidades de *half* y *full dúplex*. Además se utilizó los dos modos, transparente y no transparente, con admisión de control centralizada.

Se concluyó que para ambos modos, el mayor rendimiento es para transmisiones de *DL*, debido a que los usuarios están más interesados en descargar datos que en subir datos. La tasa sostenida para las transmisiones de *UL* fue de 0.471 Mbps y para el *DL* fue cinco veces mayor en comparación para ambos modos transparente y no transparente.

2.2.10 Asignación multinivel de recursos en redes WiMAX [10]

Esta investigación plantea el problema que se tiene cuando se utilizan *RS* en una red, esto es la asignación de recursos, los *RS* generan su propio tráfico el cual debe ser transportado a través de la red, cuando se tiene una red con dos o más *RS*, cada *RS* transporta el tráfico de datos y señalización de los *MS* pero incluyendo ahora el tráfico de *RS* subordinadas, además cada *RS* genera varios caminos o trayectorias para llegar a diferentes *MS*, esto presenta un problema para asignar los recursos que son escasos y más cuando se tiene una red con muchos usuarios *MS* junto con *RS*.

Para resolver ese problema, se desarrolló un mecanismo multinivel de asignación de recursos (*multi level utility-based resource allocation, ML-URA*) el cual consiste en utilizar de manera efectiva los recursos de asignación, sin importar el número de *RS* y *MS*, utilizando así cualquier topología.

Consiste en encontrar y seleccionar el camino donde se encuentra el mayor número de *MS* y *RS* a través de la red hasta llegar a uno o varios *MS*, asignar los recursos acorde a el camino escogido, marcar a *MS* como servidos, y los recursos restantes se repartirán entre los demás caminos hacia los diferentes *MS* que no han sido marcados o servidos, creando así una distribución más adecuada de los recursos en la red.

Los resultados obtenidos muestran una eficiencia máxima en la asignación de recursos en cada paso del mecanismo *ML-URA*. Además se redujo el costo de procesamiento para encontrar el mejor camino o trayectoria hacia los *MS*. Este trabajo no considera el factor de reuso espacial, movilidad y variaciones en el canal para *MS*.

2.2.11 Perspectiva general de las redes IEEE 802.16j [11]

Este artículo muestra un panorama general sobre los aspectos más importantes del estándar IEEE 802.16j, el cual consiste en la introducción de estaciones repetidoras (*RS*) para el reenvío de datos desde el *MS* al *BS* y viceversa, con la introducción de *RS* se tiene una mayor cobertura e incrementa la capacidad de la red para soportar a un mayor número de usuarios.

En la siguiente tabla 2.3, se muestra las principales diferencias que tiene el estándar IEEE 802.16j sobre la versión anterior (IEEE 802.16e).

| Estándar | IEEE 802.16e | IEEE 802.16j |
|-----------------------|--------------|--|
| Saltos | Un salto | Multisaltos |
| Tráfico agregado | No | Si, sobre la trayectoria multisalto |
| Capacidad del sistema | Bajo | Mayor dentro de la cobertura de la <i>BS</i> |
| Cobertura | Menor | Mayor |
| Costo | Mayor | Menor |
| Soporta movilidad | Si | Si |

Tabla 2.3 Principales diferencias entre el estándar IEEE 802.16e y el estándar IEEE 802.16j.

El estándar IEEE 802.16j define dos modos principales de operación, el modo transparente y el modo no transparente, su principal diferencia es como la información del *frame* o *trama* es transmitida, en el modo transparente no se transmite información de encabezado, en el modo no transparente se transmite información de encabezado, la información de encabezado es debido a que en el modo no transparente cada *RS* genera su propia información de *trama* por lo que entre más *RS* se utilicen, mayor será la información a transportar por lo que no es factible utilizar de manera desmesurada el uso de *RS*.

| | <i>RS</i> transparente | <i>RS</i> no transparente |
|-------------------------------|------------------------|---------------------------|
| Saltos | Uno | Dos o mas |
| Extensión de cobertura | No | Si |
| Interferencia entre <i>RS</i> | Bajo | Alto |
| Costo | Bajo | Alto |
| Planificador | Centralizado | Centralizado/Distribuido |

Tabla 2.4 Comparación entre modo transparente y no transparente.

Existen dos tipos de planificador (*Scheduling*), modo centralizado y modo distribuido, en el modo centralizado la *BS* es la que se encarga de planificar y asignar los recursos de ancho de banda, en el modo distribuido el *RS* tiene cierta autonomía para tomar decisiones sobre los *MS* conectados para el mejor aprovechamiento de los recursos de la red.

Debido a que existen dos modos de operación, se necesita dos tipos de *frame* o *trama*, los cuales se ajustan a las necesidades de operación, la principal diferencia entre estos dos tipos de *trama* es el modo en que se reparte y asignan áreas dentro de este, esto se analiza a detalle en el Capítulo III.

2.3 Conclusión

El estándar IEEE 802.16 define a detalle cómo opera la tecnología *WiMAX*, dentro de esta tecnología, existe una amplia área de investigación, en la cual se puede implantar mejoras para optimizar y hacerla más robusta.

En este capítulo se mostró algunos de los trabajos presentados en la IEEE sobre el área de resolución de colisiones, los cuales presentan resultados satisfactorios, estos trabajos pretenden aportar al estándar IEEE 802.16j nuevas oportunidades de desarrollo para implantar nuevas ideas y crear nuevas áreas de investigación.

En cada uno de los artículos descritos en este capítulo, tratan o buscan solución a diversos problemas y deficiencias del estándar mediante el uso de herramientas matemáticas apoyadas con simuladores de red avanzados, los resultados obtenidos se comparan con lo que está establecido en el estándar para mostrar así la existencia de alguna mejora u optimización.

En este trabajo de tesis se busca hacer algo similar, mostrar diversas técnicas de resolución de colisiones y compararla con la propuesta, obteniendo así diferentes resultados para su posterior análisis.

Cabe mencionar, que dentro de estos artículos, muy pocos son los que usan *RS* como parte de su propuesta, esto es debido a que el uso de *RS* en la tecnología *WiMAX* son relativamente nuevos, por lo que existe una gran área de desarrollo, es por eso que se propone, además de las existentes, una nueva implementación y optimización en donde se toma ventaja del uso de *RS* junto con códigos *CDMA* en la red la cual se mostrará en el Capítulo V de este trabajo de tesis.

Capítulo III

Descripción del Estándar

IEEE 802.16j

3.1 Introducción

El estándar IEEE 802.16j [14] es una ampliación del estándar IEEE 802.16 (llamado comercialmente como *WiMAX*), el cual agrega en esta versión, el uso de *Relay Station (RS)* o estaciones repetidoras para redes multisalto (múltiples saltos)[15], esta norma establece la interfaz aérea para el acceso inalámbrico de banda ancha (*BWA*) incluyendo el control de acceso al medio (*MAC*) y capa física (*PHY*).

La banda de 10 a 66 GHz es la frecuencia de operación para línea de vista (*line of sight, LOS*) debido a la longitud de onda corta, se utiliza anchos de banda típicos de 25 MHz o 28 MHz. La modulación que se utiliza es de única portadora (*Single-Carrier*) llamada "WirelessMAN".

Para frecuencias por debajo de 11 GHz, debido a longitud de onda más largos, el uso de múltiples trayectorias es más apropiado para operar sin línea de vista (*non line of sight, NLOS*).

RS o estaciones repetidoras multisaltos (*Multihop Relay, MR*) es una implementación que se utiliza para incrementar cobertura o como una ventaja en el rendimiento para acceder a la red [15]. Es importante mencionar que en redes con *MR*, la *BS* puede ser reemplazada por un *relay* multisaltos *BS (MR-BS)* el cual sirve como *RS* y *BS* dependiendo de las necesidades y esquema de red en el que se encuentre.

El tráfico de datos y señalización entre estación suscriptora (*Subscriber Station, SS*) y su *BS* o *MR-BS* son retransmitidas por el *RS*, extendiendo así la cobertura y el rendimiento en redes donde se encuentran presentes las *RS*. Cada *RS* está bajo la supervisión o mando de un *BS* o *MR-BS*.

En un sistema de más de dos saltos (modo no transparente), tráfico y señalización entre un *SS* y un *MR-BS* pueden ser también transmitidos a través de un *RS* intermediario, ver figura 3.1.

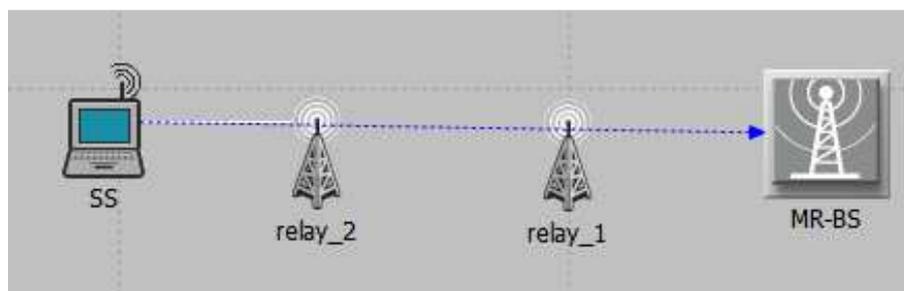


Figura 3.2 Uso de *RS* intermediario en una red *MR* de tres saltos.

Existen dos modos diferentes de programación o planificador (*Scheduling*), centralizado y distribuido, estos son especificados para controlar la asignación de anchos de banda para un *SS* o un *RS*. En modo centralizado, la asignación de ancho de banda para una estación *RS* subordinada está a cargo de *MR-BS* o *BS*, por el contrario, para el modo distribuido, la asignación de ancho de banda de una estación *RS* subordinada está determinada por la *RS* que le precede en cooperación con el *MR-BS*.

Existen dos diferentes tipos de *RS*, llamados transparentes y no transparentes. Un *RS* no transparente puede operar en ambos modos centralizado y distribuido, mientras que el *RS* transparente puede operar solamente en el modo centralizado.

Un *RS* transparente se comunica con la estación de orden superior (*BS* o *MR-BS*) y estaciones subordinadas usando la misma frecuencia de portadora. Un *RS* no transparente, puede comunicarse con estaciones de orden superior y estaciones subordinadas usando la misma o diferente frecuencia de portadora.

En este capítulo se describe la capa física (*PHY*) y la capa de control de acceso al medio (*MAC*) descritas en el estándar IEEE 802.16j. Es importante referirse al glosario donde se define algunos términos frecuentemente utilizados.

3.2 Capa física (*PHY*)

La capa física está definida en *OFDMA* (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*) o Acceso Múltiple de División de Frecuencia Ortogonal, basada en *OFDM* (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*), esta designada para operar principalmente en condiciones de *NLOS* (sin línea de vista), banda de frecuencia por debajo de 11GHz y soportando portadoras de 128, 512, 1024 y 2048 facilitando así el soportar diversos canales de ancho de banda.

3.2.1 Descripción en el dominio del tiempo y frecuencia

La transformada inversa de Fourier (*FFT*) crea una forma de onda *OFDMA*, el tiempo de duración es referido al tiempo útil de símbolo T_b . Una copia del último tiempo de guarda T_g del periodo útil de símbolo, denominado prefijo cíclico (*CP*), es usado para reunir o recoger múltiples trayectorias, mientras se mantiene la ortogonalidad de los tonos, ver figura 3.2.

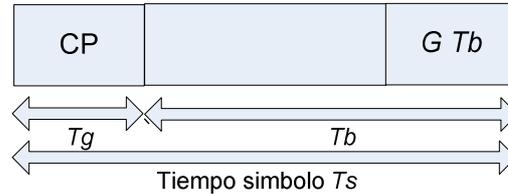


Figura 3.2 Estructura de tiempo de un símbolo OFDMA.

Durante la inicialización, el SS debe buscar todos los posibles valores de CP hasta encontrar el CP utilizado por el BS. El SS debe utilizar el mismo CP en el UL. Una vez especificado la duración de CP escogida por la BS para operar en el DL, no debe ser este cambiado. El cambiar el valor CP forzara a la SS a volver a sincronizarse con la BS.

Un símbolo OFDMA está constituido por sub portadoras, ver figura 3.3, el cual determina el número FFT utilizado. Existen cuatro tipos de sub portadoras:

- Sub portadoras de datos: Para transmisión de datos.
- Sub portadoras piloto: Para varios propósitos de estimación de canal.
- Sub portadora nula: No hay transmisión, para bandas de guarda.
- Sub portadora DC: Corriente directa.

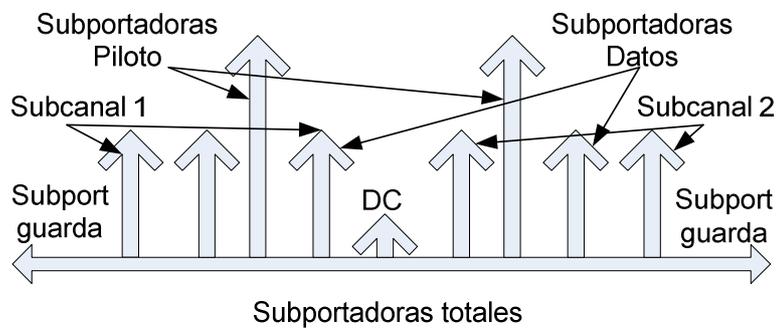


Figura 3.3 Sub portadoras OFDMA.

En el modo OFDMA, las sub portadoras activas están divididas en subconjuntos de sub portadoras, cada subconjunto es llamado sub canal. En el DL, un sub canal puede estar destinado para diferentes grupos de receptores; en el UL, un transmisor puede estar asignado a uno o más sub canales, varios transmisores pueden transmitir simultáneamente.

El símbolo está dividido en sub canales lógicos para soportar escalabilidad, acceso múltiple y un arreglo avanzado de antenas con capacidad de procesamiento.

3.2.2 Slot y región de datos

Un *slot* en *OFDMA PHY* requiere tiempo y dimensión de sub canal para completarse, y es la mínima unidad posible de asignación de datos. La definición de un *slot OFDMA* depende de la estructura del símbolo *OFDMA*, el cual varía para *UL* y *DL*.

En *OFDMA*, una región de datos es una asignación de dos dimensiones de un grupo de sub canales contiguos junto con un grupo de símbolos *OFDMA* contiguos. Todas las asignaciones se refieren a sub canales lógicos. Una asignación de dos dimensiones se observa en la figura 3.4.

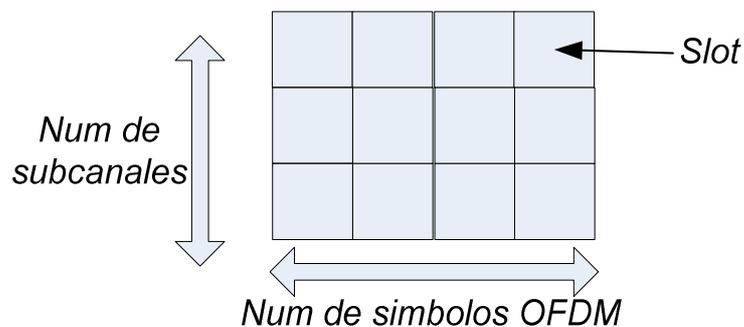


Figura 3.4 Ejemplo de una región de datos que define una asignación *OFDMA*.

Cada *trama* de *DL* y *UL* está dividido en *slots* o ranuras de tiempo. La capa física (*PHY*) es responsable de la asignación de *slots* y el envío de ellos.

3.2.3 Mapeo de los datos en *OFDMA*

Los datos provenientes de la capa *MAC* deben ser procesados y mapeados (asignados) en una región de datos *OFDMA* para *Downlink (DL)* y *Uplink (UL)* como se describe a continuación:

Para *DL*:

1. Segmentar los datos en bloques de tamaño adecuado para que encajen dentro de un *slot OFDMA*.

2. Cada *slot* debe abarcar un sub canal en el eje de sub canales y uno o más símbolos *OFDMA* en el eje del tiempo, se mapea los *slots* para que el *slot* numerado más bajo ocupe el sub canal más bajo en el símbolo *OFDMA*, Ver figura 3.5.
3. Continuar el mapeo para que el sub canal *OFDMA* se incremente, cuando el límite de la región de datos es alcanzado, continuar el mapeo desde el menor sub canal *OFDMA* numerado en el siguiente símbolo disponible.

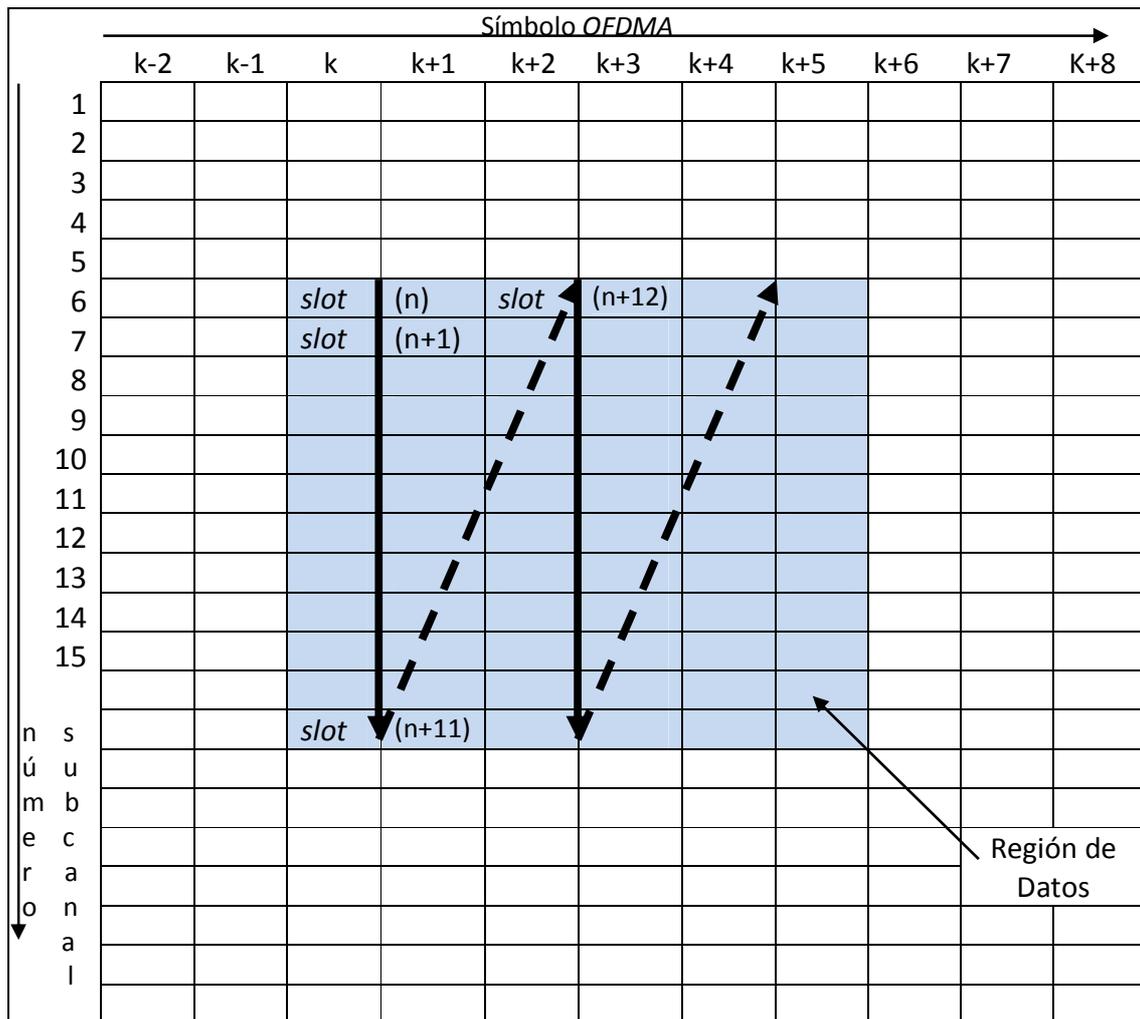


Figura 3.5 Ejemplo de mapeo de los *slots* *OFDMA* a sub canales y símbolos en el DL.

Para *UL*:

El mapeo del *UL* consiste en dos pasos. En el primer paso, los *slots OFDMA* asignados a cada ráfaga son seleccionados. En el segundo paso. Los *slots* asignados son mapeados.

Paso 1. Asignar *slots OFDMA* por ráfagas.

1. Segmentar los datos dentro de bloques dimensionados para ajustarse dentro de un *slot OFDMA*.
2. Cada *slot* debe utilizar el ancho de un sub canal en el eje de los sub canales y uno o más símbolos OFDMA en el eje del tiempo en el menor sub canal numerado.
3. Continuar la asignación tal que el eje de los símbolos OFDMA es incrementado. Cuando el límite de la zona de *UL* es alcanzado, continuar con la asignación desde el menor símbolo OFDMA numerado en el siguiente sub canal disponible.
4. La asignación en el *UL* es creada mediante la selección de un número entero de *slots* contiguos. El resultado es una estructura de ráfaga mostrada en el área sombreada de la figura 3.6.

Paso 2. Mapear los *slots OFDMA* dentro de la asignación de *UL*.

5. Mapear los *slots* para que el *slot* con el menor número ocupe el sub canal con el menor número en el menor símbolo OFDMA numerado.
6. Continuar con el mapeado mientras el índice en el eje de sub canales se incrementa. Cuando el último sub canal es alcanzado, continuar con el mapeado con el menor sub canal numerado en el siguiente símbolo OFDMA que pertenece a la asignación de *UL*. El resultado se muestra en la figura 3.6.

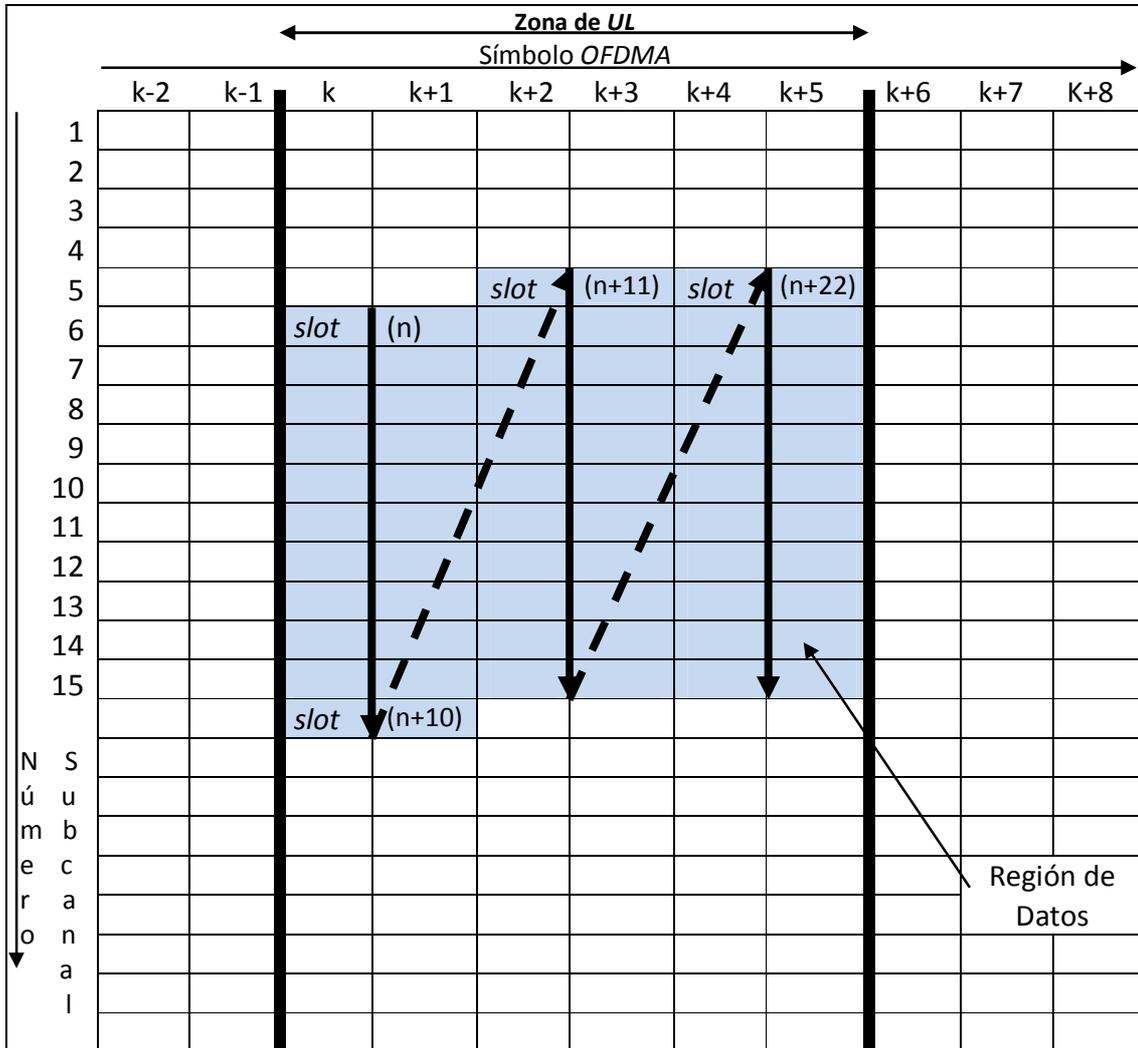


Figura 3.6 Ejemplo del mapeo de los slots OFDMA a sub canales y símbolos en el UL.

3.2.4 Estructura de la trama

Para tener un uso flexible del espectro, se utilizan dos técnicas de duplexación, las cuales son: duplexación por división de tiempo (*Time Division Duplexing, TDD*) y duplexación por división de frecuencia (*Frequency Division Duplexing, FDD*), la elección de cualquiera de estas dos técnicas puede afectar ciertos parámetros y características de la capa PHY.

3.2.4.1 Duplexación por división de frecuencia (FDD)

En el modo de operación *FDD* (*Frequency Division Duplex*) los canales *UL* y *DL* están separados a diferentes frecuencias contiguas y se transmiten al mismo tiempo, ver figura 3.7.

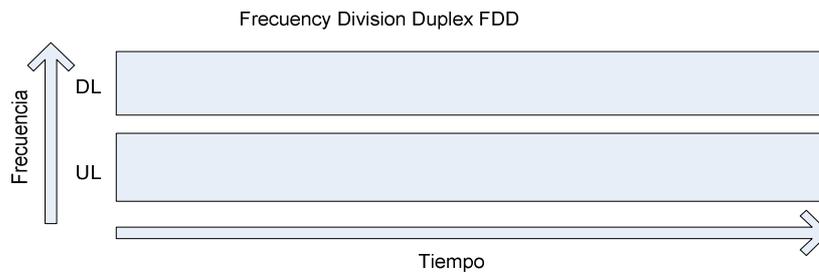


Figura 3.7 Duplexación por división de frecuencia.

Un *frame* o *trama* de duración fija, el cual facilita la asignación de ancho de banda, es usado para ambas transmisiones de *UL* y *DL*. Esto facilita el uso de diferentes tipos de modulación, la *BS* que trabaja con sistemas *FDD* operan en modo *full-dúplex*, la estructura de la *trama* de *FDD* permite soportar velocidades de transmisiones *full-duplex* y *half-duplex*.

3.2.4.2 Duplexación por división de tiempo (TDD)

Para el modo *TDD* (*Time Division Duplex*), la trasmisión *UL* y *DL* ocurren en diferentes *slot* o ranuras de tiempo pero en la misma frecuencia. Ver figura 3.8.

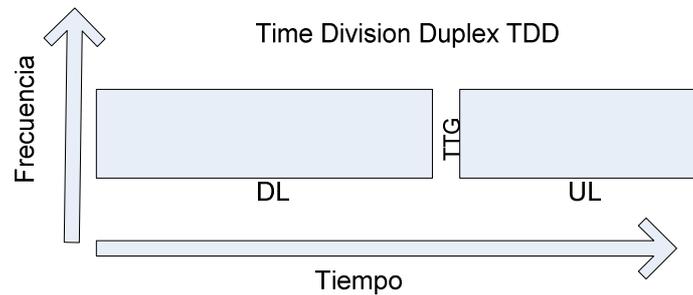


Figura 3.8 Duplexación por división de tiempo.

Un *frame* o *trama* *TDD* tiene una duración fija y contiene una sub *trama* de *UL* y una sub *trama* de *DL*, la separación entre *DL* y *UL* es un parámetro llamado *TTG* (*time to guard*) y es controlado por capas superiores dentro del sistema.

Cuando se implementa un sistema *TDD*, la estructura de la *trama* está construida desde las transmisiones entre *BS* y *SS*. Cada *trama* comienza con la transmisión de la zona de *DL*, seguido por un periodo o espacio de tiempo (*time to guard, TTG*), para después transmitir la zona de *UL*.

El tiempo de guarda (*time to guard, TTG*) es un espacio entre la ráfaga de *DL* y la subsecuente ráfaga de *UL*. Este espacio permite a la *BS* el cambiar de modo transmisión a modo recepción. Durante este espacio o lapso de tiempo, la *BS* no transmite datos modulados, sino simplemente permitiendo al transmisor de la *BS* apagarse, la antena *Tx/Rx* (Transmisión/Recepción) cambia su modo de operación, brindando así el tiempo suficiente para que la sección receptora *Rx* de la *BS* se pueda activar.

La mayoría de las implementaciones de *WiMAX*, se utiliza más el modo *TDD*. Las razones son que *TDD* utiliza la mitad del espectro comparado con *FDD*, lo que repercutirá en el ancho de banda, el sistema *TDD* es menos complejo y de menor costo. La primera versión de los perfiles de *WiMAX* fijo se utilizan tanto *TDD* y *FDD*, mientras que *WiMAX* móvil sólo incluyen *TDD*.

3.2.5 Estructura de la sub trama de UL y sub trama de DL en modo TDD

En *TDD* la *trama* o *frame* se divide en una parte *DL* y en otra *UL* (*slots* de tiempo) de aproximadamente el 60% para *DL* y el otro 40% restante para el *UL*. En la figura 3.9 se observa cómo está constituido la *trama TDD* por la sub trama de *DL* y *UL*.

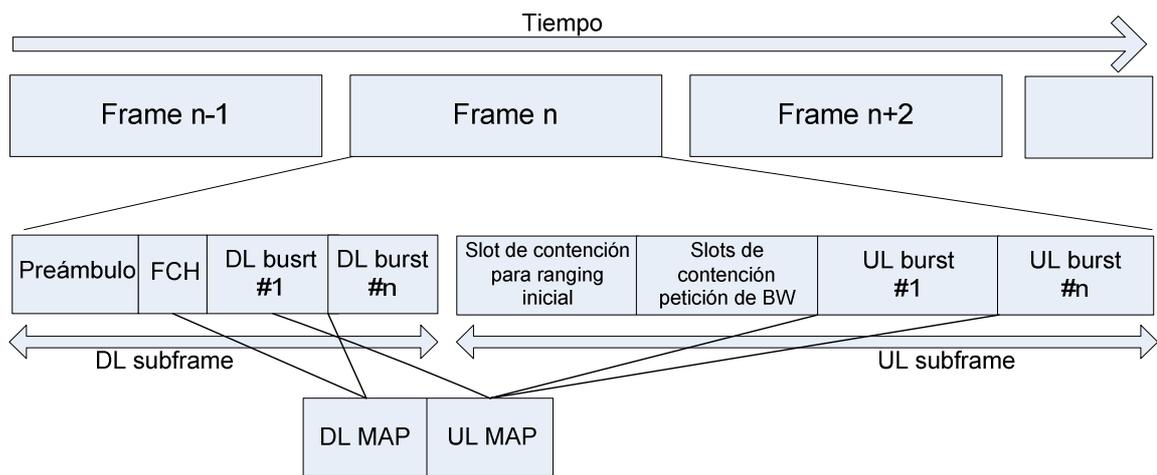


Figura 3.9 Sub trama DL y UL en modo TDD.

La sub *trama* de *DL* empieza con un preámbulo el cual es para sincronización y valores iniciales. El preámbulo de *DL* es seguido por una cabecera de control de *trama* (*frame control header, FCH*), que proporciona información sobre la configuración de la *trama*, tal como la longitud de los mensajes de mapa de *UL* y *DL* (*DL MAP* y *UL MAP*, mensajes que informan la estructura de cada *trama*), modulación, esquema de codificación y las sub portadoras que se pueden utilizar. Después de la cabecera *FCH*, siguen los perfiles de las ráfagas para una o varias *SS* transportando información solicitada por las *SS*.

Varios usuarios son asignados en regiones de datos dentro de la *trama*, estas asignaciones se especifican en los mensajes *MAP*, que contienen el perfil de la ráfaga para cada estación *SS*, definiendo el esquema de modulación y codificación usado en la conexión.

La sub *trama* de *UL* está compuesta por tres zonas importantes. La primera zona son *slots* o ranuras de contención para calibración y mantenimiento, utilizada para el proceso de registro e inicialización en la red. La segunda área de *slots* de contención es para que las *SS* realicen sus peticiones de ancho de banda. La última área consiste en una o varias regiones reservadas donde las *SS* envían sus datos.

3.2.6 Estructura de la *trama* en modo transparente

Un ejemplo de la sub *trama* *MR-BS* se muestra en la figura 3.10

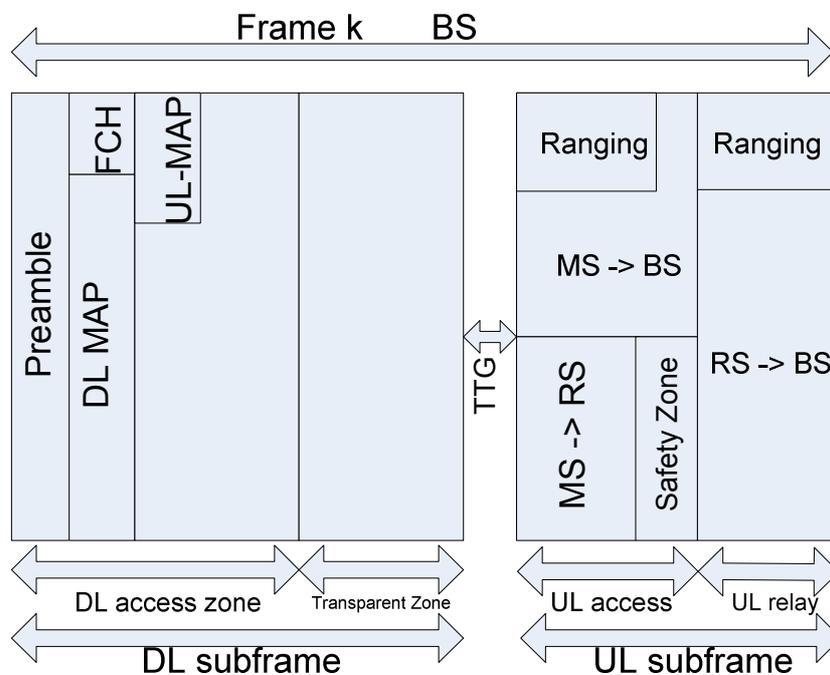


Figura 3.10 Estructura de la *trama* *BS* en modo transparente [15].

Para este modo, cada *trama* de la transmisión de DL empieza con un preámbulo seguido de un *FCH*, *DL-MAP* y posiblemente *UL-MAP*. *R-MAP* está ubicado en el *MAP* o definido como una extensión del mismo *MAP*. La estructura de la *trama* se compone del periodo de la sub *trama* de DL y un periodo opcional de la sub *trama* de UL. Encada una de ellas, el *TTG* (tiempo de guarda) es insertado entre el la sub *trama* de DL y la sub *trama* de UL. Los *RTG* deben estar al final de cada *trama*.

El sub canal de *ranging* en la zona de acceso es utilizado por las *RS* para el *ranging* inicial y los *SS* para todas las operaciones de *ranging*. El sub canal de *ranging* en la zona de *relay* o repetidor utilizado por las *RS* para operaciones de *ranging* que no sea *ranging* inicial.

La sub *trama* de DL incluirá una zona de acceso y puede incluir una zona transparente para transmisiones de *RS* hacia el *SS*. El *MR-BS* también puede transmitir en la zona transparente. El sub *frame* o sub *trama* de UL puede incluir una zona de acceso UL y una zona de *relay* UL.

Un ejemplo de la sub *trama* *RS* se muestra en la figura 3.11

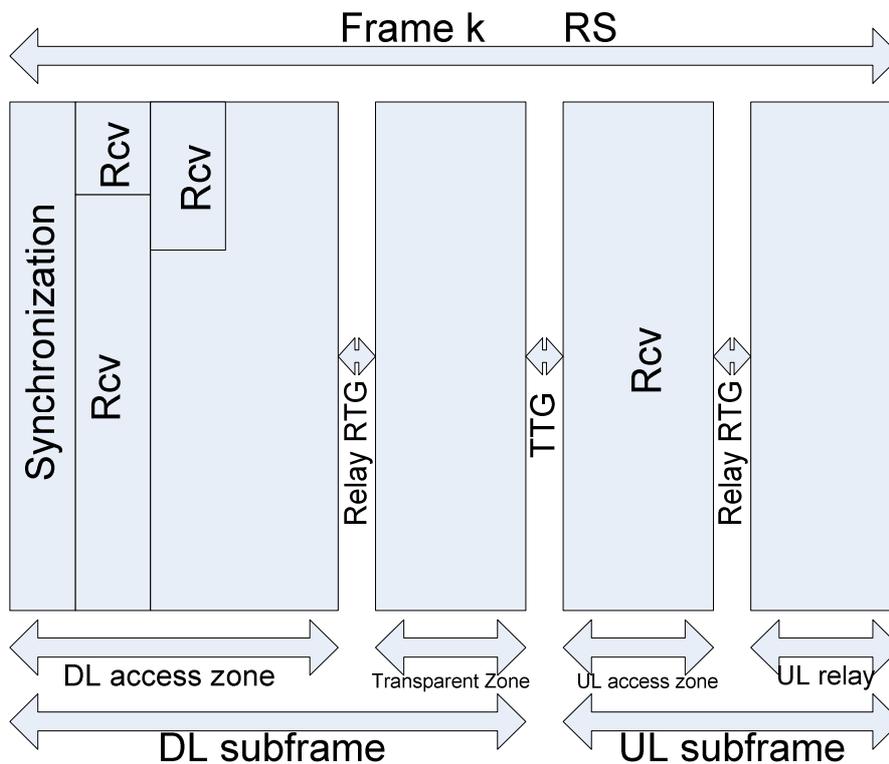


Figura 3.11 Estructura de la *trama* *RS* en modo transparente [15].

Un *RS* transparente no transmite el preámbulo, *FCH* y *MAP* al inicio de la *trama*. En su lugar recibe el preámbulo, *FCH* y *MAP* y transmisión opcional *R-MAP* desde el *MR-BS*.

La asignación detallada de un *RS* en la zona de acceso se indica con un mensaje de *MAP* y en la zona de *relay* por un mensaje de *R-MAP*. En cada *trama*, el *TTG* se insertará entre la sub *trama* de *DL* y *UL*. Un *RTG* se añade al final de cada *trama*.

La sub *trama* de *DL* incluirá una zona de acceso para *MR-BS* hacia *RS* y transmisiones de *SS*, pueden incluir una zona transparente para *RS* hacia transmisiones de *SS*. La sub *trama* de *UL* puede incluir una zona de acceso y puede incluir una zona de *relay* para la *RS* hacia transmisiones de estaciones de orden superior (*BS*).

El sub canal de *ranging* en la zona de acceso es utilizado por los *SS* para todas las operaciones de *ranging*.

3.2.7 Estructura de la *trama* en modo no transparente

Dos enfoques para soportar la transmisión se especifican para *TTR RS* (*time-division transmit and receive*, mecanismo de *relay* donde las transmisiones y recepciones a estaciones subordinadas o a las estaciones superordinadas son separadas en tiempo). Un *TTR RS* debe ser capaz de ser configurado para soportar una de las operaciones, pero no estará obligada a soportar ambas operaciones simultáneamente. La sub *trama* de *DL* deberá incluir al menos una zona de acceso y la sub *trama* de *UL* pueden incluir una o más zonas de acceso de *UL* y una o más zonas de *relay*.

El primer enfoque permite que uno o más *tramas* de *RS* o *MR-BS* se agrupen en una *multi-trama* con un patrón repetitivo a las zonas de *relay* asignadas. El *MR-BS* y *RS* son asignados para transmitir, recibir o estar disponible en cada una de las zonas de *relay* dentro de una *multi-trama*.

El segundo enfoque permite a una estructura de *trama* llamada *single-trama*, consistir en más de una zona de *relay*. La *MR-BS* y *RS* son asignados para transmitir, recibir o estar disponible en cada zona de *relay* dentro de la *trama*.

Un ejemplo de la sub *trama* *MR-BS* se muestra en la figura 3.12

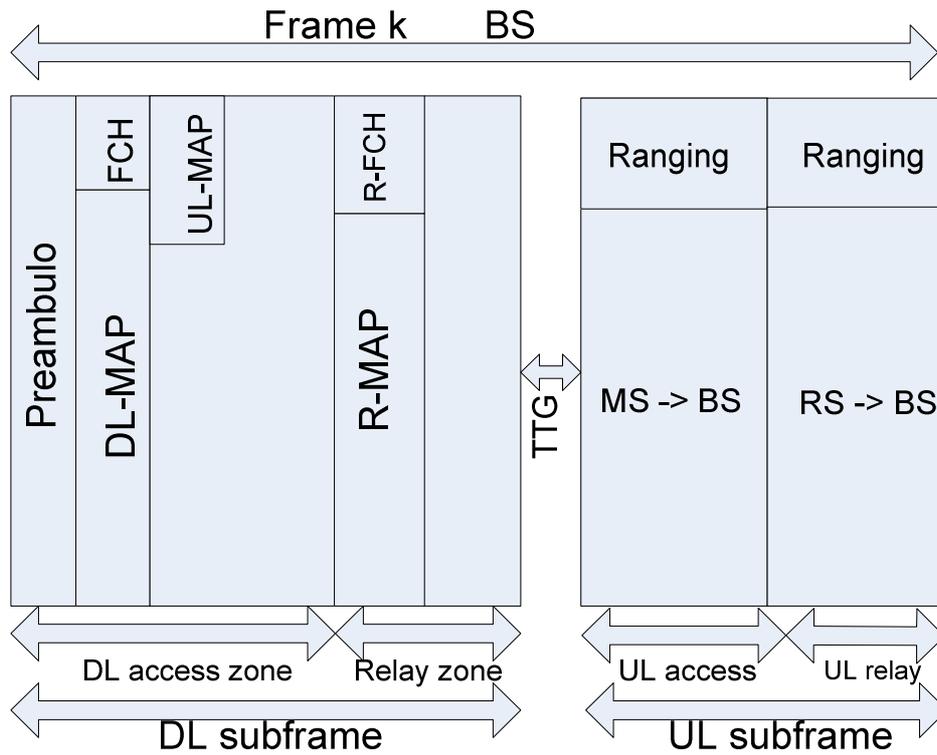


Figura 3.12 Estructura de la trama BS en modo no transparente [15].

Cada trama de MR-BS comienza con un preámbulo seguido de un FCH y un DL MAP y posiblemente de un UL MAP. La sub trama de DL incluye al menos una zona de acceso de DL y puede incluir una o más zonas de relay en el DL. El sub frame o sub trama de UL puede incluir una o más zonas de acceso UL y una o más zonas de relay en el UL. Una zona de relay puede ser utilizado por un MR-BS en estado de transmisión, recepción o disponible, pero el MR-BS no estará obligado a soportar ambos modos de operación dentro de la misma zona. En cada trama, el TTG debe ser insertado entre la sub trama de DL y UL, el RTG debe ser insertado al final de cada trama. La primera transmisión en la zona de relay en el DL debe incluir R-FCH y un R-MAP.

Un ejemplo de la sub trama RS se muestra en la figura 3.13

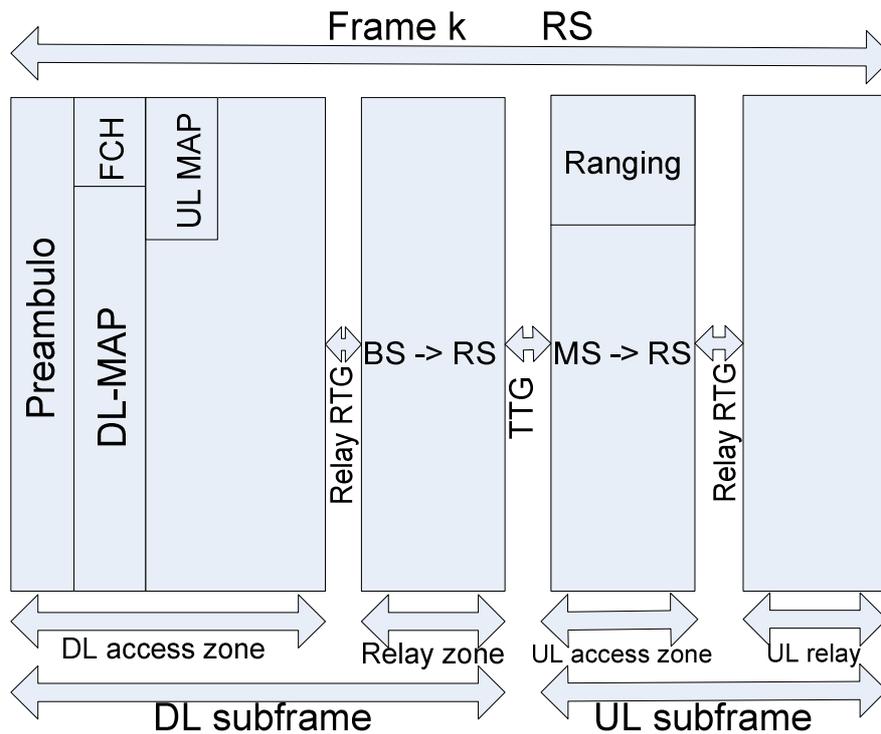


Figura 3.13 Estructura de la trama RS en modo no transparente [15].

Un RS puede realizar la retransmisión sobre la misma portadora de frecuencia o en una frecuencia portadora por separado, dependiendo de su capacidad de configuración y negociación, dividiendo en tiempo la comunicación con estaciones superordinadas y subordinadas.

Un ejemplo de la trama o frame de RS se muestra en la figura 3.13 para el caso de la retransmisión sobre la misma portadora.

Cada trama de RS comienza con un preámbulo al principio, seguido de un FCH y un DL-MAP y posiblemente un UL-MAP. El RS transmite su trama con un preámbulo alineado con el preámbulo de su estación superordinada y la sub trama de UL del RS está alineado con la sub trama de UL de la estación MR-BS.

La sub trama de DL deberá incluir al menos una zona de acceso de DL y puede incluir una o más zonas de relay. La sub trama de UL puede incluir uno o más zonas de acceso de UL y una o más zonas de relay. La zona de relay puede ser utilizada para estados de transmisión, recepción o disponible, pero el RS no se le requerirá soportar ambos modos en el tranciver dentro de la misma zona. En cada trama o frame se debe insertar un tiempo TTG entre la sub trama de UL y DL.

La estructura de la *trama* o *frame* de un *RS* debe ser configurada por su *MR-BS* a través de un mensaje de configuración. Para propósitos de configuración, el preámbulo de *relay*, cuando se presente, deberá estar al final de la última zona de *relay* en el *DL* en el cual el *MR-BS/RS* está en modo de transmisión o al final de la sub *trama* de *DL*. Para propósitos de monitoreo, el preámbulo de *relay*, cuando se presente, debe estar localizado al final de la sub *trama* de *DL*.

3.3 Capa *MAC*

El estándar especifica una interface aérea, incluyendo la capa de control de acceso al medio (*medium access control, MAC*) y capa física (*PHY*). La capa *MAC* está estructurada para soportar múltiples especificaciones de capa *PHY*, adecuada para cada ambiente en particular de operación.

La capa *MAC* se compone de tres subcapas. La subcapa de convergencia (*CS*) que provee una transformación o mapeo de datos de red externo, recibido a través del punto de acceso de servicio (*service access point, SAP*) de *CS*, dentro de la *MAC* están las unidades de datos de servicio (*service data units, SDUs*) recibidos por la parte de la subcapa común *MAC* (*common part sub layer, CPS*) a través de *MAC SAP*. Esto incluye una clasificación de red externa de *SDUs* asociándolos con el apropiado identificador de flujo de servicio *MAC* (*service flow identifier, SFID*) e identificador de conexión (*connection identifier, CID*). Esto se indica en la siguiente figura 3.14.

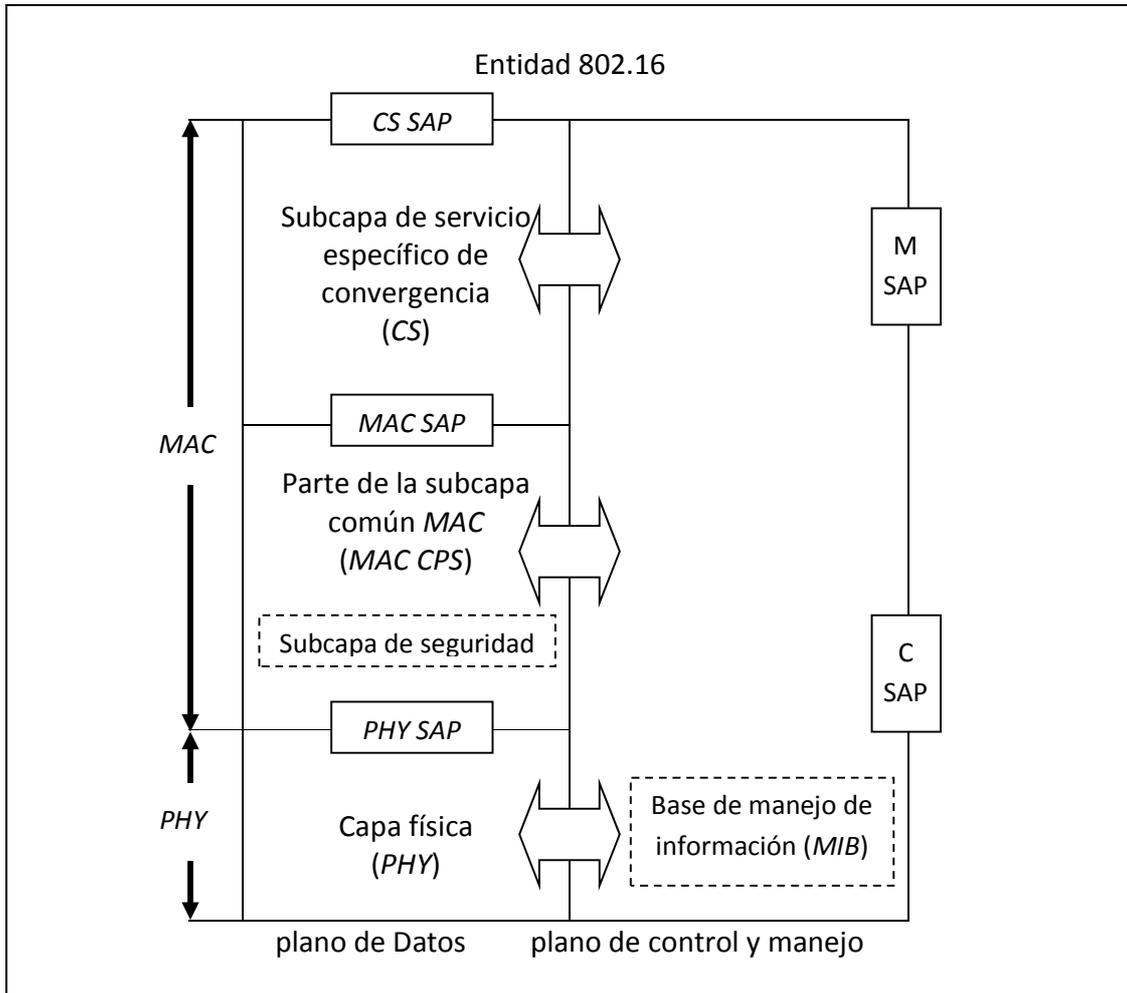


Figura 3.14 Modelo de protocolo de referencia para el estándar IEEE802.16 [14].

La subcapa *MAC CPS* provee la funcionalidad del núcleo de la *MAC* en sistemas de acceso, asignación de ancho de banda, establecimiento de la conexión y mantenimiento de la conexión. Esta recibe datos de varias *CS*, a través de *MAC SAP*, clasificando una conexión particular *MAC*. La capa *MAC* también posee una subcapa de seguridad separada para proveer autenticación, intercambio de llaves o claves seguras y encriptación. Los datos de control de *PHY* y estadísticas son transferidas entre la *MAC CPS* y la *PHY* mediante *PHY SAP*.

3.3.1 Entrada e inicialización a la red

Los sistemas deben soportar los procedimientos para introducir y registrar un nuevo *SS* o un nuevo nodo a la red. Los sistemas *RS* deben soportar los procedimientos aplicables para introducirse y registrar un nuevo *RS* a la red.

Los procedimientos para inicialización de un *RS* y un *SS* se muestran en la siguiente figura 3.15 y figura 3.16 respectivamente.

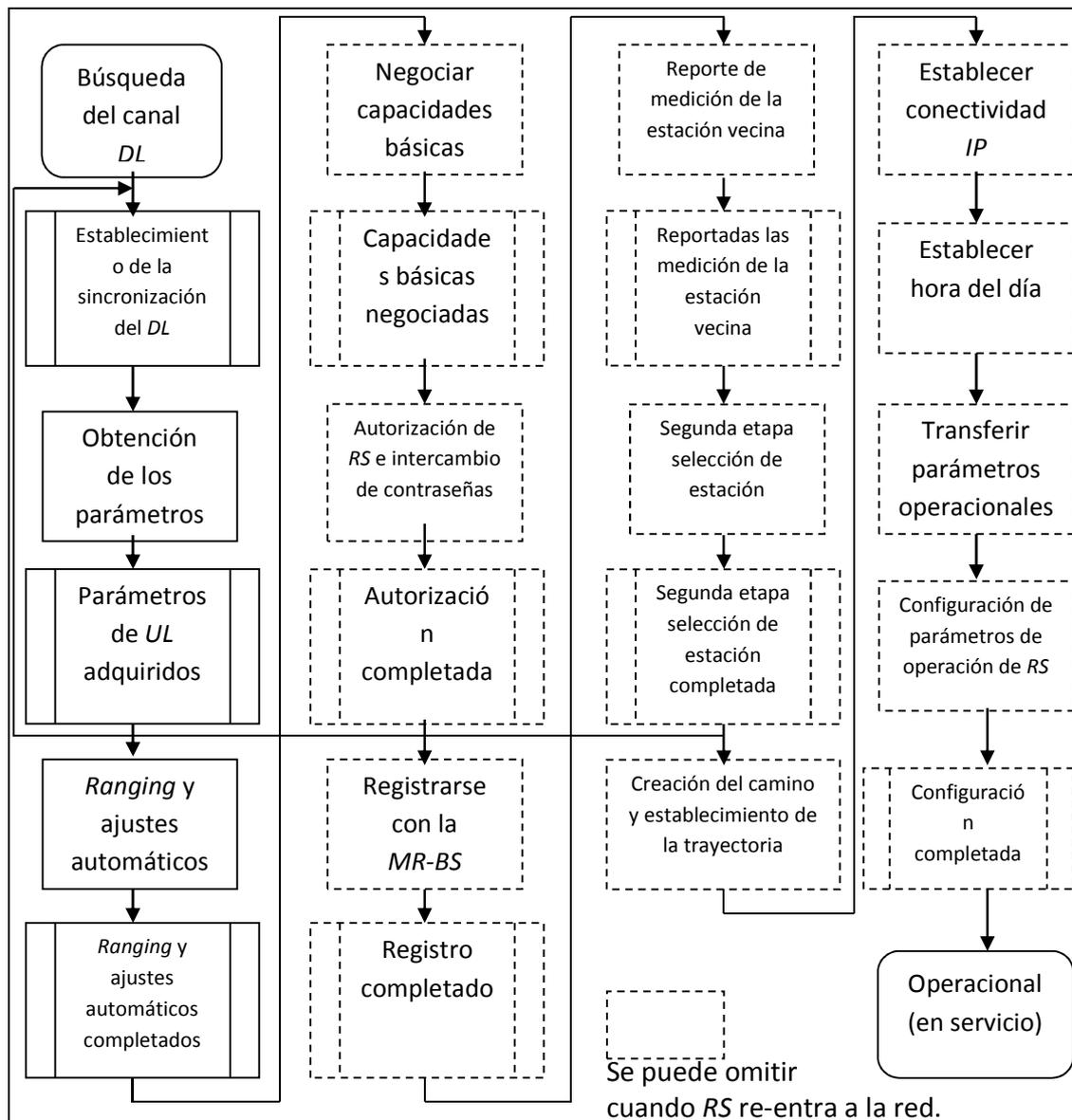


Figura 3.15 Entrada e inicialización a la red de *RS* [15].

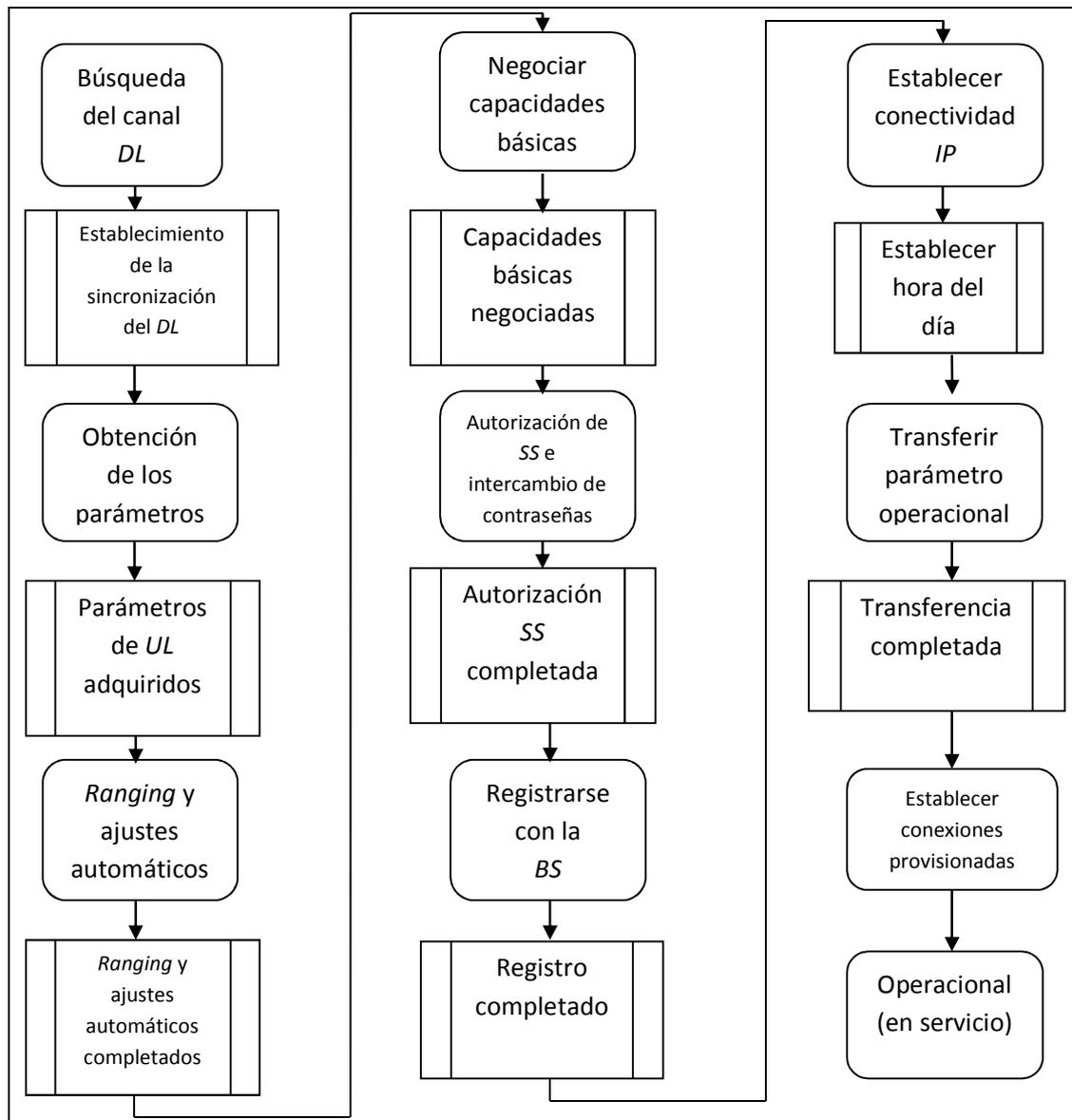


Figura 3.16 Entrada e inicialización a la red de SS [15].

La figura 3.15 y 3.16 muestra el flujo en general entre las etapas de inicialización en un SS y un RS. Esto no muestra caminos o decisiones de error, simplemente muestra de manera general el panorama del proceso.

El procedimiento puede ser dividido en las siguientes fases:

- a) Búsqueda del canal de *DL* y establecer sincronización con la *BS*.
 - i. Realizar la primera etapa de acceso de selección de estación (solo para *RS*)
- b) Obtener parámetros de transmisión (*Tx*) provenientes de un mensaje *UCD*.
- c) Realizar el *ranging*.
- d) Negociar capacidades básicas
- e) Autorizar *SS/RS* y realizar el intercambio de llaves o contraseñas.
- f) Realizar del registro.
 - i. Obtener de la estación vecina informes de medición (solo para *RS*)
 - ii. Realizar la segunda etapa de acceso de la selección de estación (solo para *RS*)
 - iii. Creación del camino y establecimiento del túnel (solo para *RS*)
- g) Establecer la conectividad *IP*.
- h) Establecer la hora del día.
- i) Transferir parámetros operacionales
- j) Establecer conexiones (solo para *SS*)
- k) Configurar parámetros de operación (solo *RS*)

Implementar la fase e) es opcional, esta fase se realiza si ambos *SS* y *BS* o ambos *RS* y *MR-BS* soportan políticas de autorización. Implementar las fases g), h) e i) en el *SS/RS* es opcional ya que estas fases solo se realizan si el *SS* es manejado por un *RS*. El implementar las fases i, ii e iii son opcionales debido a que solo se realizan si la estación *MR-BS* instruye al *RS* a omitir las fases d), e), f), i, ii, e iii esto debido a una entrada optimizada de la red *RS*.

Cada *SS* contiene la siguiente información cuando es transportado desde el fabricante:

- Una dirección universal *MAC* de 48 bits asignado durante el proceso de fabricación. Esto es muy importante ya que se identifica al *SS* de entre varios servidores provisionados durante la inicialización.
- Información de seguridad es usado para autenticar al *SS* hacia el servidor de seguridad y autenticar las respuestas de servidores de seguridad y provisionados.

El *RS* debe seguir el mismo procedimiento de escaneo y sincronización como se especifica para el *SS*.

El *RS* debe almacenar índices de preámbulos con su correspondiente información de potencia de señal para poder así reportar los valores almacenados a su *MR-BS* que sirve después del registro mediante el envío de un mensaje durante la fase de reporte de mediciones de la estación vecina

3.4 Asignación de ancho de banda y mecanismos de petición

Durante la entrada e inicialización a la red, a cada *SS* se le asigna hasta tres *CIDs* con el propósito de enviar y recibir mensajes de administración. Estos pares de conexión son usados para permitir diferentes niveles de calidad de servicio al ser aplicados a diferentes conexiones portando administración de tráfico *MAC*.

3.4.1 Peticiones

Las peticiones se refieren al mecanismo que usa los *SS* para indicarle a la *BS* la necesidad de asignación de ancho de banda en el *UL*. Debido a que la ráfaga de *UL* puede ser cambiada dinámicamente, todas las peticiones de ancho de banda (*Bandwidth Request, BWR*) deben ser realizadas en términos de número de *bytes* necesarios para transportar mensajes de *MAC PDU* excluyendo encabezado de capa física.

Los mensajes *BWR* pueden ser transmitidos durante cualquier asignación de *UL*, excepto durante el intervalo de *ranging* inicial. Un *SS* no debe pedir petición *BWR* para una conexión si no tiene una *PDU* a transmitir en esa conexión.

Las *BWR* pueden ser incrementales o agregadas. Cuando la *BS* recibe un *BWR* incremental, se debe agregar la cantidad de *BWR* requerida a su percepción actual de las necesidades de la conexión. Cuando la *BS* recibe una *BWR* agregada, debe reemplazar la percepción de las necesidades de ancho de banda de la conexión con la cantidad de ancho de banda solicitada.

3.4.2 Petición de ancho de banda en redes RS con programación distribuida

Una estación programada directamente maneja las *BWR* que recibe desde las estaciones subordinadas. Un *RS* en modo no transparente puede recibir *BWR* desde sus estaciones subordinadas mediante la señalización del encabezado *MAC*, el sub encabezado de administración de reservación o el código *CDMA* para *BWR*. De estos, solo el sub encabezado de administración de reservación puede estar encriptado.

Dependiendo de donde sea capaz el *RS* de desencriptar los *MAC PDU*, existen dos maneras de manejar el sub encabezado de administración de reservación. *RS* capaces de desencriptar *MAC PDU* debe manejar todas las peticiones *BWR* localmente; mientras que la *RS* que no son capaces de desencriptar la *MAC-PDU* debe de manejar todas las peticiones *BWR* localmente excepto para el sub encabezado de administración de reservación.

Al enviar tráfico de datos de subida en el *UL*, un *RS* puede pedir ancho de banda en el *UL* mediante una petición de encabezado de ancho de banda. Un *RS* puede combinar las peticiones de ancho de banda que arriban desde sus estaciones subordinadas junto con el ancho de banda que necesitan para encolar paquetes dentro de un solo encabezado de petición de ancho de banda por clase de servicio.

El *RS* puede transmitir un encabezado de petición de *BWR* tan pronto como se reciba el encabezado de petición de *BWR* de la estación subordinada, en lugar de esperar por los paquetes actuales arriben en orden para reducir el retardo en la retransmisión de tráfico. Ver figura 3.17.

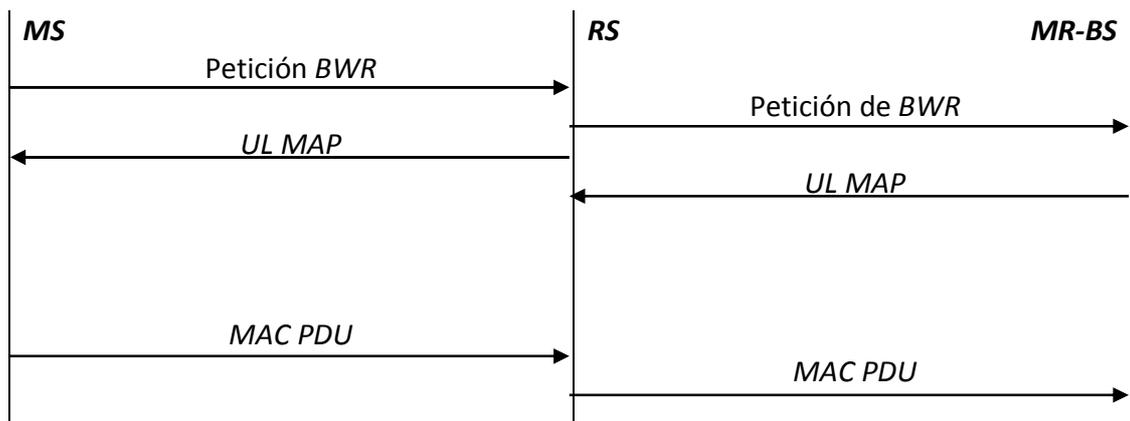


Figura 3.17 Reducción de latencia en la retransmisión de petición *BWR*.

3.4.3 Petición de ancho de banda en redes *RS* con programación centralizada

En sistemas donde operan sistemas *RS* en modo de programación centralizada, la *MR-BS* debe determinar la asignación de ancho de banda (por ejemplo *MAP*) para todos los enlaces dentro de la célula.

Como resultado, el *RS* no transparente debe recibir los *MAPs* desde la *MR-BS* para todos los enlaces desde y hacia sus estaciones subordinadas antes de que puedan transmitirlos.

Por las mismas razones, el *RS* debe enviar todos los encabezados de peticiones de ancho de banda y petición de ancho de banda para información de códigos de *ranging CDMA* que ellos reciben desde sus estaciones subordinadas hacia el *MR-BS*. Si el *RS* tiene ancho de banda disponible en el *UL*, simplemente enviará la información de petición de ancho de banda a sus estaciones superordinadas. De otra manera, la *RS* pedirá ancho de banda en el *UL* desde la *MR-BS* usando códigos de *ranging CDMA* o códigos de *ranging CDMA* dedicados a *RS*.

3.4.4 Reservaciones

Para un *SS*, los *BWR* se referencian a conexiones individuales mientras cada reservación de ancho de banda *unicast* es direccionado al *CID* básico del *SS*, no hacia *CID* individuales. Dado que esto no es determinístico, la petición está siendo cumplida, cuando la *SS* recibe una oportunidad de transmisión más pequeña que la esperada, no se da una razón explícita. En todos los casos, basada sobre la última información recibida desde la *BS* y el estado de la petición, el *SS* puede decidir realizar el *backoff* y enviar una nueva petición.

3.4.5 Reservaciones de ancho de banda en redes *RS* con programación distribuida

Los mensajes de reservación de ancho de banda y procedimientos definidos anteriormente para el *SS* y el *BS* deben ser usados por el *SS/RS* y la estación administradora respectivamente (*BS*). Sin embargo, *MR-BS/RS* puede usar señalización adicional para mejorar el rendimientos de la retransmisión.

Si la petición de ancho de banda viene desde un *RS*, la estación superordinada debe direccionar la reservación de ancho de banda hacia el *CID* básico del *RS*, el administrador *RS* puede administrar una *MAC PDU* o repetidor *MAC PDU* en la asignación de ancho de banda que se recibe.

Una estación administradora (*BS*) puede enviar su *scheduling* a una estación subordinada (*RS*) con información antes de tiempo mediante un mensaje de administración llamado *RS-SCH*. Este mensaje indica cuando una asignación de ancho de banda dada será reservada a su subordinada *RS*, el tamaño de la asignación y el *CID* deseado.

La reservación de ancho de banda actual es propagada hacia su estación subordinada *RS* usando una reservación de datos *IE* (*information element*) en el entrante *UL MAP*. En el caso de reservación de ancho de banda periódica, la información de administración necesita ser colocada una sola vez. Ver figura 3.18.

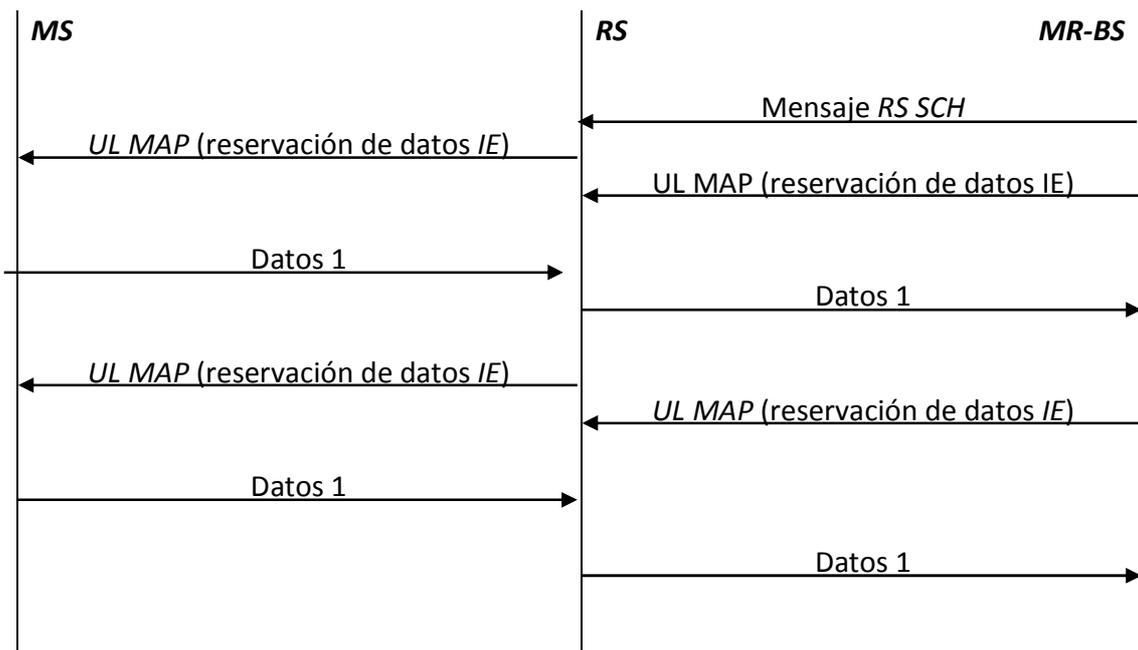


Figura 3.18 Reservación periódica de ancho de banda en redes con administración centralizada.

Cuando un *RS* recibe un mensaje de administración *RS-SCH* con información de administración *UL* desde su estación superordinada (*MR-BS* o *RS*), debe mirar hacia el siguiente salto de un *CID* dado. Basado en su información de administración y el siguiente salto del *CID*, el *RS* puede determinar la apropiada asignación de ancho de banda y asociarla a una asignación llamada *RS UL* de la *trama* sobre el *UL* que posee. El *RS* envía su propio mensaje de administración *RS-SCH* a su estación subordinada *RS* para informarle las decisiones de asignación de ancho de banda que realiza.

3.4.6 Reservaciones de ancho de banda en redes *RS* con programación centralizada

En redes *RS* con administración centralizada, cuando un *MR-BS* asigna ancho de banda para enviar un paquete a o desde una estación dada, debe asignar ancho de banda a todos los enlaces que hacen el camino desde y hacia la estación tomando en cuenta el retardo de procesamiento y la calidad del enlace a cada *RS* a lo largo del camino así como también la estructura de la *trama* multisaltos. Para crear el continuo envío de paquetes, la *MR-BS* debe asignar ancho de banda sobre enlaces consecutivos a lo largo del camino tomando en consideración el tiempo de procesamiento de las estaciones intermedias. Cada *RS* informa al *MR-BS* de su capacidad de mínimo retardo de envío usando el mensaje *SBC-REQ* durante el proceso de entrada a la red *RS*.

3.5 Ranging inicial y periódico en redes *MR-BS/RS*

3.5.1 Comportamiento de *MR-BS* y *RS* durante *ranging* inicial

En la capa *WirelessMAN-OFDMA* se especifica un sub canal de *ranging* y un conjunto de códigos de *ranging*. Sub conjuntos de códigos serán asignados en el canal *UCD* para *ranging* inicial, peticiones de *ranging* periódico y peticiones de ancho de banda (*BWR*) para que la *BS* pueda determinar el propósito del código recibido de acuerdo con el sub conjunto al cual pertenece el código.

El SS deberá escoger de forma equiprobable uno de los códigos antes mencionados dependiendo de su propósito en el sub conjunto adecuado, se modula dentro de un sub canal de *ranging* y subsecuentemente se transmite en un *slot* de *ranging* igualmente seleccionado aleatoriamente dentro de los *slots* disponibles en el *UL-MAP*. El SS puede usar además una selección aleatoria o *backoff* aleatorio para seleccionar un *slot* de *ranging*. Cuando una selección aleatoria es utilizada, el SS seleccionara un *slot* de *ranging* entre todos los *slots* para *ranging* disponibles en un solo *frame* o *trama* dentro de un proceso de selección uniforme. Cuando se utiliza el *backoff* aleatorio, el SS seleccionara un *slot* para *ranging* entre todos los *slots* de *ranging* disponibles en la correspondiente ventana de *backoff* usando un proceso uniforme aleatorio.

3.5.1.1 *Ranging* inicial en modo transparente

Cuando un SS realiza un *ranging* inicial en sistemas con RS en modo transparente directamente conectado al MR-BS, el RS y MR-BS realizara los siguientes pasos:

- a) El RS monitoreara el canal de *ranging* especificado en el *UL-MAP* emitido por el MR-BS para códigos de *ranging* inicial. Cuando el RS detecta uno o más códigos en un *frame* o *trama* recibido en el enlace de acceso, enviará los códigos que recibe con suficiente fuerza en su información de ajuste (tiempo, potencia, corrección de frecuencia) en un mensaje *MR_RNG-REP* en el *CID* básico del RS a su MR-BS dentro de un intervalo de tiempo (T71).
- b) Cuando un MR-BS recibe primero un código de *ranging* CDMA directamente o vía un mensaje *MR_RNG-REP*, colocara un tiempo de espera (T60) y esperara otro mensaje *MR_RNG-REP* que llegue con el mismo atributo de código de *ranging* desde otras RS subordinadas. Cuando expire el tiempo T60, el MR-BS determinara el mejor camino (directamente o vía RS) en el cual comunicarse hacia el SS que origino el código.
 - a. Si se necesitan ajustes, el MR-BS enviará un *RNG-RSP* hacia el SS y el proceso se repetirá de nuevo.
 - b. Cuando el código de *ranging* no requiera más ajustes, el MR-BS proveerá una asignación en el *UL* para que el SS envíe *RNG-REQ* con su dirección *MAC* insertándolo en una asignación *CDMA* dentro del *UL-MAP*.
- c) Si los mensajes de administración son transmitidos en el *UL*, el MR-BS procederá a una asignación *CDMA* con una ráfaga de *UL* conteniendo los *CID* básico de acceso de RS o *CID* de administración *multicast* (Ver figura 3.19).

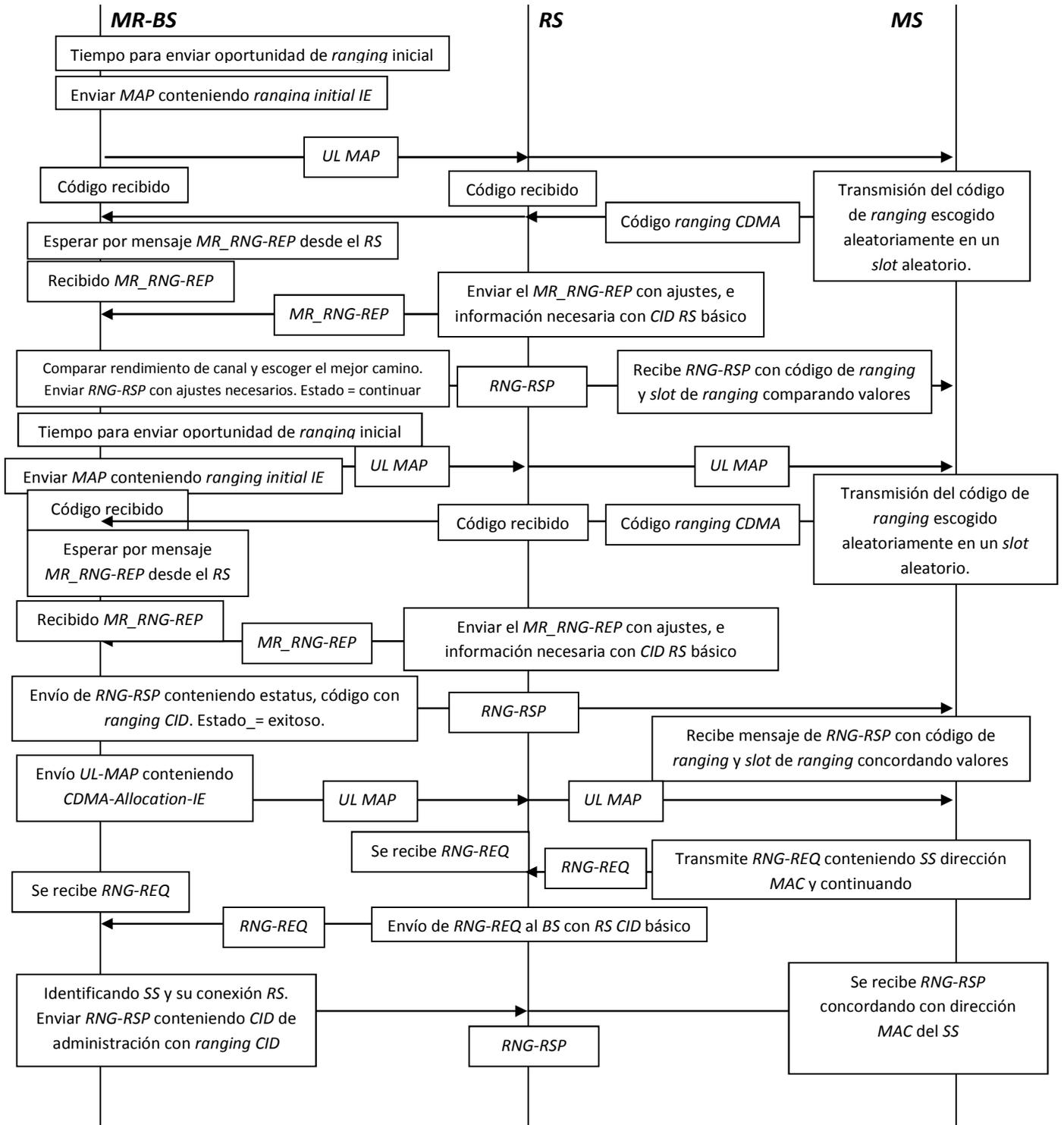


Figura 3.19 Ranging y ajustes automáticos para *ranging* inicial en modo transparente [15].

3.5.1.2 Ranging inicial en modo no transparente

Cuando un SS realiza un *ranging* inicial en sistemas usando RS no transparentes y en modo centralizado, el MR-BS y el RS no transparente realizarán las siguientes tareas:

- a) El RS monitoreara el canal de *ranging* para los códigos de *ranging* inicial. El canal de *ranging* está especificado en el UL-MAP que el MR-BS envía al RS para emitir el enlace de acceso.
- b) Cuando el RS detecta el código de *ranging* en su enlace de acceso, este determinara si ajustes son necesarios.
- c) Si ajustes son necesarios, el RS pedirá ancho de banda en el DL en el cual enviar un RNG-RSP (mensaje de *ranging* de respuesta) hacia el SS enviando incluso un código CDMA de RS de *ranging*. El MR-BS deberá crear la asignación necesaria en el DL-MAP transmitido por el RS y notificar al RS de su asignación vía mensaje RS_BW_Alloc_IE en el mensaje RS_Access-MAP.
- d) Si no son necesarios ajustes, el RS pedirá ancho de banda en el UL en el cual el SS pueda transmitir un mensaje de RNG-REQ conteniendo su dirección MAC. En respuesta, el MR-BS decidirá si continuar o abortar el proceso.
 - a. Si el MR-BS decide continuar, insertará un mensaje CDMA_Allocation_IE en el UL-MAP que es transmitido por el RS (el RS lo completa antes de emitirse). El MR-BS puede además dar una asignación en el DL para que el RS transmita un mensaje RNG-RSP hacia el SS con un estado exitoso.
 - b. Si el MR-BS decide abortar, creara una asignación para el RS para transmitir un RNG-RSP hacia el SS con el estado de abortar. El MR-BS notificara al RS de la asignación para el mensaje RNG-RSP insertando un mensaje RS_BW-ALLOC_IE en el R-MAP.
- e) Al recibir el RNG-REQ conteniendo la dirección MAC junto con el CID de *ranging*, el acceso RS retransmitirá esto hacia su MR-BS en su RS CID básico y comenzará un tiempo de espera T66. En respuesta el MR-BS enviará un RNG-RSP con la asignación CID del SS hacia el RS en el RS CID básico. Crea una asignación para RNG-RSP en el DL-MAP que envía al RS emitido en el enlace de acceso y notifica al RS de su asignación mediante la inserción de un mensaje RS_BW_Alloc_IE en el mensaje RS_Access-MAP (Ver figura 3.20).

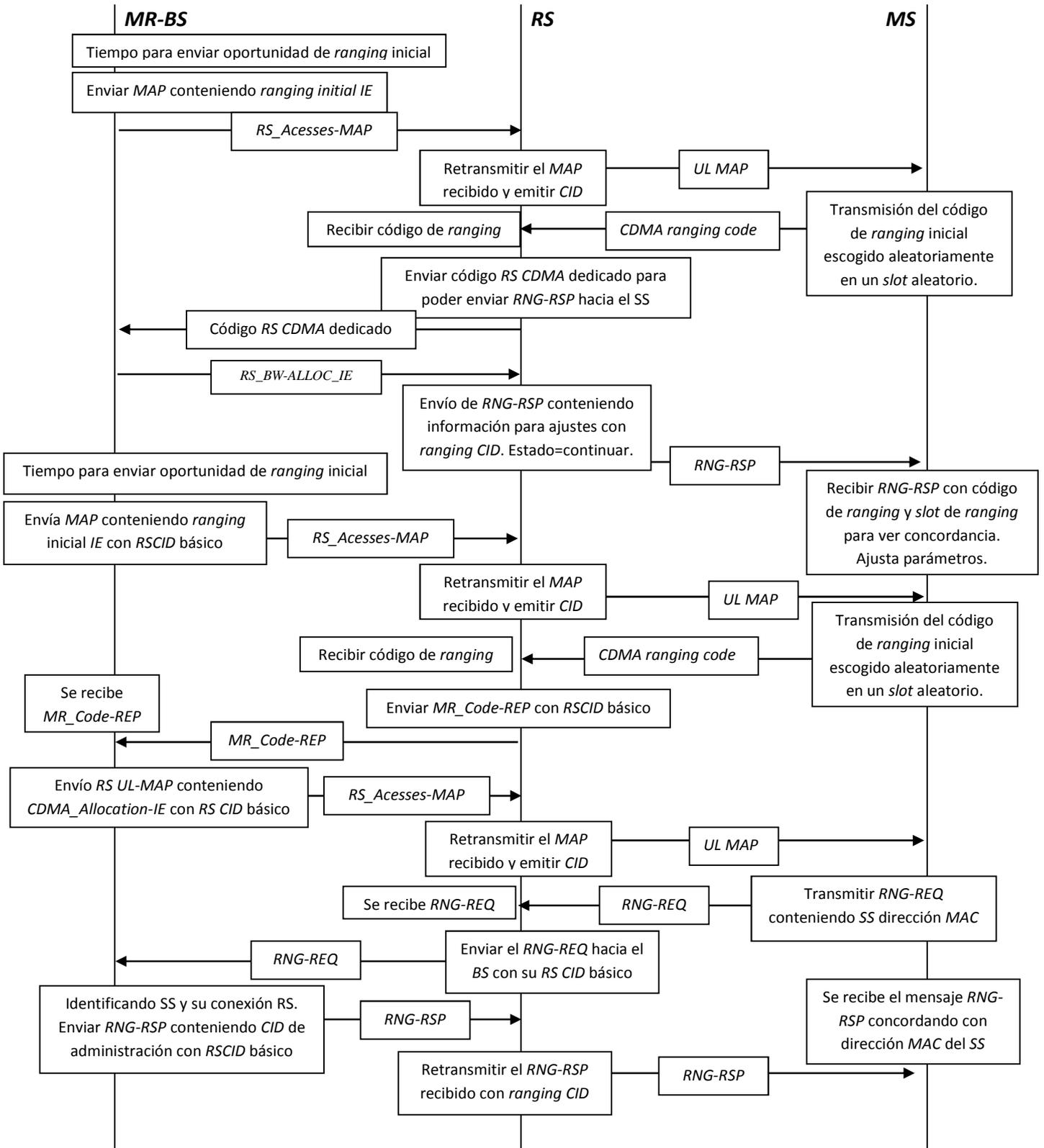


Figura 3.20 Ranging y ajustes automáticos para ranging inicial en modo no transparente [15].

3.5.2 Comportamiento de *MR-BS* y *RS* durante *ranging* periódico

Cuando un *SS* inicia un *ranging* periódico en sistemas con *RS*, el *MR-BS* y el *RS* realizarán las mismas tareas descritas en los puntos anteriores (dependiendo si es modo transparente o modo no transparente) con las siguientes modificaciones:

- a) Códigos de *ranging* periódicos son usados en lugar de códigos de *ranging* inicial.
- b) El proceso se detiene una vez que la estación de acceso recibe la información de código y envía un *RNG-RSP* hacia el *SS*.

Cuando un *RS* inicia *ranging* periódico, el *MR-BS* y el *RS* realizarán las mismas tareas descritas anteriormente y dependiendo del modo utilizado con las siguientes modificaciones (Ver figura 3.21):

- a) Códigos de *ranging* periódicos son utilizados en lugar de códigos de *ranging* inicial. Además, el *MR-BS* puede asignar un código *CDMA RS* dedicado hacia el *RS*.
- b) El proceso se detiene una vez que la estación de acceso recibe el código y envía un *RNG-RSP* hacia el *RS*.

En algunos casos, la estación superordinada de un *SS* o *RS* puede desear iniciar el *ranging* basado en las mediciones del canal desde el tráfico de datos o una petición de ancho de banda basado en códigos de *ranging CDMA* recibidos desde el *SS* o *RS*. Para iniciar el *ranging* periódico, la estación superordinada enviará un *RNG-RSP* no solicitado hacia el *SS* o *RS* (Ver figura 3.22).

- a) Si la estación superordinada es un *RS* transparente recibiendo una petición de ancho de banda basada en *CDMA*, el *MR-BS* y el *RS* seguirán los procedimientos señalados anteriormente.
- b) Si la estación superordinada es una estación *RS* transparente o no transparente en un grupo de *RS*, se transmitirá un *MR_RNG-REP* hacia el *MR-BS* en el *CID RS* básico para pedir que el *MR-BS* envía un *RNG-RSP* no solicitado con los ajustes necesarios hacia el *SS*.
- c) Si la estación superordinada es un *RS* no transparente en modo centralizado, pedirá ancho de banda desde el *MR-BS* en el cual se enviará un *RNG-RSP* no solicitado.
- d) Si la estación superordinada está en una planificación *RS*, enviará un *RNG-RSP* directamente al *SS* sin interacción con el *MR-BS*.

El comportamiento en *Handoff* está fuera del objetivo de esta tesis.

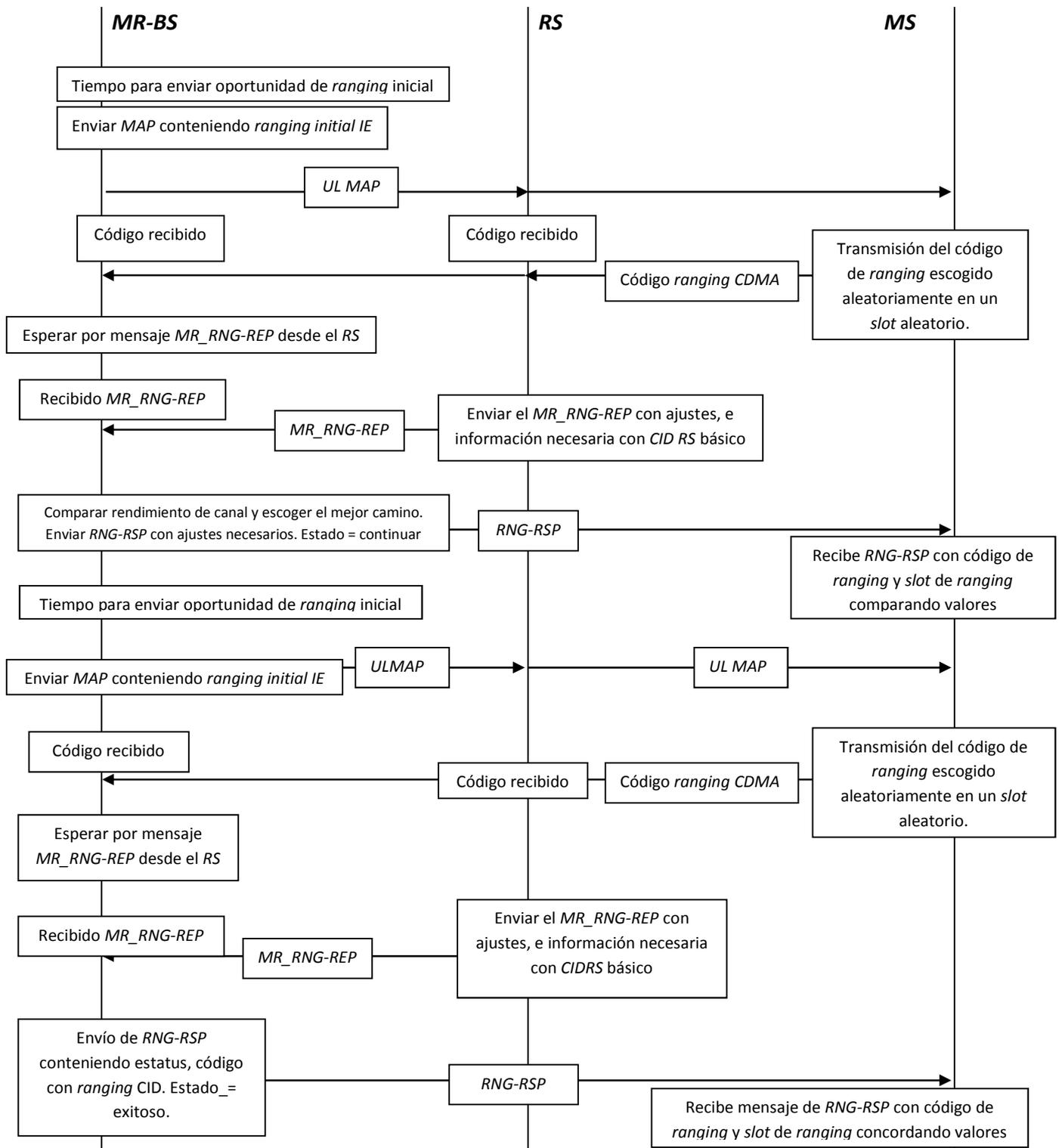


Figura 3.21 *Ranging* y ajustes automáticos para *ranging* periódico en modo transparente [15].

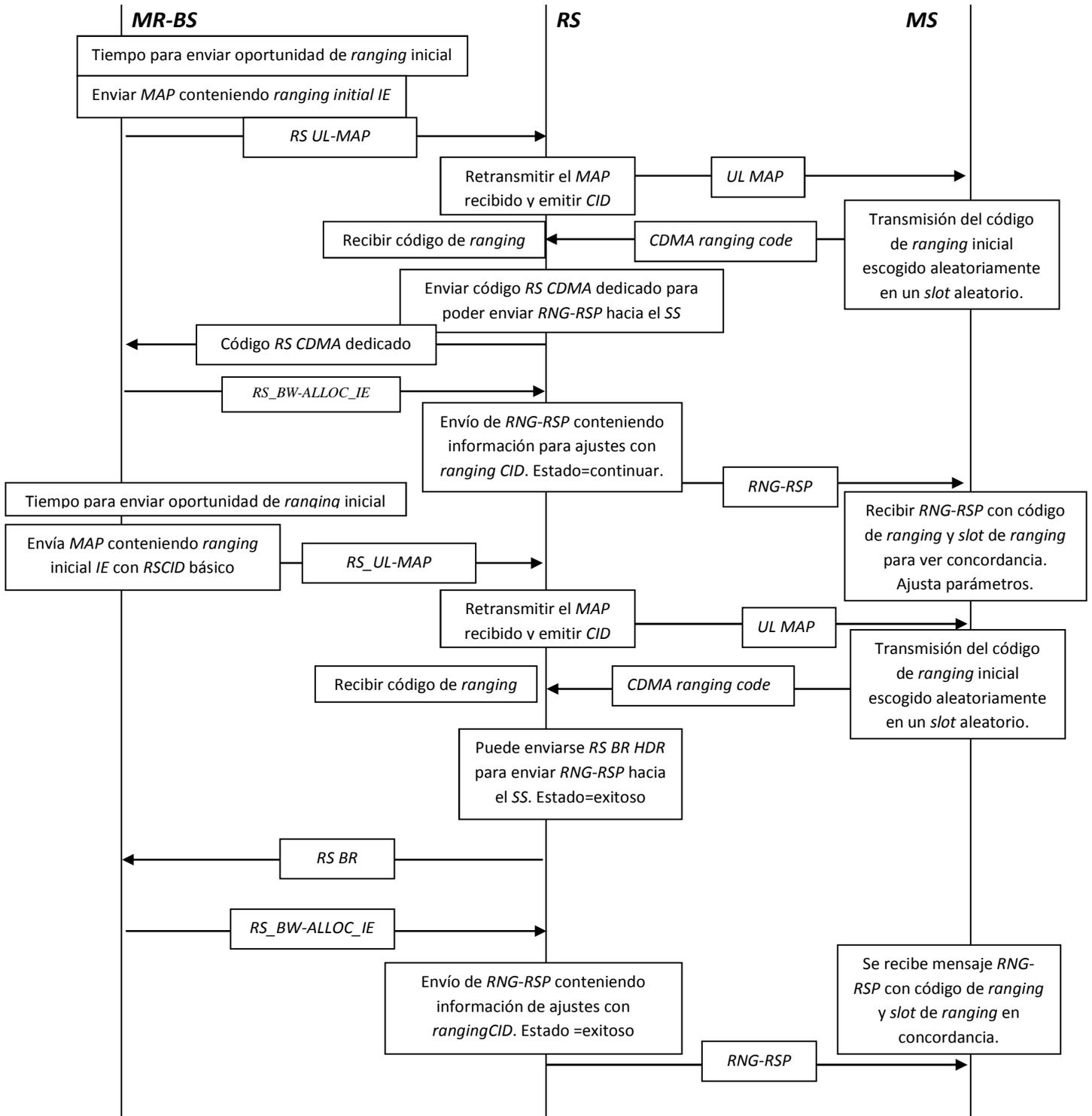


Figura 3.22 Ranging y ajustes automáticos para ranging periódico en modo no transparente [15].

3.6 Contención

3.6.1 Contención *CDMA BWR* en redes *RS*

La capa física *WirelessMAN-OFDMA* soporta dos mecanismos *BWR*: el *SS* envía el encabezado como se señaló anteriormente o usar el mecanismo de contención basada en códigos *CDMA* como se especifica a continuación.

Como se especificó anteriormente, la capa física *OFDMA* define sub canales de *ranging* y un subconjunto de códigos de *ranging* que deben ser usados para contención. El *SS*, al tener que solicitar ancho de banda, debe seleccionar, con misma probabilidad, un código de *ranging* desde el subconjunto de códigos asignados para *BWR*. Este código de *ranging* debe ser modulado dentro de un sub canal de *ranging* y transmitido dentro de un *slot* de *ranging* seleccionado aleatoriamente desde la región de *ranging* apropiada en una sola trama.

Después de la detección, la *BS* debe proveer una asignación de *UL* para el *SS* usando *broadcast CID* en combinación con una asignación *CDMA IE*, la cual especifica la región de transmisión (TX) y código de *ranging* que debe ser usado por el *SS* para transmisión del código *CDMA*. Esto permite a un *SS* determinar si se ha dado una asignación mediante la comparación de estos parámetros con los parámetros usados. El *SS* debe usar la asignación para transmitir un encabezado de petición de ancho de banda u otro encabezado que contenga un campo *BWR*, excepto cuando la *BS* indica el encabezado que puede ser omitido en la asignación *CDMA IE*. El *SS* también puede transmitir datos en esta asignación.

Si la *BS* no expide una asignación *CDMA IE* como ya se describió, o un mensaje *BWR MAC PDU* no resulta en una subsecuente asignación de cualquier ancho de banda, el *SS* asumirá que el código de *ranging* transmitido resultó en una colisión y seguirá la resolución de contención.

3.6.1.1 Contención *CDMA BWR* en redes *RS* con programación centralizada

Cuando un *RS* no transparente recibe una o más peticiones de ancho de banda con códigos de *ranging CDMA* en una trama de su subordinada *SS*, debe enviar un encabezado *MR Code-REP* usando su *CID* básico de *RS* hacia el *MR-BS*. El encabezado *MR Code-REP* debe indicar el número de petición de ancho de banda para el código de *ranging CDMA* recibido por el *RS*.

Al recibir un encabezado *MR Code-REP* desde un *RS* no transparente, el *MR-BS* inserta una asignación *CDMA IE* con algunos campos en cero dentro del *UL-MAP* que asigna a ese *RS* y publicar a todos el enlace de acceso. Esta asignación *CDMA IE* tendrá ceros en los campos para número de trama, código de ranging, símbolo de ranging y sub canal de ranging. Cuando un *RS* no transparente recibe *UL-MAP* asignado desde el *MR-BS* conteniendo la asignación *CDMA IE* con campos en ceros, el *RS* llenará estos campos con el código de ranging apropiado y transmitirá la información de la región, después publicará a todos su *UL-MAP* actualizado sobre el enlace de acceso en concordancia con el tiempo establecido.

Cuando un *RS* transparente recibe uno o más peticiones de ancho de banda con códigos *CDMA* para ranging desde su subordinada *SS* dentro de un trama, enviará tantos códigos como sea posible (dentro de la región de transmisión y ajustes de información de canal) dentro de un mensaje *MR_RNG-REP* basado en el ancho de banda *UL* disponible. Si no hay suficiente ancho de banda suficiente e información para todos los códigos, el *RS* debe indicar en el mensaje *MR_RNG-REP* el tamaño de los códigos sobrantes a ser reportados. Basado en este número, el *MR-BS* puede asignar ancho de banda en el *UL* para la información de código sobrante.

Usando el código y la información de región de transmisión, el *MR-BS* generará la apropiada asignación *CDMA IE* que advierte al *SS* el envío de su encabezado de petición de ancho de banda en el *UL* de acceso. Si los mensajes de administración son reenviados en el *UL*, el *MR-BS* insertará un mensaje *UL_Burst_Receive_IE* frente una asignación *CDMA IE* en el *UL-MAP*. El mensaje *UL_Burst_Receive_IE* contendrá el *CID* básico del *RS* asignado o el *CID* de administración *multicast*. El *MR-BS* también creará asignaciones de ancho de banda a lo largo del camino de retransmisión desde la *RS* asignada con el propósito de enviar encabezados de peticiones de ancho de banda por parte del *SS* hacia el *MR-BS* (Ver figura 3.23).

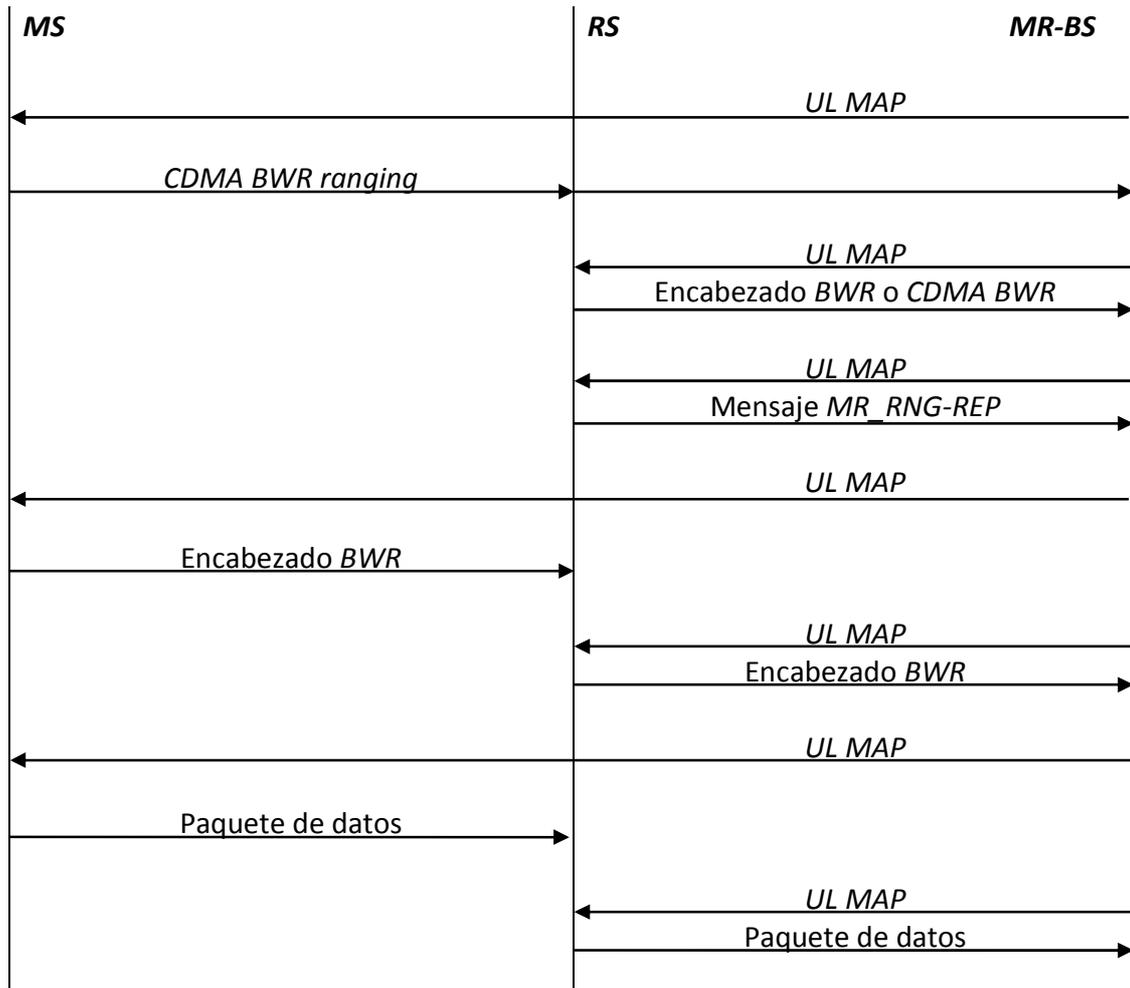


Figura 3.23 BWR Petición/asignación para un RS en modo de administración centralizado.

3.6.1.2 Contención CDMA BWR en redes RS con programación distribuida

En redes RS con administración centralizada, el MR-BS asignara un único código de *ranging CDMA RS* a cada RS dentro de la red para reducir así el encabezado y latencia de varios procesos. En el modo de administración distribuido, esta asignación es opcional. Los códigos de *ranging CDMA* de RS son asignados al RS durante el proceso de *ranging* inicial mediante el envío de un mensaje *RS_CDMA_Codes*.

Cuando un RS transmite se único código de *ranging CDMA* de RS dedicado para petición de ancho de banda a su estación superordinada, la estación superordinada retransmitirá este código en la dirección de UL y cada RS intermediario deberá hacer lo mismo hasta que el código alcance al MR-BS.

Cuando el *MR-BS* recibe un código de *ranging CDMA* de *RS*, deberá buscar cual *RS* envió el código y crear la asignación apropiada de ancho de banda en el enlace de retransmisión a lo largo del camino desde el *RS* hacia el *MR-BS*. Esto requiere que cada *RS* informe al *MR-BS* de su tiempo de procesamiento.

3.6.2 Asignación de código único *CDMA* a *RS*

El *MR-BS* puede asignar códigos únicos *CDMA* que van a cada *RS* en su célula para que se pueda determinar de inmediato el propósito y el iniciador de este código. Algunos códigos permiten al *RS* avisar a los *MR-BS* que se está llevando a cabo un proceso de *ranging* con una de sus estaciones y recibir ancho de banda desde el *MR-BS* en la cual continuar o completar el proceso.

Otros códigos permiten al *RS* informar inmediatamente al *MR-BS* cuales asignaciones de ancho de banda son necesarias a lo largo de la ruta desde *RS* hacia el *MR-BS* en la cual enviar un tipo específico de mensaje.

El *RS* puede asignar varios códigos *CDMA* de *ranging* únicos en el mensaje *RNG-RSP* para comunicar las siguientes peticiones hacia el *MR-BS*:

- *RS* no transparentes con un *BS ID* único y operando en un modo de administración centralizada necesita *BWR* en su *DL* de acceso (hacia el *SS*) en el cual se envía un mensaje *RNG-RSP*. En este caso no se envía un encabezado de *RSBWR* hacia el *MR-BS*.
- *RS* en modo transparente o no transparente con un *BSID* compartido es necesario un *BWR* en la retransmisión de *UL* a lo largo de la ruta hacia el *MR-BS* en el cual se envía un mensaje *MR_RNG-REP* que contiene un atributo de un código de *ranging CDMA* y toda la información de ajustes.
- *RS* en modo no transparente que tienen un único *BSID* y operando en modo de administración centralizada necesita *BWR* en su retransmisión de *DL* en el cual se envía un mensaje *RNG-RSP*. En este caso el *RS* no envía el encabezado *RS BWR* hacia el *MR-BS*.
- *RS* necesita de *BWR* en la retransmisión de *UL* a lo largo de la ruta hacia el *MR-BS* en el cual se envía 6 bytes de encabezado.

3.7 Resolución de Contenciones

La BS controla las asignaciones en el canal de UL a través de los mensajes UL-MAP y determina en cuales slots son sujetos a colisión. La colisión puede ocurrir en el ranging inicial y en intervalos de petición definidos por sus respectivos IE. El potencial de que ocurran colisiones en intervalos de petición depende del CID en su respectivo IE. Esto describe la transmisión en el UL y la resolución de colisión. Por simplicidad, esto refiere sobre la decisión que la SS realiza. Desde que un SS puede tener diferentes flujos de servicio (cada uno con su CID), este toma su decisión en su CID o en su calidad de servicio.

El método obligatorio para la resolución de la contención estará definida en el truncated binary exponential backoff (TBEB), con la ventana inicial de backoff y la ventana máxima de backoff controlada por la BS. Los valores están especificados como parte del mensaje UCD y representa un valor a la potencia de 2. Por ejemplo si se colisiona 2 veces, el valor de "c" será igual a 2 indicando una ventana entre 0 y 7, para un valor de 9 o más indicaría una ventana de entre 0 y 1023 ya que para valores mayores a 9 y menores de 16 es un valor truncado. Ver tabla 3.1.

| | |
|----------|---|
| Formula | $ventana\ de\ contención = [0, 2^{c+i} - 1]$ c = número de colisiones i = valor inicial 1 |
| Si c = 1 | $ventana\ de\ contención = [0, 2^{1+1} - 1]$ = [0,3] |
| Si c = 2 | $ventana\ de\ contención = [0, 2^{2+1} - 1]$ = [0,7] |
| Si c = 5 | $ventana\ de\ contención = [0, 2^{5+1} - 1]$ = [0,63] |
| Si c = 9 | $ventana\ de\ contención = [0, 2^{9+1} - 1]$ = [0,1023] |

Tabla 3.1 Valor de la ventana de contención para diferente número de colisiones.

Cuando un SS tiene información a enviar y desea entrar al proceso de resolución de contenciones, coloca su ventana de backoff interno igual a la petición de backoff definido en el mensaje UCD referenciado por el conteo UCD en el mensaje de UL-MAP que se está utilizado.

El algoritmo *Backoff* utiliza la siguiente expresión para el cálculo de los tiempos a esperar, el cual indica el número de *slots* de contención u oportunidades de transmisión que un usuario *SS* dejará pasar hasta poder transmitir (Ver figura 3.25).

```
if (k<16) then
  k=min(c+i,t)
  b=random [0, 2k-1]
  espera (b slots de contención)
  retransmitir en el slot b+1

else
  Error por colisión excesiva
```

i=Valor inicial del algoritmo exponencial *backoff*
t=Valor truncado a 10
c=Número de colisiones que ha experimentado el usuario
b=Ventana o número de *slots* que debe esperar el *SS*.
k=Número de intentos de transmisión

Figura 3.25 Algoritmo de *Backoff*.

3.7.2 Resolución de contención mediante *Backoff*

Usando una petición de reservación de ancho de banda (*BWR*) como ejemplo, consideramos un *SS* con una ventana inicial de *backoff* de 0 a 15 y aleatoriamente selecciona el número 11, el *SS* deberá aplazar un total de 11 oportunidades de transmisión de contención. Si la primera petición *IE* disponible es para 6 peticiones, el *SS* no usará estos y tendrá ahora que esperar 5 oportunidades más. Si la siguiente petición *IE* es para 2 peticiones, el *SS* ahora tendrá que esperar 3 oportunidades más. Si la tercera petición *IE* tiene disponible 8 oportunidades, el *SS* transmitirá en la 4 oportunidad, después de dejar pasar 3 oportunidades en esa petición. Ver figura 3.26.

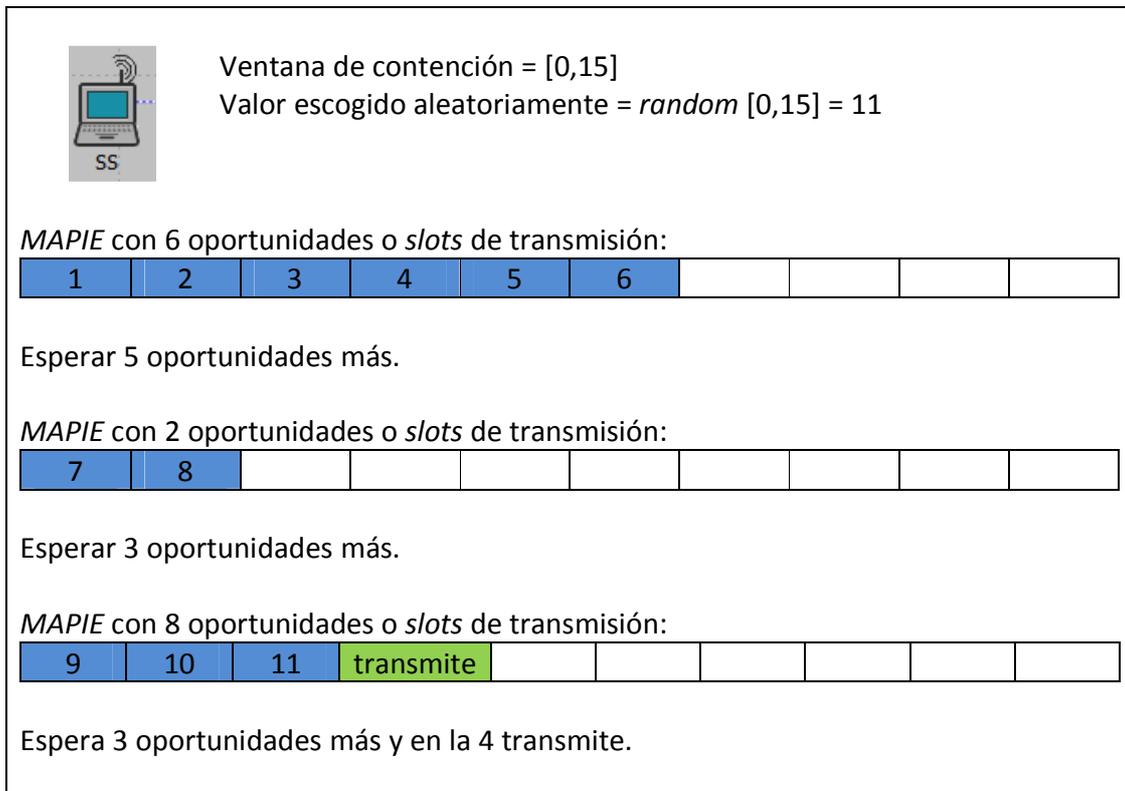


Figura 3.26 Ejemplo de contención para un SS.

Después de la transmisión de contención, el SS esperará por una reservación de datos en el siguiente MAP. Una vez recibido, la resolución de contención se habrá completado para este SS en particular. El SS considerará una transmisión de contención perdida o fallida si no recibe una respuesta de reservación en el siguiente MAP o dentro del intervalo de tiempo definido (T3). El SS deberá ahora incrementar su ventana de *backoff* por un factor de 2, sin exceder el límite de la ventana máxima de contención. El SS tendrá ahora que escoger un número aleatorio dentro de esta nueva ventana más grande y repetir el proceso anteriormente señalado.

Este proceso repetitivo continúa hasta que el número máximo de intentos es alcanzado. En ese momento, debido a que ya se alcanzó el número de intentos máximo y no se obtuvo respuesta, el PDU será descartado o desechado. Para *ranging* inicial, el SS tendrá que aumentar su potencia de transmisión, ya que interpreta que el intento fue fallido debido a una falta de nivel de potencia de señal suficiente.

La BS posee mucha flexibilidad en controlar la resolución de contención. Este puede elegir los valores en los cuales el valor de *backoff* comienza y termina, la ventana de *backoff* es utilizada por igual en todos los SS, estos valores son frecuentemente actualizados dentro del mensaje UCD.

3.8 Conclusiones

En el estándar IEEE 802.16j se introduce el uso de estaciones repetidoras (*RS*), las cuales existen dos tipos, modo transparente y modo no transparente. En el modo transparente, su principal función es de ampliar la cobertura en donde la señal de la estación base es muy débil. En el modo no transparente, su principal función es la de incrementar la capacidad de datos que se pueden transmitir por el canal (*throughput*), esto es debido a que la estación repetidora puede tomar decisiones sobre el envío de los datos hacia la estación base (*BS*).

También se utilizan dos modos de operación, el modo centralizado y el modo distribuido. En el modo centralizado, las decisiones sobre el envío de los datos de los usuarios es solo realizada por la estación base. En el modo distribuido, las estaciones repetidoras pueden tomar decisiones en el envío de los datos de los usuarios.

En el modo de operación centralizado se trabaja con estaciones repetidoras transparentes, por otro lado, en el modo de operación distribuido, se utilizan estaciones repetidoras no transparentes, esto es porque una estación no transparente tiene sus propios parámetros de configuración, por lo que genera su propio tráfico de control y este es enviado a la estación base. Es importante para la estación base el recibir este tráfico de control, porque así puede conocer las decisiones de la estación repetidora y llevar así un control sobre los datos de los usuarios en la red.

La ventaja que presenta el modo transparente es la simplicidad de la estación repetidora, ya que no genera tráfico de control. La desventaja que tiene las estaciones repetidoras no transparentes, es que al generar su propio tráfico de control, hace a la estación repetidora más compleja y por lo tanto más costosa.

La utilización de estaciones repetidoras transparentes y no transparentes en modo de operación centralizado o distribuido en una red de comunicaciones, dependerá de las necesidades y tipo de tráfico a transportar, por lo que es muy importante diseñar correctamente la red debido a las desventajas y ventajas que presenta las estaciones repetidoras y el tipo de modo de operación.

Capítulo IV

Modelo de Simulación OPNET

4.1 Introducción

Para el modelado de redes de comunicaciones, existen dos formas principales. La primera de ellas se lleva a cabo mediante modelos analíticos, la segunda opción es a través de simulaciones. Cuando se habla de modelos analíticos, nos referimos al análisis matemático mediante el uso de ecuaciones. Para el caso de la opción de simulación, el uso de una herramienta que cumpla con dicho objetivo. Esta última opción nos ayuda a representar ambientes más confiables y por lo tanto obtener varios detalles, respecto al comportamiento de dichos modelos.

El uso de los modelos de simulación permite examinar una amplia variedad de configuraciones necesarias para proporcionar conclusiones generales y nuevos mecanismos de mejoramiento, que permitan incrementar el desempeño de protocolos de redes inalámbricas de banda ancha relativamente en un tiempo corto.

El principal objetivo de este capítulo es presentar el modelo de simulación utilizado para la resolución de colisiones para el estándar IEEE 802.16j. Se presenta una descripción de los módulos que constituyen al modelo y en los cuales se implementaron las técnicas de estudio.

4.2 Modelo *OPNET*

Para tener una perspectiva de cómo son implementados los modelos en *OPNET (Optimized Network Engineering Tool)* versión 16, en este capítulo se dará una pequeña descripción del diseño jerárquico usado por este paquete de simulación. Los modelos de *OPNET* están basados en tres niveles de estructura jerárquicos.

OPNET tiene una extensa gama de herramientas que permiten desarrollar modelos detallados, identificar los elementos del modelo de interés, ejecutar simulaciones y analizar los datos generados. Estas herramientas se encuentran divididas de la siguiente forma: constructor jerárquico de modelos, interfaz gráfica de simulación y analizador de resultados.

El constructor jerárquico de modelos: Contiene cuatro editores para desarrollar los modelos de los sistemas que van a ser simulados: *Network editor*, *Node editor*, *Process editor* y *Parameter editor* (Ver figura 4.1). Los cuatro están organizados en forma jerárquica y pueden ser utilizados de tal forma que un modelo desarrollado en un nivel, puede ser utilizado por otro modelo desarrollado en otro nivel más alto.

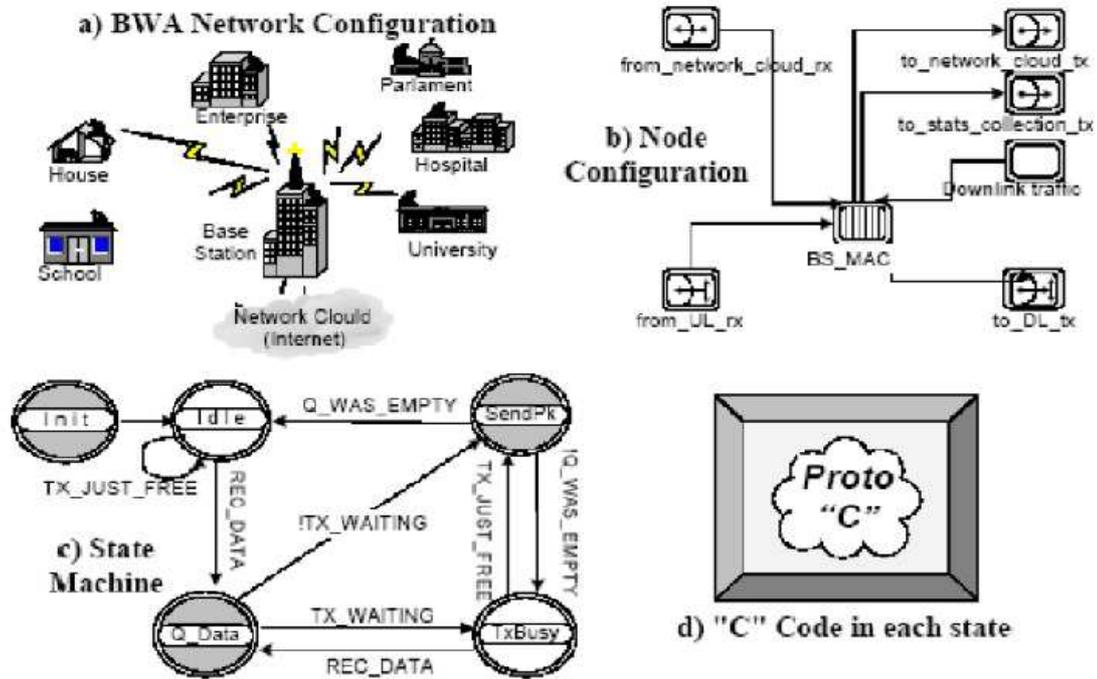


Figura 4.1 Diagrama de estado de OPNET para los modelos de simulación [4].

4.2.1 Dominio de red (Network Domain)

El nivel más alto es llamado *Network Domain* (figura 4.1 a). La función de este dominio es definir la topología de la red de comunicación, las entidades de comunicaciones llamadas nodos y sus interconexiones (bus de datos, punto a punto o enlaces de radio). Basado en estos bloques básicos de construcción, más modelos complejos pueden ser desarrollados.

El tamaño de la red puede variar desde un sistema sencillo hasta uno muy complejo. Estos modelos contienen uno o varios nodos y subredes interconectados entre sí, ya que su estructura y complejidad depende del sistema que se desea simular.

4.2.2 Dominio de nodo (Node domain)

El siguiente nivel es llamado *Node domain* (Figura 4.1b). Este nivel define la funcionalidad de cada dispositivo de comunicación que puede ser desarrollado e interconectado en la red (ejemplo: enrutadores, puentes, terminales, etc).

En un modelo de nodo, cada nodo está constituido de una fuente generadora de tráfico de datos, procesos y varios transmisores y receptores permitiendo a un nodo unirse con los enlaces de comunicación en la red.

Generador de tráfico (*Traffic generators*): Son objetos utilizados para generar fuentes de tráfico de datos. La generación del tráfico del canal tiene longitudes de paquetes y distribución de paquetes inter-arribo determinada, la cual es seleccionada de un conjunto que soporta la distribución de probabilidades.

Colas y procesos (*Queues y Processors*): Son objetos altamente detallados. Las colas son usadas para simular *buffers* de enlaces de comunicación y el comportamiento del protocolo. Algunos ejemplos de las estadísticas que las colas pueden recolectar son: su tamaño actual y/o promedio, el retardo y el sobre flujo de la cola. Cada objeto cola, puede generar múltiples sub colas en donde los paquetes pueden ser almacenados. Los procesos tienen la capacidad de manipular los paquetes pero no la habilidad de almacenarlos. Pueden ser utilizados como contenedores de paquetes o como generadores de tráfico. Esto último cuando el tráfico no puede ser modelado por la probabilidad de distribución predefinida.

El modelo de nodos especifica la manera en la que las entradas y salidas de los módulos están interconectadas, empleando conexiones. Hay dos tipos de conexiones, una para transportar paquetes y otra para transmitir valores estadísticos.

4.2.3 Dominio del proceso (*Process domain*)

El último nivel es llamado Dominio del Proceso (Figura 4.1 c). En este nivel la funcionalidad de cada objeto, cola o proceso, está definida usando la máquina de estado finito (*Finite State Machine, FSM*). Estados y transiciones gráficamente definen el avance del proceso en respuesta a los eventos. En general, cada *FSM* puede definir estados privados variables y puede hacer llamadas al código y proveer al usuario de las librerías. La *FSM* es dinámica y puede ser activada espontáneamente por otras *FSM* durante la simulación, en respuesta a eventos discretos específicos. El dinamismo de la *FSM* simplifica dramáticamente las especificaciones del protocolo que administra un número escalable de recursos o sesiones. Por último, cada estado de un modelo de proceso o cola contiene código Proto C, el cual contiene una extensa librería de funciones diseñadas para la programación de protocolos.

4.2.4 Código Proto C

Es un lenguaje de programación muy parecido al lenguaje C (Figura 4.1 d), pero cuenta con funciones especializadas para facilitar el modelado y simulación de sistemas de comunicación. Este código puede ser modificado por el usuario e incluye llamadas para establecer y manejar colas, retardos de proceso, manejo de eventos, generación aleatoria de números basadas en una distribución de probabilidad, construcción y encapsulamiento de paquetes. Proto C consiste en diagramas de transición de estados, toda la programación es en lenguaje C y variables temporales. *OPNET* posee una extensa librería, el cual incluye modelos comunes de tráfico y modelos de protocolos basados en estándares que ya han sido validados y utilizados tanto por la industria como por instituciones académicas.

Además cuenta con un mecanismo de recolección de datos estadísticos y herramienta para la representación gráfica de los datos recolectados u obtenidos mediante la simulación, estos pueden ser representados en una o varias gráficas. Este código es bajo licencia, por lo que gracias a los proyectos *PAPIIT* y *CONACyT* se pagó el uso de este para propósitos de investigación.

4.3 Modelo de simulación

Basado en una arquitectura punto-multipunto, se elaboró un modelo de red en OPNET (Figura 4.2). Este modelo consta de una *BS* la cual es el nodo central del sistema, estaciones repetidoras (*RS*) que son los nodos intermediarios y los usuarios suscriptores (*SS*) que son nodos ubicados aleatoriamente alrededor de los nodos *BS* y *RS*. Otros objetos incluidos en el modelo de red, son los objetos llamados *WiMAX*, *Applications* y *Profiles*, estos juegan un papel importante en la definición del modelo, ya que especifican las características del sistema y tipo de aplicaciones.

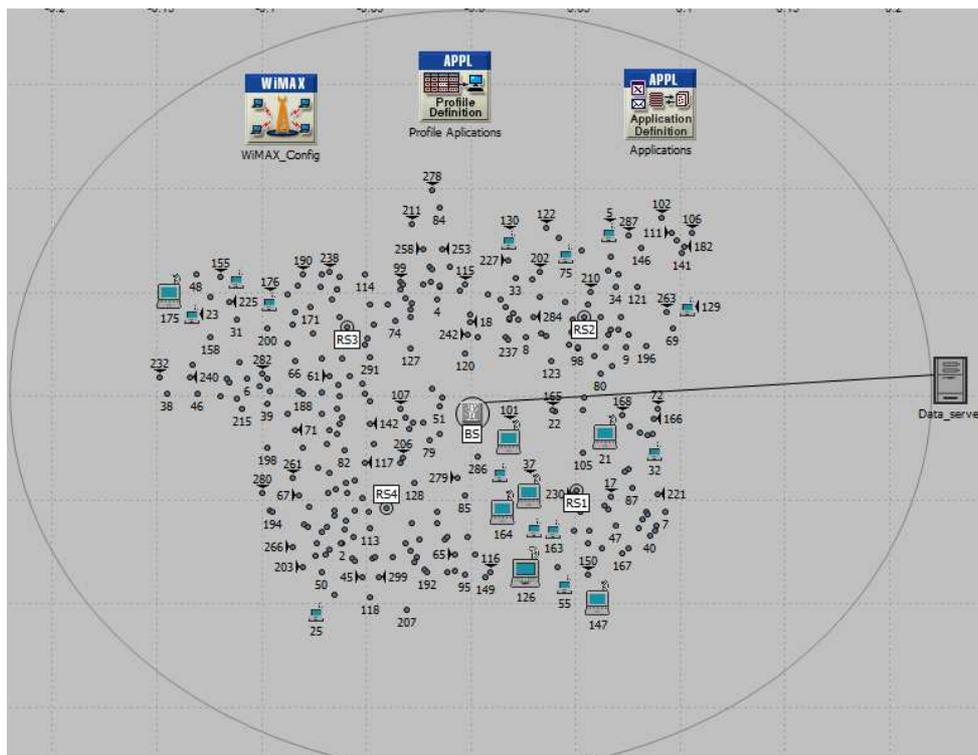


Figura 4.2 Modelo de red [16].

El modelo de red tiene el propósito principal de brindar un ambiente de simulación adecuado para diseñar y probar el funcionamiento y eficiencia del mecanismo de las colisiones. Dicho modelo se elaboró definiendo aplicaciones de datos personalizadas en la *SS*, especificando además ancho de banda, número de portadoras de datos, duración de la *trama*, duración del símbolo, entre otras.

Estas características definen la capacidad de transmisión de datos del sistema especificadas a las necesidades de la transmisión de la red, buscando saturar la red con tráfico excesivo para poder analizar el comportamiento de las diferentes técnicas de colisiones.

Para observar el funcionamiento y la eficiencia del modelo propuesto, se requiere que este modelo sea capaz de recolectar los datos estadísticos de las diferentes variables que indican el impacto de dicho modelo sobre el sistema. En este caso las variables que permiten evaluar el rendimiento y eficiencia del modelo son la tasa de datos transmitidos y recibidos correctamente (*throughput*), el retardo de acceso (*delay*) y el número de colisiones en el sistema. La recolección de los parámetros mencionados es realizada en las entidades de capa *MAC* de la *BS*, *SS* y *RS*. Con esto, el estudio se centra principalmente en el *throughput*, *delay* y número de colisiones entre las entidades de capa *MAC* desde y hacia la *BS*, *SS* y *RS*.

El modelo consistirá de varios *SS* activos, una *BS* y varios *RS*, los cuales tienen el objetivo de saturar el sistema en cuanto a sus capacidades de transmisión de datos. Para analizar esto, se tuvo que simular en diferentes escenarios con diferente número de usuarios *SS* y *RS*.

El análisis del rendimiento y eficiencia del modelo propuesto, se obtuvo estudiando los datos recolectados de *throughput*, *delay* y número de colisiones. Cada dato estadístico es almacenado en vectores de salida (*output vectors*), con estos vectores de salida se obtienen gráficas estadísticas de cada dato recolectado, un ejemplo de ello está en la figura 4.3.

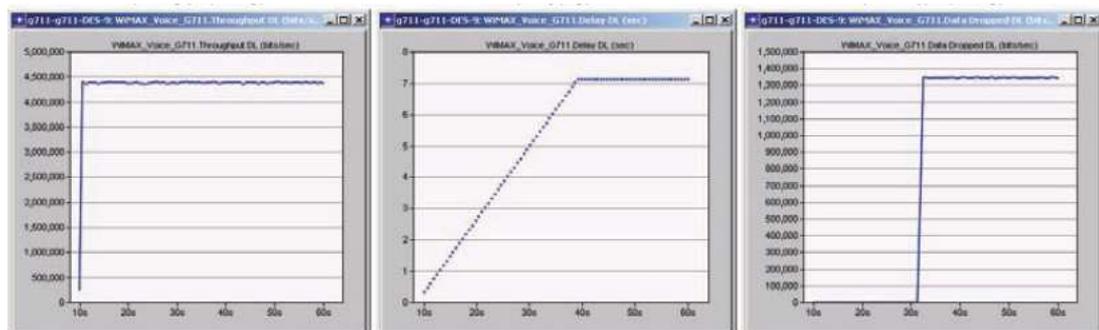


Figura 4.3 Ejemplo de estadísticas de *throughput*, retardo y colisiones respectivamente [16].

El análisis de cada gráfica irá cambiando de acuerdo al número de usuarios *SS*, *BS* y *RS* presentes en el modelo, además de que la gráfica llega a un comportamiento estable conforme más tiempo transcurre durante la simulación y recolectar así más datos de vectores de salida.

4.3.1 Diseño de la estación base (BS)

La *BS* es el nodo que representa al equipo transceptor del proveedor de servicios (datos, voz o video) (Ver figura 4.4). Está formada por múltiples procesos que se encargan de realizar tareas de enlace y ruteo entre diferentes entidades como servidores, ruteadores, etc.

La *BS* cuenta también con su correspondiente módulo de capa *MAC* basado en el estándar IEEE 802.16. Cabe mencionar que el módulo *MAC* lo comparte los nodos *SS* y *BS* por razones de optimización.

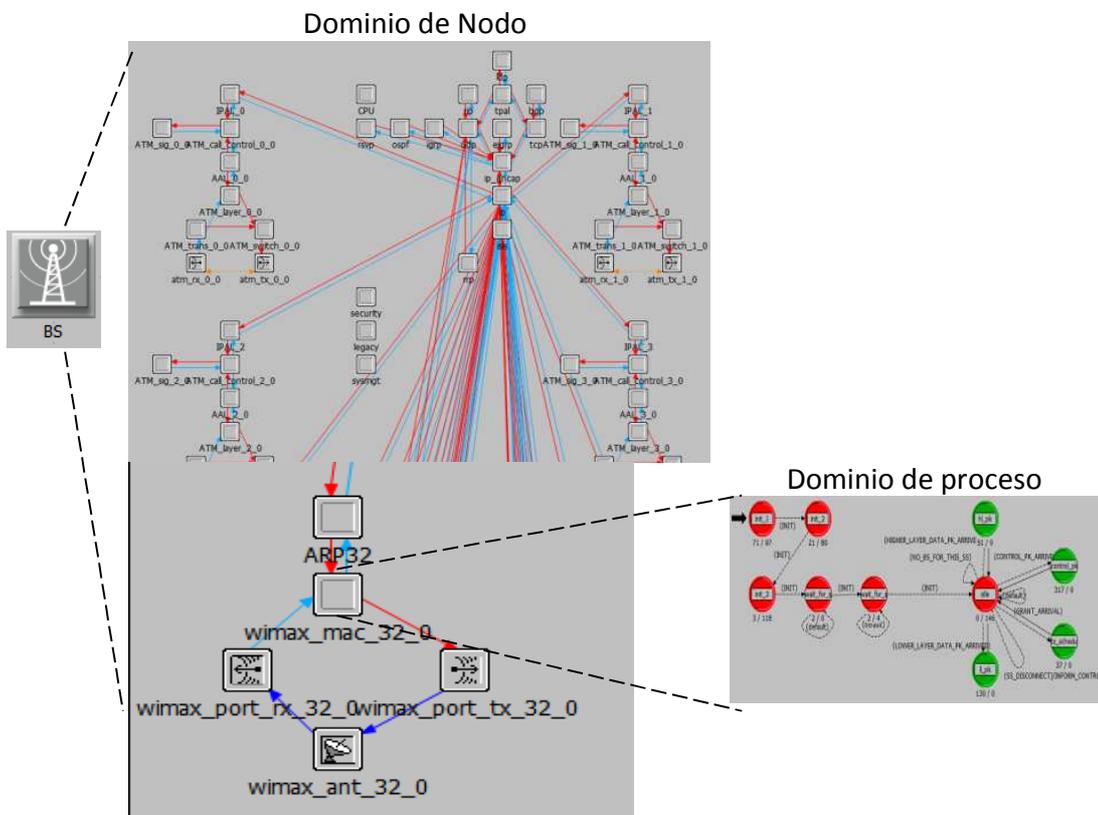


Figura 4.4 Estructura de la estación base (BS) [16].

A su vez el módulo *wimax_mac* tiene un proceso llamado “hijo” que realiza las funciones específicas de la *BS* (Ver figura 4.5). Este módulo es llamado *wimax_bs_control*, el cual incluye como el recibo, envío, generación y procesamiento de los paquetes de control, de datos, generación de *frames* o *tramas* y procesamiento de solicitudes de ancho de banda *BWR*.

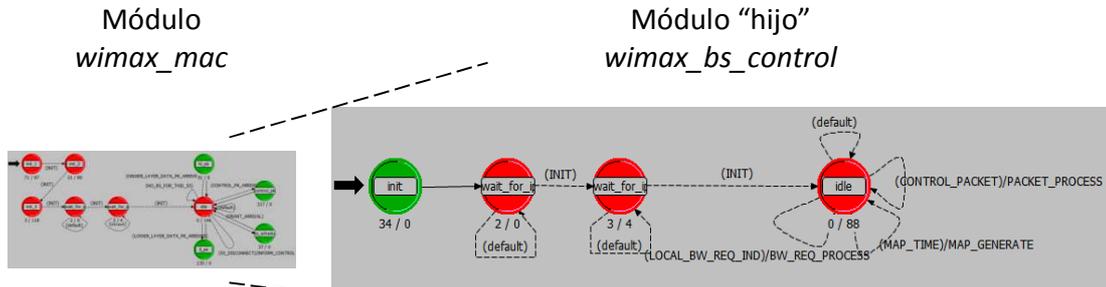


Figura 4.5 Proceso “hijo” *wimax_bs_control* [16].

4.3.2 Diseño de la estación repetidora (RS)

Este nodo tiene dos configuraciones de modo de operación, transparente y no transparente. Su principal función es de retransmitir los paquetes de datos desde el SS hacia la BS. Dependiendo del modo de operación, el RS tendrá participación en el manejo y envío de los paquetes dependiendo de la configuración y necesidades de la red. El módulo de capa MAC es la misma para todas las estaciones (BS, RS y SS).

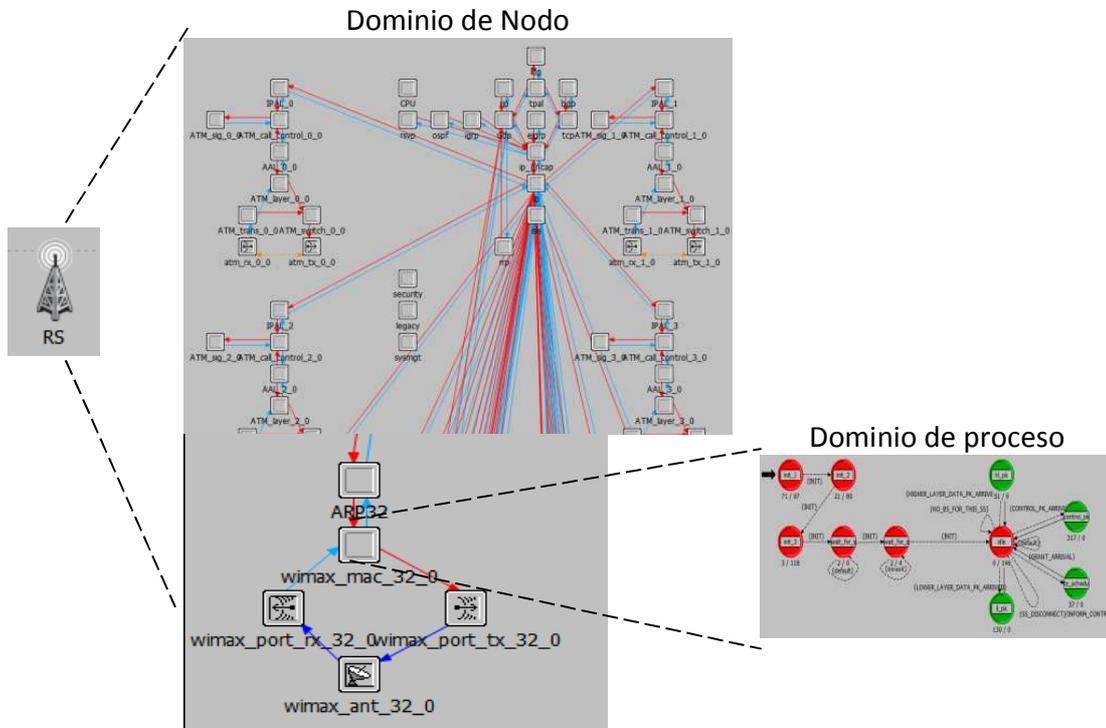


Figura 4.6 Estructura de la RS [16].

El módulo del proceso “hijo” del RS es el *wimax_rs_control* (Ver figura 4.7), el cual está diseñado para controlar y obtener parámetros de ajustes de las transmisiones de paquetes de control o de datos que ocurren y pasan a través de este módulo. Este módulo del proceso “hijo” está diseñado para operar en modo transparente, la implementación del modo no transparente no está diseñada e implantada en esta versión de *OPNET*, por lo que está abierto a modificación para propósitos de simulación en caso de que se quisiera operar en el modo no transparente.

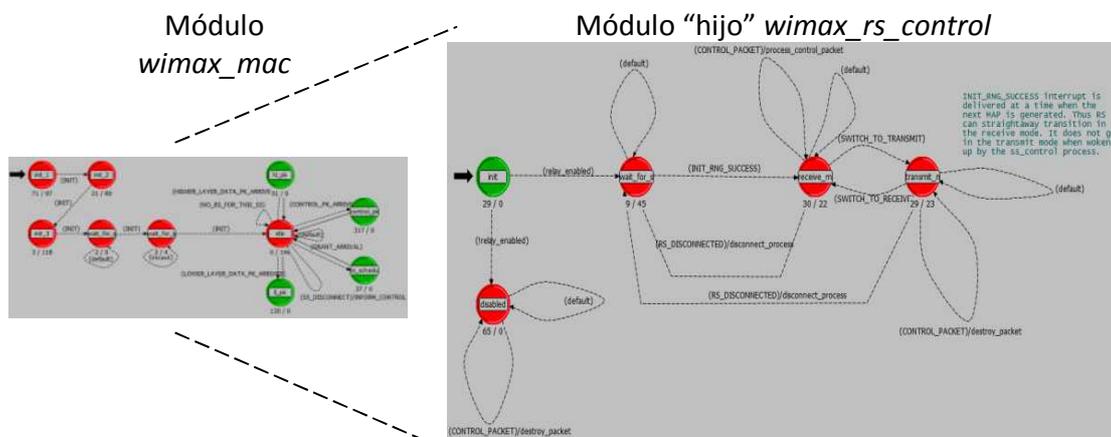


Figura 4.7 Proceso “hijo” *wimax_rs_control* [16].

4.3.3 Diseño de la estación suscriptor (SS)

El *SS* es el nodo que representa a la estación suscriptor (*subscriber station*) (Ver figura 4.8) que está compuesta por varios procesos encargados de realizar las principales funciones del modelo de referencia *TCP/IP*. Estos procesos consisten en la capa de aplicación, las capas *TCP* y *UDP*, la capa *IP* (Internet) y la capa *WiMAX MAC*. También cuenta con procesos específicos que le permiten soportar movilidad.

4.3.5 Objetos de *Applications*, *Profile* y *WiMAX*

El objeto de *Applications* tiene como objetivo activar o habilitar dentro de la simulación el tipo de tráfico que se estará manejando por todos los *SS* y los servidores en la red. Definiendo además el tipo de servicio, el tamaño del archivo que se estará transmitiendo, etc.

El objeto *Profile* tiene como objetivo especificar el modo en que cada aplicación se comportará dentro de la simulación, como por ejemplo definir el momento en que se inicia y termina diferentes tipos de tráfico (pudiendo ser de manera serial o concurrente) y duración de cada tipo de tráfico en segundos.

El objeto *WiMAX* se establece que clase de servicio (*Gold*, *Silver*, *Bronce* y *Básica*) utilizara uno o varios tipos de tráfico, definiendo además la tasa de datos máxima y mínima que utilizara la clase de servicio seleccionada. Se definen además parámetros de contención, duración del *frame* o *trama*, duración del símbolo, número de sub portadoras, estructura del *frame* o *trama* y técnica de duplexación.

En la figura 4.11 se muestra los iconos que se utilizan dentro del simulador *OPNET*, para representar de manera gráfica lo descrito anteriormente.



Figura 4.11 Objetos del modelo de red [16].

Capítulo V

Implementación y Resultados

5.1 Introducción

En este trabajo de tesis, se analizan el uso de códigos *CDMA* junto con el uso de estaciones repetidoras (*Relay Station, RS*) como una técnica de resolución de colisiones, la técnica que utiliza actualmente el estándar IEEE 802.16 es el *truncated binary exponential backoff (TBEB)*, como ya se ha mencionado con anterioridad, esta técnica es poco eficiente cuando hay muchos usuarios, ya que penaliza a los usuarios que provocan la colisión con tiempos de espera y/o oportunidades de transmisión demasiado largos, lo que genera un retardo lo suficientemente grande para que aplicaciones de voz y algunas de datos no sean soportadas.

La técnica que se propone es el utilizar códigos *CDMA* en las transmisiones de contención, se mostrará más adelante que el utilizar códigos *CDMA* disminuye el número de colisiones cuando la red está en saturación o en el límite de su capacidad. La desventaja que presenta esta técnica es que existe un número limitado de rango o intervalo de códigos *CDMA* que se pueden utilizar, por lo que existe una alta probabilidad de que los usuarios *SS* escojan un mismo código *CDMA* cuando estos son insuficientes, si ocurre esto, se produce una colisión entre dos o más usuarios.

Existen en esta área muchos trabajos y estudios sobre resolución de contenciones, en las cuales se busca disminuir el número de colisiones cuando la red está saturada o al límite de su capacidad, se investiga además mejorar el *throughput*, disminuir el retardo (*delay*), disminuir el número de colisiones y tener el mayor número de usuarios *SS* activos en la red.

En las dos técnicas mencionadas anteriormente y en la mayoría de los trabajos sobre esta área, se han enfocado en una red donde existe solo un una estación base (*BS*) y varios *SS* activos. En el estándar IEEE 802.16j se introduce el concepto de estaciones repetidoras (*RS*), estos *RS* nos sirven, como ya se mencionó, como repetidores que nos ayudan a ampliar la cobertura y/o capacidad de la red (dependiendo del modo de operación, transparente o no transparente). Se propone en tomar ventaja de estos *RS* en el manejo de la resolución de colisión, ya que estos nos pueden dar una mejora importante y disminuir las colisiones en la red en comparación a la técnica *TBEB*.

5.2 Implementación de la técnica

5.2.1 Técnica de resolución de contenciones en IEEE 802.16

En el estándar IEEE 802.16 se utiliza el método del algoritmo *exponential backoff* (*TBEB, truncated binary exponential backoff*), el cual básicamente determina el tiempo u oportunidades de transmisión (número de *slots*) que tiene que esperar un *SS* activo para poder transmitir debido a que ocurrió uno o más colisiones.

Esta técnica consiste en que si un *SS* activo transmite una reservación de ancho de banda o de *ranging* en un *slot* y además otro usuario (*SS*) activo transmite de igual manera una petición o reservación de ancho de banda en el mismo *slot*, estos colisionaran, ya que la *BS* o *MR-BS* no entenderá la información cuando llegue a ellos, ya que en un *slot* existen dos transmisiones diferentes. Por lo que se mandará llamar al método de *backoff* después de que los usuarios en un determinado tiempo no reciban respuesta o confirmación por parte de la *BS* o *MR-BS*, la ventana mínima de contención se irá incrementando en factor de 2 cada vez que se colisione hasta llegar a una ventana máxima de contención. Otra causa por la cual el sistema interpreta una colisión, es cuando al transmitir la petición o reservación, no se reciba una respuesta después de un tiempo determinado, esto debido posiblemente a interferencia o pérdida de paquetes.

Cuando ocurren el mayor número de colisiones es en *ranging* inicial y en peticiones de ancho de banda (*BWR*), esto es porque todos los usuarios piden sincronizarse con la *BS* además de solicitar reservación de ancho banda, el *BS* está recibiendo peticiones de todos los usuarios *SS* activos diferentes casi al mismo tiempo, como el recurso de ancho de banda es limitado, la red no puede brindar recursos a todos los usuarios al mismo tiempo, por lo que algunos usuarios no tendrán de manera inmediata recursos de reservación de ancho de banda, por lo que los *SS* activos interpretaran que su petición causó colisión y tendrán que retransmitir hasta que sea exitosa.

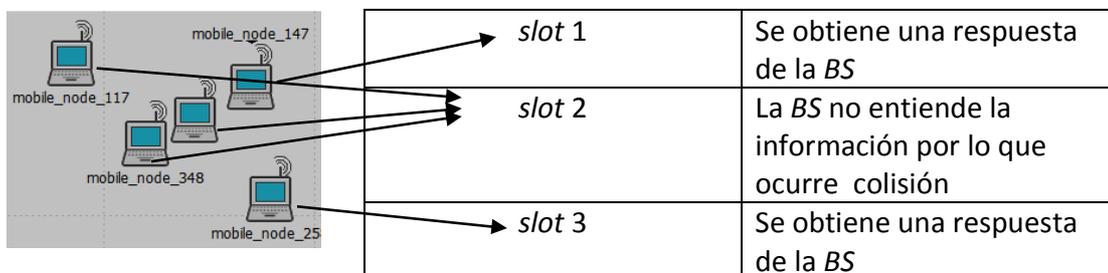


Figura 5.1 Ejemplo de colisión.

En la figura 5.1, en el ejemplo se observa que algunos usuarios *SS* activos transmiten en el *slot* que escogieron aleatoriamente de entre los tres disponibles, en el *slot* 1 y *slot* 3 solo transmitió un usuario en cada uno, por lo que no ocurre colisión. Para el *slot* 2, tres usuarios transmitieron en ese *slot*, por lo que esos tres usuarios colisionaron y serán penalizados con un tiempo de espera por el método de *backoff*, pasado ese tiempo de espera podrán retransmitir hasta un máximo de 16 intentos, pasados esos intentos el paquete se desecha.

5.2.2 Técnica de resolución de contenciones con códigos CDMA

Esta técnica muestra una mejora para evitar las colisiones con respecto a la técnica anterior, los códigos *CDMA* son códigos ortogonales entre sí, esto quiere decir que no se traslapan entre ellos, permitiendo que varios usuarios transmitan sin colisionar entre ellos. Se manejan diferentes grupos o conjuntos de códigos *CDMA* dependiendo el propósito, existen grupos de códigos *CDMA* con un número determinado de códigos diferentes, en los cuales cada grupo de códigos está destinado para una tarea en específico, por ejemplo para *ranging* inicial se tiene un grupo con determinado número de códigos *CDMA* de los cuales uno o varios usuarios (*SS*) que están en la etapa de *ranging* inicial pueden escoger aleatoriamente un código dentro de ese grupo. Una vez escogido su código *CDMA*, se escoge de manera aleatoria un *slot* u oportunidad de transmisión con su código *CDMA* seleccionado previamente.

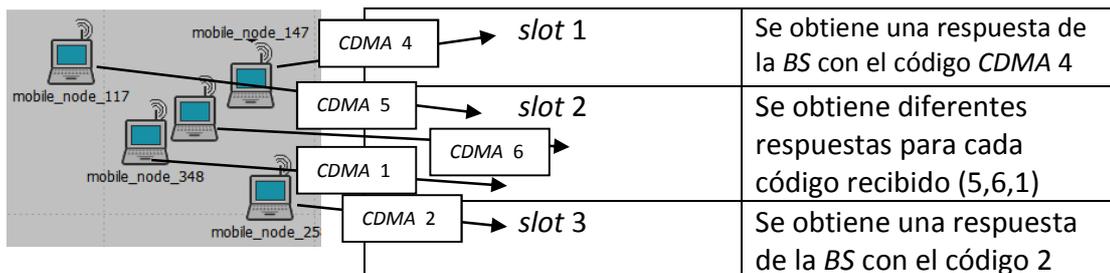


Figura 5.2 Ejemplo del uso de códigos *CDMA*.

Como se muestra en la figura 5.2, los usuarios (*SS*) activos escogen de manera aleatoria un código *CDMA*, cuando estos transmiten en *slots* escogidos aleatoriamente, se observa que nuevamente tres usuarios activos escogen un mismo *slot*, pero estos no colisionan, ya que cada uno de ellos transmitieron en el *slot* 2 con un código *CDMA* diferente.

Cabe señalar que teóricamente se puede utilizar un valor máximo de 256 códigos *CDMA* [16], pero esto generaría resultados poco confiables debido a que en la realidad un número de códigos *CDMA* demasiado grande causaría que la *BS* sea sumamente compleja, más costosa y por consiguiente poco factible [6].

5.2.3 Técnica con códigos *CDMA* y uso de *RS*

Esta técnica se basa en la idea de que el *RS* tenga su propio conjunto de códigos *CDMA* con los cuales se comunica con la *BS* y generar mensajes (con su propio código *CDMA*) los cuales contienen *tuplas*, para después reenviar de una manera eficiente las peticiones y datos de los *SS* conectados a través de él, hacia la *BS*.

Las *tuplas* están formadas por un conjunto o lista de elementos de cada *SS* activo, como lo son:

- Código *CDMA* el cual el *SS* transmite.
- *Slot* donde transmite.
- Id del *RS* y/o *SS*.

Estos datos se van almacenando en una lista, la cual se va llenando con diferentes peticiones de diferentes usuarios y enviándose después esta lista dentro de un mensaje desde el *RS* hacia la *BS*, este mensaje al ser recibido en la *BS*, revisa la lista de *tuplas* y responde a cada usuario (dependiendo si es para *Ranging* inicial o *BWR*) con la reservación solicitada haciendo referencia a los datos de cada *tupla* enviada por el o los *SS* activos.

Este mecanismo de *tuplas* sirve para organizar y despachar de manera eficiente las distintas peticiones de los usuarios, esto hace que el *RS* y *MR-BS* tenga un control sobre el envío y recepción de los datos, se prioriza el envío de peticiones *BWR* sobre peticiones de *ranging*, ya que las peticiones de *BWR* son en *unicast* y las respuestas de la petición de *ranging* son en *broadcast*.

5.2.4 Modelo de simulación

Se formaron 2 redes, una con 200 usuarios y otra con 100 usuarios distribuidos aleatoriamente conectados a una *BS*, en ambas se simula tráfico de datos mediante un servidor de datos, en estas redes se varía el número de *RS* a utilizar, así como también el número de códigos *CDMA* con las cuales dispone los *SS* activos para transmitir (ver tabla 5.1).

| Parámetros | Red con 200 usuarios | Red con 100 usuarios |
|---|--|--|
| Duración <i>frame</i> o <i>trama</i> | 5 milisegundos | 5 milisegundos |
| Tiempo de simulación | 60 segundos | 60 segundos |
| Tipo de tráfico | Datos (Distribución Ethernet) | Datos (Distribución Ethernet) |
| <i>Slots</i> de contención | 2 para <i>ranging</i> inicial 2 para <i>BWR</i> | 2 para <i>ranging</i> inicial 2 para <i>BWR</i> |
| Códigos <i>CDMA</i> | 4, 6, 8 y 10 | 4, 6, 8 y 10 |
| Número de códigos por <i>slot</i> de contención | 1 | 1 |
| Duración del símbolo | 102.86 microsegundos | 102.86 microsegundos |
| Número de sub portadoras | 2048 | 2048 |
| Capacidad del canal | 20 MHz | 20 MHz |
| Tipo <i>Scheduling</i> | <i>Best effort</i> | <i>Best effort</i> |
| Número de <i>RS</i> | 4 | 1,3 y 5 |

Tabla 5.1 Parámetros de la red.

El tráfico de paquetes de datos se modeló mediante una distribución *PDF* (*Probability Density function*), simulando tráfico de Internet, esta distribución de tráfico la utiliza el grupo de trabajo IEEE 802.14 [12] [13], en el cual el tamaño del mensaje depende de la probabilidad en la distribución de la siguiente figura 5.3.

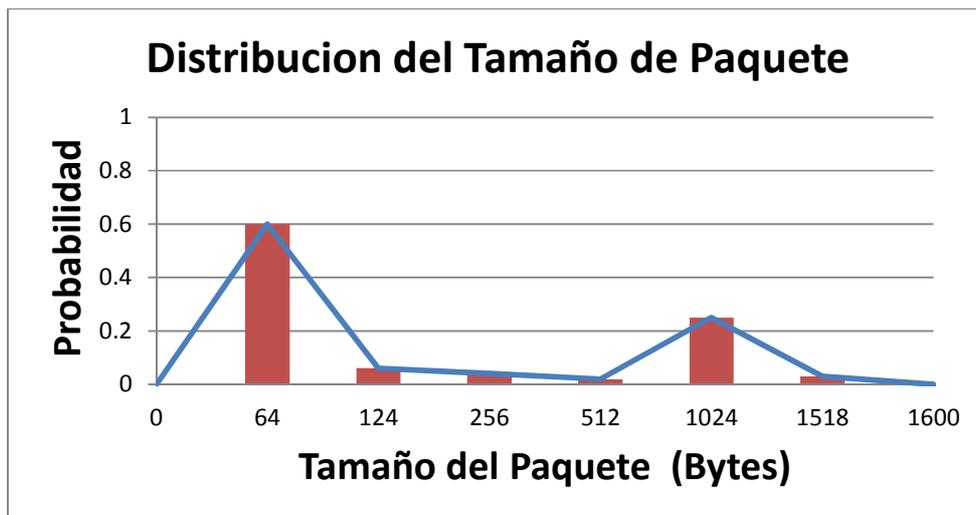


Figura 5.3 Distribución del tamaño de paquete.

Esta distribución nos genera en promedio un tamaño de paquete de aproximadamente 368.1 bytes, como lo muestra la siguiente formula.

$$\begin{aligned} \text{Tamaño promedio de paquete} &= \sum_{k=1}^{k=6} Pk_i * P_i \\ &= ((64 \text{ bytes} * 0.6) + (128 \text{ bytes} * 0.06) + (256 \text{ bytes} * 0.04) \\ &\quad + (512 \text{ bytes} * 0.02) + (1024 \text{ bytes} * 0.25) + (1518 \text{ bytes} * 0.03)) \\ &= \mathbf{368.1 \text{ bytes}} \end{aligned}$$

Cada estación activa generara en promedio 64 kbps por lo que su tiempo promedio de arribo de paquetes es de:

$$\text{Tiempo de arribo de paquetes} = \frac{1}{\frac{64 \text{ Kbps}}{368.1 \text{ bytes} * 8}} = \mathbf{0.046 \text{ segundos}}$$

$$\text{Paquetes por segundo} = \lambda = \frac{1}{0.046} = 21.7 \approx \mathbf{22 \frac{\text{Paquetes}}{\text{segundos}}}$$

$$\begin{aligned} \text{Tasa de datos por usuario} &= \left(21.7 \frac{\text{paquetes}}{\text{segundo}} * 368.1 \text{ bytes} * 8 \right) = \\ &\mathbf{63.9 \text{ Kbps} \approx 64 \text{ Kbps}} \end{aligned}$$

Ahora se calculará teóricamente el *throughput* máximo de la red *WiMAX* en *OFDMA*, con un canal de 20 MHz, la variable "m" indica la modulación, por ser *QPSK* el valor de "m" es de 2. El valor del *throughput* se ve determinado por la capacidad de la sub trama de *Uplink*, ya que es en donde se envía los datos de los usuarios hacia la estación base (*BS*).

La sub trama de *UL* está constituida por 70 sub canales lógicos, de los cuales 6 u 8 son para *ranging*, en cada sub canal lógico existen 16 sub portadoras para transmitir datos, el número de símbolos *OFDMA* son 18. La trama es de 5 milisegundos, por lo que implica que existen (1/5 ms) 200 tramas por segundo.

$$\begin{aligned} \text{Throughput máximo} &= \\ &(\text{sub canales lógicos}) * (\text{subportadoras en un subcanal}) * (\text{simbolos OFDMA}) * \\ &(\text{modulacion "m"}) * (\text{subtramas en un segundo}) = (70) * (16) * (18) * (2) * \\ &(200) = \mathbf{8.064 \text{ Mbps}} \end{aligned}$$

Debido a que en la capa *PHY* se agrega encabezado, se redondea el número de paquetes y existe de 6 a 8 canales de *ranging*, se tiene un *throughput* de entre el 60 % y 70% de *throughput* máximo calculado [17].

Asignando así la distribución *PDF* y el tiempo de arribo a la simulación como lo muestra la figura 5.6.

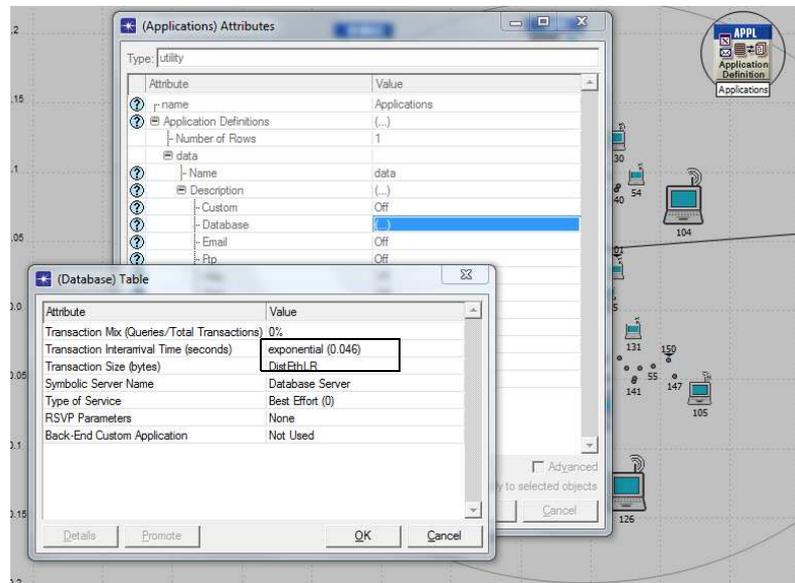


Figura 5.6 Parámetros de simulación [16].

En el cual el tiempo de arribo es de 0.046 segundos, como se calculó anteriormente, se asigna que el tamaño de paquete sea conforme a la gráfica *DistEthLR* (368.1 bytes promedio), se utiliza un servicio *Best Effort* el cual determina que todos los usuarios van a transmitir con el mejor esfuerzo, sin que haya prioridad o preferencia por alguno, es decir, todos tienen la misma oportunidad de transmitir o no transmitir.

Para el conteo de colisiones, se implementó el siguiente código (tabla 5.2) el cual es un contador que hace distinción entre el tiempo, id del paquete y código *CDMA* utilizado por cada usuario para así evitar un conteo erróneo y múltiple de diferentes paquetes con código *CDMA*.

```
void
wimax_inoise_mt (OP_SIM_CONTEXT_ARG_OPT_COMMA Packet * pkptr_prev,
Packet * pkptr_arriv)
{
    extern int    colision; //la variable global está en wimax_phy_support.ex.c
    double       current_time;
    extern double current_time_prev; //evitar doble conteo de colision.
    int          prev_mac;
    int          arrv_mac;

    FIN_MT (wimax_inoise (pkptr_prev, pkptr_arriv));
```

```

        /*Si el paquete termina donde el otro comienza, no hay colisión */
if ((prev_pk_end_time = op_td_get_dbl (pkptr_prev, OPC_TDA_RA_END_RX)) ==
(current_sim_time = op_sim_time ()))
FOUT;

/* Colisión entre paquetes con código CDMA y sin código son ignorados */

is_prev_cdma = op_pk_encap_flag_is_set (pkptr_prev,
WIMAXC_CDMA_ENCAP_FLAG_INDEX);
is_arrv_cdma = op_pk_encap_flag_is_set (pkptr_arriv,
WIMAXC_CDMA_ENCAP_FLAG_INDEX);

if ((is_prev_cdma && !is_arrv_cdma) || (!is_prev_cdma && is_arrv_cdma))
FOUT;

/* Hay que analizar si es un paquete con código CDMA o no */
/* Si ambos paquetes son paquetes CDMA*/
if (is_prev_cdma)
{
    op_pk_fd_access_read_only_ptr (pkptr_prev,
burst_info_field_index(pkptr_prev), (const void*)&prev_burst_info_ptr);
    op_pk_fd_access_read_only_ptr (pkptr_arriv,
burst_info_field_index(pkptr_arriv), (const void*)&arriv_burst_info_ptr);

/*Revisar antes en que slots se pone cual código.*/
    current_time = op_sim_time ();
    op_pk_nfd_access (pkptr_prev, "CDMA Code", &prev_cdma_code);
//Accesando info de código CDMA y MAC de los paquetes que llegan.
    op_pk_nfd_access (pkptr_arriv, "CDMA Code", &arrv_cdma_code);
    printf ("En el slot de contencion: [%d] \n", prev_burst_info_ptr-
>subchnl_start);
    printf ("codigo primero llega [%i] \n", prev_cdma_code);
    printf ("En el slot de contencion: [%d] \n", arriv_burst_info_ptr-
>subchnl_start);
    printf ("codigo segundo llega [%i] \n", arrv_cdma_code);
    printf ("En el tiempo %lf \n\n", current_time);

if (arriv_burst_info_ptr->subchnl_start == prev_burst_info_ptr->subchnl_start)
{
    /*Existe una alineación en frecuencia de los códigos CDMA por lo que no hay
interferencia*/

    /* Extrae el código de cada paquete CDMA*/

    op_pk_nfd_access (pkptr_prev, "CDMA Code", &prev_cdma_code);
    pp_pk_nfd_access (pkptr_arriv, "CDMA Code", &arrv_cdma_code);

```

```

//Imprimir los códigos que se están enviando a través de la capa PHY
printf ("Codigos en el mismo slot de contencion: %d \n", arriv_burst_info_ptr-
>subchnl_start);
printf ("codigo primero llega [%i] \n", prev_cdma_code);
printf ("codigo segundo llega [%i] \n\n", arriv_cdma_code);

/* Checar si hay colisión en el dominio del código*/
if (prev_cdma_code == arriv_cdma_code)
{
if (op_prg_oddb_ltrace_active ("wimax_ps_cdma"))
{
printf ("+++++COLISION+++++ \n");
printf ("Dos paquetes con el mismo codigo CDMA: [%d] colisionaron el mismo
slot \n", prev_cdma_code);
printf ("el primer paquete (pkid: "SIMC_PK_ID_FMT") sobrevive \n",
op_pk_id (pkptr_prev));
printf ("el segundo paquete (pkid: "SIMC_PK_ID_FMT") es ignorado. \n",
op_pk_id (pkptr_arriv));
current_time = op_sim_time ();
printf ("Tiempos simulacion %lf", current_time);
printf ("\n\n Colision por codigo CDMA en un mismo slot \n\n");
}

/* Diferenciar una colisión múltiple dentro de un slot con el mismo código CDMA pero
en diferente tiempo*/
if (current_time != current_time_prev)
{
colision++;
current_time_prev = current_time;
}
else
{
// No cuenta la colisión, ya que es una colisión múltiple
}
printf ("Colision numero: [%i] \n\n", colision);
#endif
}
else
{
/*Lo códigos no son los mismos, no hay interferencia*/
}
}
else
{
/*Los códigos no se traslapan, no hay interferencia */
}
}

```

```

    }
    else if (is_prev_cqich)
    {
        /*No es un paquete con código CDMA valido*/
    }
else
/*Determinar si son paquetes no CDMA validos o ruido. */
{
    // Fuera del alcance de esta tesis.
}
}
FOUT
}

```

Tabla 5.2 Código para colisiones [16].

El rango de códigos *CDMA* se asignan para diferentes propósitos:

- Códigos para *ranging* inicial.
- Códigos para *ranging* de *Handoff*.
- Códigos para *ranging* periódico.
- Códigos para *BWR*.
- Códigos para *ranging* inicial de *RS*.
- Códigos dedicados para *RS*.

Por lo que se crean las variables para cada propósito en una lista donde se asigna el número o intervalo de códigos *CDMA* que se desean utilizar. La tabla 5.3 muestra el código de cómo se asigna cada intervalo de códigos para diferente propósitos, donde termina un intervalo, comienza el siguiente, el tamaño de cada intervalo es el que se varia siendo de 4, 6, 8 y 10 para cada propósito, se puede tener en total un conjunto de 256 códigos, el problema radica en que valores cercanos a este valor genera resultados poco confiables [16].

```

/* Rango de Códigos CDMA*/
op_ima_obj_attr_get_objid (compound_attr1_objid, "CDMA Codes",
&compound_attr2_objid);
compound_attr2_objid = op_topo_child (compound_attr2_objid,
OPC_OBJTYPE_GENERIC, 0);
// Códigos para ranging inicial.
op_ima_obj_attr_get_int32 (compound_attr2_objid, "Number of Initial Ranging
Codes", &num_codes);
    range_ptr = &params_ptr->codeset[WimaxC_CDMA_Initial_Ranging];
    range_ptr->min = 1;
    range_ptr->max = num_codes;
    curr_code = range_ptr->max + 1;

```

```

// Códigos para ranging de Handoff.
op_ima_obj_attr_get_int32 (compound_attr2_objid, "Number of HO Ranging Codes",
&num_codes);
    range_ptr = &params_ptr-
>codeset[WimaxC_CDMA_Handover_Ranging];
    range_ptr->min = curr_code;
    range_ptr->max = curr_code + num_codes - 1;
    curr_code = range_ptr->max + 1;
// Códigos para ranging periódico.
op_ima_obj_attr_get_int32 (compound_attr2_objid, "Number of Periodic Ranging
Codes", &num_codes);
    range_ptr = &params_ptr-
>codeset[WimaxC_CDMA_Periodic_Ranging];
    range_ptr->min = curr_code;
    range_ptr->max = curr_code + num_codes - 1;
    curr_code = range_ptr->max + 1;
// Códigos para BWR
op_ima_obj_attr_get_int32 (compound_attr2_objid, "Number of Bandwidth Request
Codes", &num_codes);
    range_ptr = &params_ptr-
>codeset[WimaxC_CDMA_Bandwidth_Request];
    range_ptr->min = curr_code;
    range_ptr->max = curr_code + num_codes - 1;
    curr_code = range_ptr->max + 1;
// Códigos para ranging inicial de RS
op_ima_obj_attr_get_int32 (compound_attr2_objid, "Number of RS Initial Ranging
Codes", &num_codes);
    range_ptr = &params_ptr-
>codeset[WimaxC_CDMA_RS_Initial_Ranging];
    range_ptr->min = curr_code;
    range_ptr->max = curr_code + num_codes - 1;
    curr_code = range_ptr->max + 1;
// Códigos dedicados para RS
op_ima_obj_attr_get_int32 (compound_attr2_objid, "Number of RS Dedicated Codes",
&num_codes);
    range_ptr = &params_ptr->codeset[WimaxC_CDMA_RS_Dedicated];
    range_ptr->min = curr_code;
    range_ptr->max = curr_code + num_codes - 1;
    curr_code = range_ptr->max;
// Si excedemos el límite de número de códigos
if (curr_code > WIMAXC_MAX_CDMA_NUMBER)
    {
        wimax_cdma_codes_limit_exceeded (params_ptr->bs_name_str,
curr_code, WIMAXC_MAX_CDMA_NUMBER);
    }

```

Tabla 5.3 Intervalo de código CDMA para diferentes propósitos [16].

Estos rangos de códigos *CDMA* para diferentes propósitos, se variaron en 4, 6, 8 y 10 para poder analizar cuál es el número adecuado a utilizar. El por qué se utilizaron estos números se menciona en la sección de conclusiones.

El código que escoge un *SS* activo de entre los diferentes rangos o intervalos (4, 6, 8 y 10) es de forma aleatoria con una distribución uniforme.

Para el caso de *RS*, se utilizó el siguiente código (ver tabla 5.4) para generar las *tuplas* o listas formadas por código *CDMA*, *slot* donde se transmite el *ranging* o el *BWR* y el *Id* del usuario para formarlas y después enviarse mediante un único mensaje *MR_RNG-REP* el cual contiene las *tuplas* capturadas en ese momento.

```
static void
wimax_rs_control_cdma_process (Packet* pkptr)
{
    int                cdma_code;
    int                symb_index;
    int                subch_index;
    double             rx_power = -1.0;
    WimaxT_CDMA_Code_Type  ith_type;
    WimaxT_CDMA_Range*  codeset_array;
    WimaxT_CDMA_Range  range;
    WimaxT_Received_CDMA_Tuple* existing_cdma_tuple_ptr;
    WimaxT_Cached_CDMA_Tuple*  cached_cdma_tuple_ptr;
    Objid              ss_objid;

    FIN (wimax_rs_control_cdma_process (...));

    /*Extrae el código CDMA del paquete.*/
    op_pk_nfd_get_int32 (pkptr, "CDMA Code", &cdma_code);

    /* identifica el slot en el cual se envía*/
    op_pk_nfd_get_int32 (pkptr, "Symbol Index", &symb_index);
    op_pk_nfd_get_int32 (pkptr, "Subchannel Index", &subch_index);
    /*Nos interesamos en paquetes de ranging y de BWR*/
    /*Busca el rango en el cual el código cae */
    codeset_array = data_plane_config_ptr->bs_params_ptr->codeset;
    for (ith_type = WimaxC_CDMA_Initial_Ranging; ith_type <
WimaxC_CDMA_Types_Number; ith_type++)
    {
        /* Obtén el rango*/
        range = codeset_array [ith_type];
        if ((cdma_code - range.min)*(cdma_code - range.max) <= 0)
            break;
    }
}
```

```

        if ((ith_type == WimaxC_CDMA_Periodic_Ranging) || (ith_type ==
WimaxC_CDMA_Bandwidth_Request))
        {
/* En este punto se recibió un paquete de ranging periódico o de BWR, dependiendo en
que rango cae*/

/* Almacena los códigos CDMA y se envían después en un mensaje MR_RNG-REP
hacia la BS*/

/* Busca si este código CDMA ya existe*/
existing_cdma_tuple_ptr = wimax_rs_control_cdma_tuple_find (cdma_code,
symb_index, subch_index);

/* Si existe, sobrescríbalo con la potencia recibida, de otra manera crea un nuevo
elemento*/
        if (existing_cdma_tuple_ptr != OPC_NIL)
        {
            existing_cdma_tuple_ptr->received_power      = rx_power;
        }
        else
        {
            existing_cdma_tuple_ptr =
(WimaxT_Received_CDMA_Tuple*) op_prg_cmo_alloc (wimax_catmem_handle,
sizeof (WimaxT_Received_CDMA_Tuple));

/*Llena con estos elementos la tupla*/
            existing_cdma_tuple_ptr->cdma_code           = cdma_code;
            existing_cdma_tuple_ptr->symbol_index        = symb_index;
            existing_cdma_tuple_ptr->subchannel_index    = subch_index;
            existing_cdma_tuple_ptr->rcvd_frame         = frame_number;
            existing_cdma_tuple_ptr->received_power      = rx_power;

/* Para propósitos de eficiencia, envía también el tipo de código CDMA*/
            existing_cdma_tuple_ptr->type                = ith_type;

/* Inserta estos elementos en la lista de las tuplas CDMA*/
op_prg_list_insert (cdma_tuple_lptr, existing_cdma_tuple_ptr,
OPC_LISTPOS_TAIL);
        }
/* Si existen códigos CDMA para BWR, crearlos en una lista diferente*/
if (ith_type == WimaxC_CDMA_Bandwidth_Request)
        {
            OpT_Int64*                                key_ptr;
            OpT_Int64                                  cdma_code_64bit = cdma_code;
            OpT_Int64                                  symb_index_64bit= symb_index;
            OpT_Int64                                  subch_index_64bit= subch_index;

```

```

    /*Extrae el Id de este SS activo*/
    op_pk_nfd_get (pkptr, "SS Objid", &ss_objid);

    cached_cdma_tuple_ptr = (WimaxT_Cached_CDMA_Tuple*) op_prg_cmo_alloc
    (wimax_catmem_handle, sizeof (WimaxT_Cached_CDMA_Tuple));

    /* Construye una clave o llave de 64 bist para ponerla en una tabla de tipo hash*/
    key_ptr = (OpT_Int64*) op_prg_mem_alloc (sizeof (OpT_Int64));
    *key_ptr = 0;
    *key_ptr += (cdma_code_64bit << 56) + (symb_index_64bit << 48) +
    (subch_index_64bit << 40);
    *key_ptr += frame_number;
    cached_cdma_tuple_ptr->cdma_code           = cdma_code;
    cached_cdma_tuple_ptr->symbol_index       = symb_index;
    cached_cdma_tuple_ptr->subchannel_index   = subch_index;
    cached_cdma_tuple_ptr->rcvd_frame        = frame_number;
    cached_cdma_tuple_ptr->ss_objid          = ss_objid;

    /*Coloca lo anterior en una tabla tipo hash.*/
    prg_bin_hash_table_item_insert (cdma_bwr_htable, (OpT_Int64*) key_ptr,
    cached_cdma_tuple_ptr, OPC_NIL);
    }
}

/*Destruye el paquete, ya que se extrajo lo más importante */
op_pk_destroy (pkptr);
FOUT;
}

static void
wimax_rs_control_mr_rng_rep_send ()
/* Crea un paquete MR_RNG-REP y lo envía a la cola para después transmitirse*/
{
    Packet*                mr_rng_rep_pkptr;
    WimaxT_Mac_Header_Fields* mac_header_fields_ptr;
    List*                  cdma_tuple_to_send_lptr;
    WimaxT_CDMA_Relay_Info* cdma_relay_info_ptr;
    int                    field_size = 0;
    FIN (wimax_rs_control_mr_rng_rep_send (...));

    /*Si no hay tuplas, no crear el mensaje.*/
    if (op_prg_list_size (cdma_tuple_lptr) == 0)
    {
        FOUT;
    }
}

```

```

/* Checar todos los códigos CDMA y crear el mensaje MR_RNG-REP */
    mr_rng_rep_pkptr = op_pk_create_fmt ("wimax_mgmt_mr_rng_rep");

/* Crear el encabezado MAC para este PDU.*/
mac_header_fields_ptr = (WimaxT_Mac_Header_Fields *)
    wimax_support_mac_header_fields_create
(WIMAX_HT_GENERIC, data_plane_config_ptr->basic_cid);
    op_pk_nfd_set_ptr (mr_rng_rep_pkptr, "MAC Header", mac_header_fields_ptr,
        op_prg_mem_copy_create, op_prg_mem_free, sizeof
(WimaxT_Mac_Header_Fields));

/* Se crea nueva información de la tupla CDMA hacia la BS*/
    cdma_relay_info_ptr = (WimaxT_CDMA_Relay_Info*) op_prg_cmo_alloc
(wimax_catmem_handle, sizeof (WimaxT_CDMA_Relay_Info));

/* Crea la lista para almacenar las tuplas CDMA a ser enviadas a la BS*/
    cdma_tuple_to_send_lptr = op_prg_list_create ();

/* Se vacía la lista de tuplas CDMA cdma_tuple_lptr, mediante el siguiente ciclo*/
/* Se envía cada tupla hacia la lista tuple_to_send, la cual se enviará dentro del
paquete*/
    while (op_prg_list_size (cdma_tuple_lptr) > 0)
    {
        WimaxT_Received_CDMA_Tuple*          cdma_tuple_to_send;
        cdma_tuple_to_send = (WimaxT_Received_CDMA_Tuple*)
op_prg_list_remove (cdma_tuple_lptr, OPC_LISTPOS_HEAD);

        /*inserta la tupla en la lista a enviarse*/
        op_prg_list_insert (cdma_tuple_to_send_lptr, cdma_tuple_to_send,
OPC_LISTPOS_TAIL);
    }

/*Se ajusta el tamaño de cada tupla CDMA. Acorde al estándar es de 29 bits cada
tupla*/
/* Para que haya una alineación, se ajusta inflando el valor a 32 bits para cada tupla*/
    field_size = 32 * op_prg_list_size (cdma_relay_info_ptr-
>cdma_tuple_to_send_lptr);

/*Cuando la tupla CDMA sea insertada, coloca la lista en el campo correcto del
paquete*/
    op_pk_nfd_set (mr_rng_rep_pkptr, "CDMA Tuples", cdma_relay_info_ptr,
        wimax_rs_control_cdma_relay_info_copy,
wimax_rs_control_cdma_relay_info_destroy, field_size);

```

```
/* Encola este paquete, este será enviado hacia la BS mediante el mecanismo
adecuado*/

wimax_support_mac_connection_pk_enqueue (mr_rng_rep_pkptr,
data_plane_config_ptr->basic_cid, data_plane_config_ptr, OPC_NIL);

    FOUT;
    }
    }
```

Tabla 5.4 Código RS para formar y enviar *tuplas CDMA* [16].

Gracias a que se crea una lista con los diferentes *tuplas CDMA* de distintos usuarios, se puede decir que se tiene un cierto grado de control sobre las diferentes peticiones (*ranging* o *BWR*) o reservaciones, esto hace que los usuarios que logren transmitir exitosamente, se les pueda dar un seguimiento y por lo tanto un orden a la transmisión, haciendo esto más eficiente y reduciendo así las colisiones, aunque ese no sea su propósito principal.

En la siguiente figura 5.7, se muestra de manera general el modelo que se utiliza para la contención.

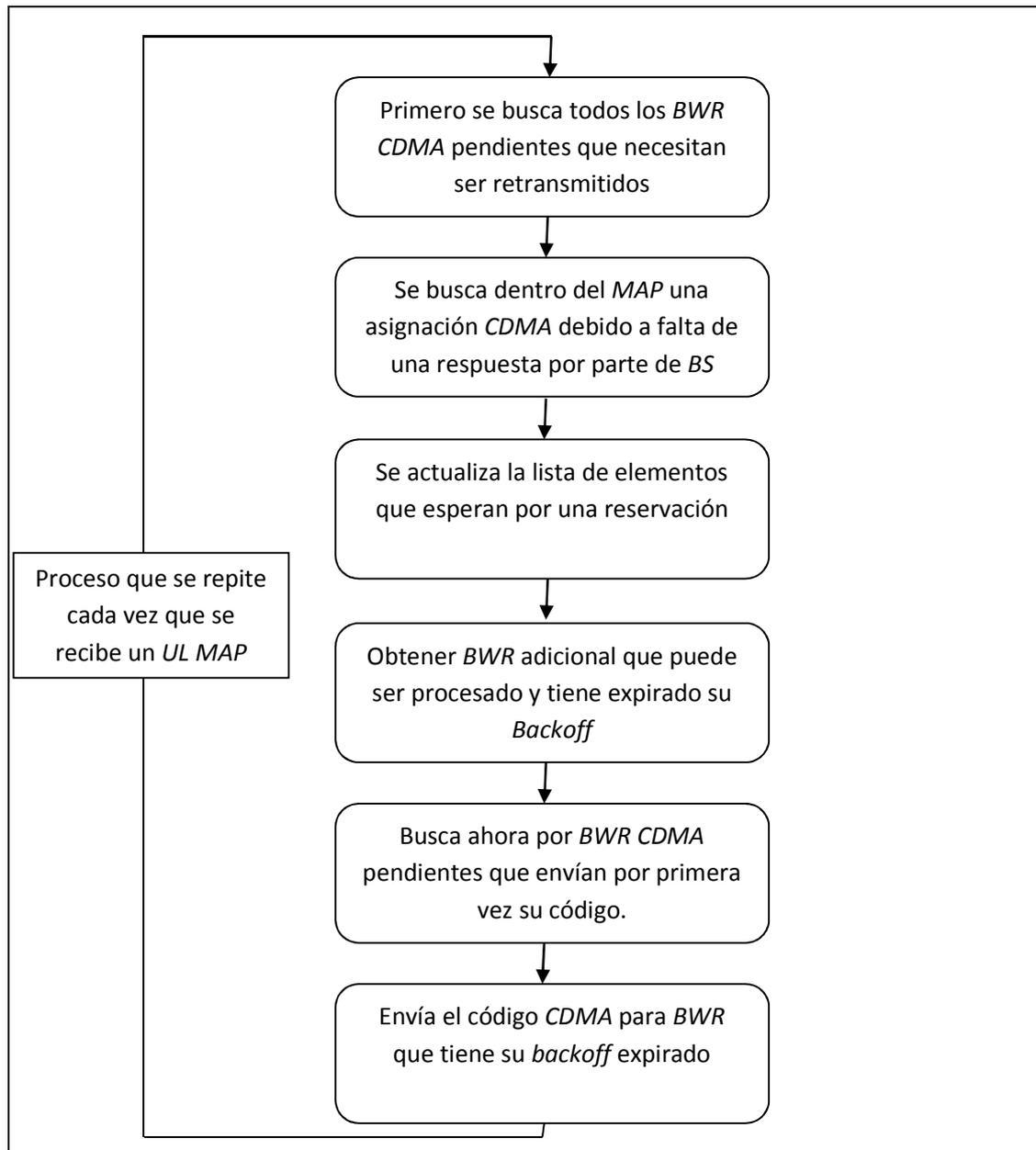


Figura 5.7 Proceso de contención.

Este proceso de contención hace referencia en cómo se está resolviendo, debido a que se tiene paquetes en espera dentro de diferentes colas, es importante que antes de atender nuevas solicitudes, hay que atender aquellas que están en la cola. Estas colas no han podido ser atendidas por múltiples razones, que no hay respuesta por parte de la BS, hay *backoff* expirado, etc.

5.3 Resultados

En esta sección se muestran los resultados obtenidos con las diferentes técnicas, mostrando los resultados de manera gráfica para su mejor comprensión y análisis.

5.3.1 Resultados obtenidos haciendo uso de diferentes rangos de código CDMA

En este punto se analizó el comportamiento de la red con 200 usuarios, donde cada línea representa un intervalo o rango de código CDMA. La siguiente figura 5.8 muestra el *throughput* registrado para diferentes intervalos de 4, 6, 8 y 10 códigos CDMA.

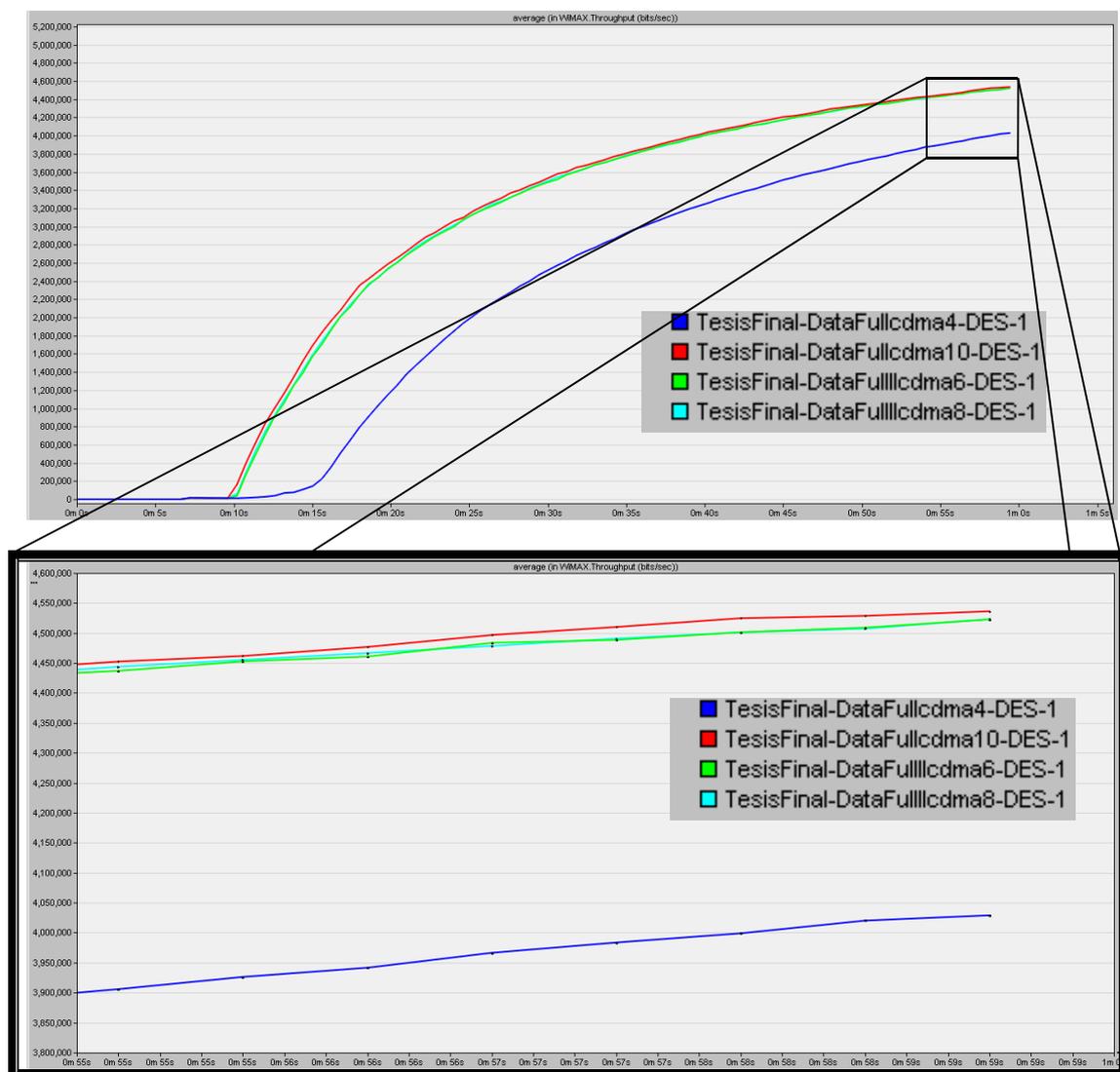


Figura 5.8 *Throughput* con 200 usuarios y diferentes intervalos de códigos CDMA.

Se observa que para el rango de 4 códigos *CDMA* el *throughput* disminuye de manera considerable (aprox. 4.050 Mbps), mientras que para los rangos de 6, 8 y 10 el *throughput* es muy similar (aprox. 4.55 Mbps). Con una diferencia de 12.4 % entre 4 y el resto de 6, 8 y 10 aprox. Por lo que en este punto, lo mejor es utilizar un intervalo de 6 u 8 códigos *CDMA*.

En la siguiente figura 5.9 se muestra el retardo (*delay*) obtenido en las mismas condiciones.

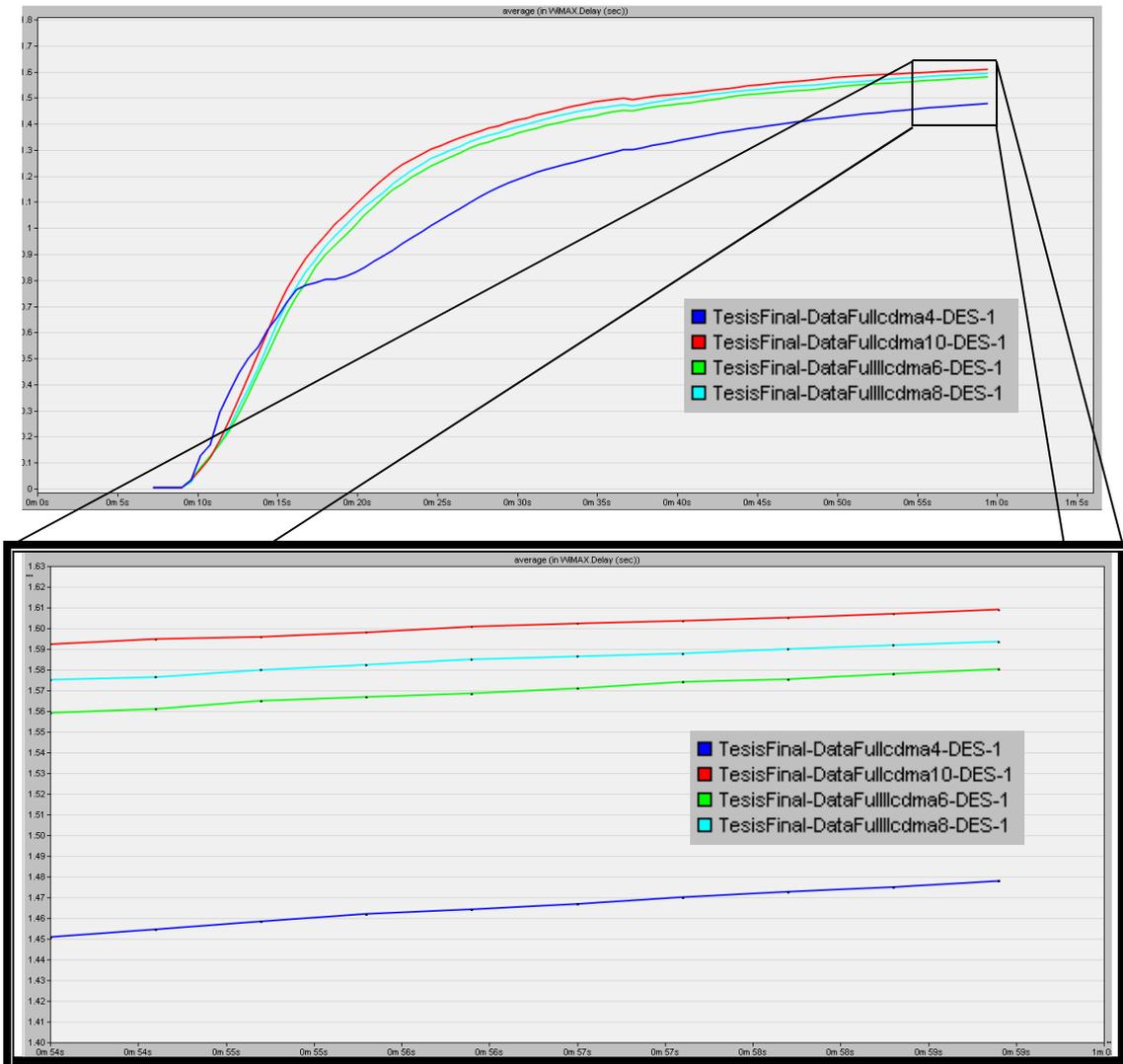


Figura 5.9 Retardo con diferentes intervalos de códigos *CDMA* sin RS.

En la siguiente tabla 5.5 se observan los retardos registrados para cada código *CDMA* utilizado.

| Número de intervalo | Retardo en segundos |
|------------------------|---------------------|
| 4 códigos <i>CDMA</i> | 1.48 |
| 6 códigos <i>CDMA</i> | 1.58 |
| 8 códigos <i>CDMA</i> | 1.595 |
| 10 códigos <i>CDMA</i> | 1.62 |

Tabla 5.5 Retardo con 200 usuarios sin *RS*.

El retardo donde es menor es con 4 códigos *CDMA*, con una diferencia de 140 milisegundos con respecto al uso de 10 códigos *CDMA*. Esto es debido a que a la estación base (*BS*) le toma un menor tiempo para procesar las solicitudes, ya que el asignar recursos dentro de un intervalo menor de códigos, le toma menos tiempo a la *BS* el identificar y relacionar los recursos de los usuarios con su respectivo código *CDMA*.

En la siguiente figura 5.10 se muestra el número de colisiones registradas en la red.

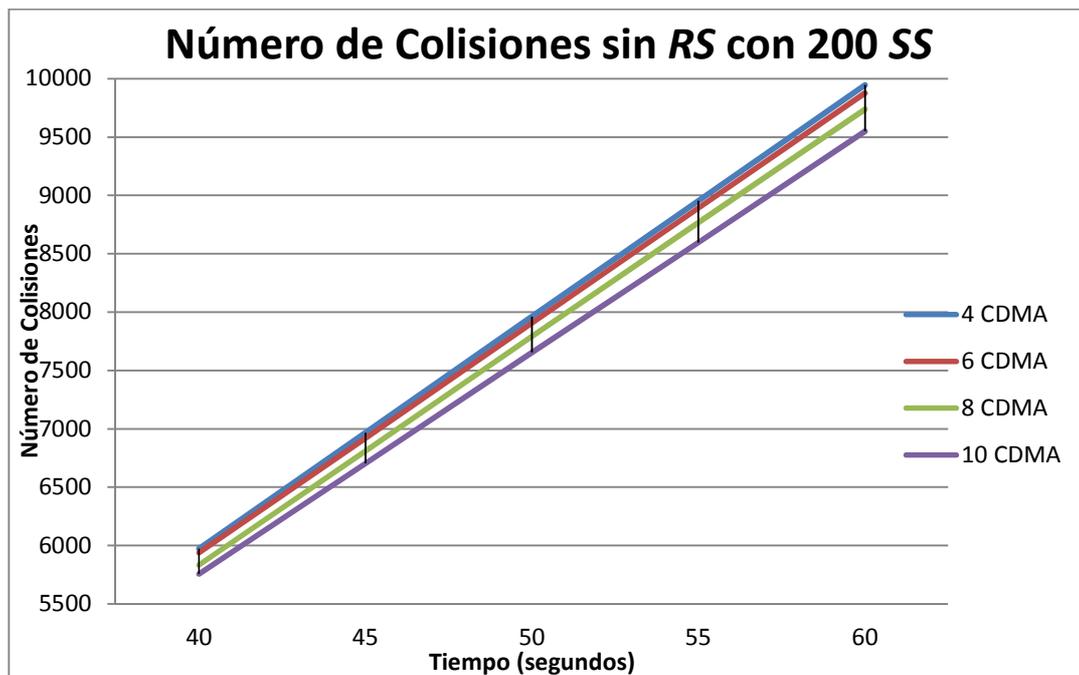


Figura 5.10 Colisiones con diferentes intervalos de códigos *CDMA*.

La siguiente tabla 5.6 muestra el registro de número de colisiones observadas.

| Intervalo de códigos <i>CDMA</i> | Número de colisiones |
|----------------------------------|----------------------|
| Con 4 códigos <i>CDMA</i> | 9946 |
| Con 6 códigos <i>CDMA</i> | 9877 |
| Con 8 códigos <i>CDMA</i> | 9738 |
| Con 10 códigos <i>CDMA</i> | 9549 |

Tabla 5.6 Número de colisiones sin *RS* con 200 *SS*.

Como es de esperarse, el tener un mayor intervalo de códigos *CDMA* ocasiona que el número de colisiones disminuya. Conforme pase el tiempo, la diferencia de número de colisiones entre diferentes intervalos de código *CDMA* utilizados será cada vez mayor, por lo que en el mediano y largo plazo, el aumentar el número de códigos *CDMA* disminuye significativamente el número de colisiones.

El aumentar el intervalo de números de códigos *CDMA* que los usuarios activos pueden escoger, se observó un aumento del *throughput* y disminución del número de colisiones. El problema radica en que se eleva el retardo, por lo que se tiene que escoger un número adecuado de códigos *CDMA* a utilizar, dependiendo de qué tipo de tráfico se esté utilizando.

5.3.2 Resultados utilizando diferente número de RS

Ahora se analiza el comportamiento de la red con 200 usuarios y usando los mismos intervalos de códigos CDMA (4, 6, 8 y 10), pero ahora con el uso de estaciones repetidoras (RS), se utilizó 4 RS para dicho fin, obteniendo los siguientes resultados.

En la siguiente figura 5.11 se muestra el *throughput* obtenido utilizando 4 RS.

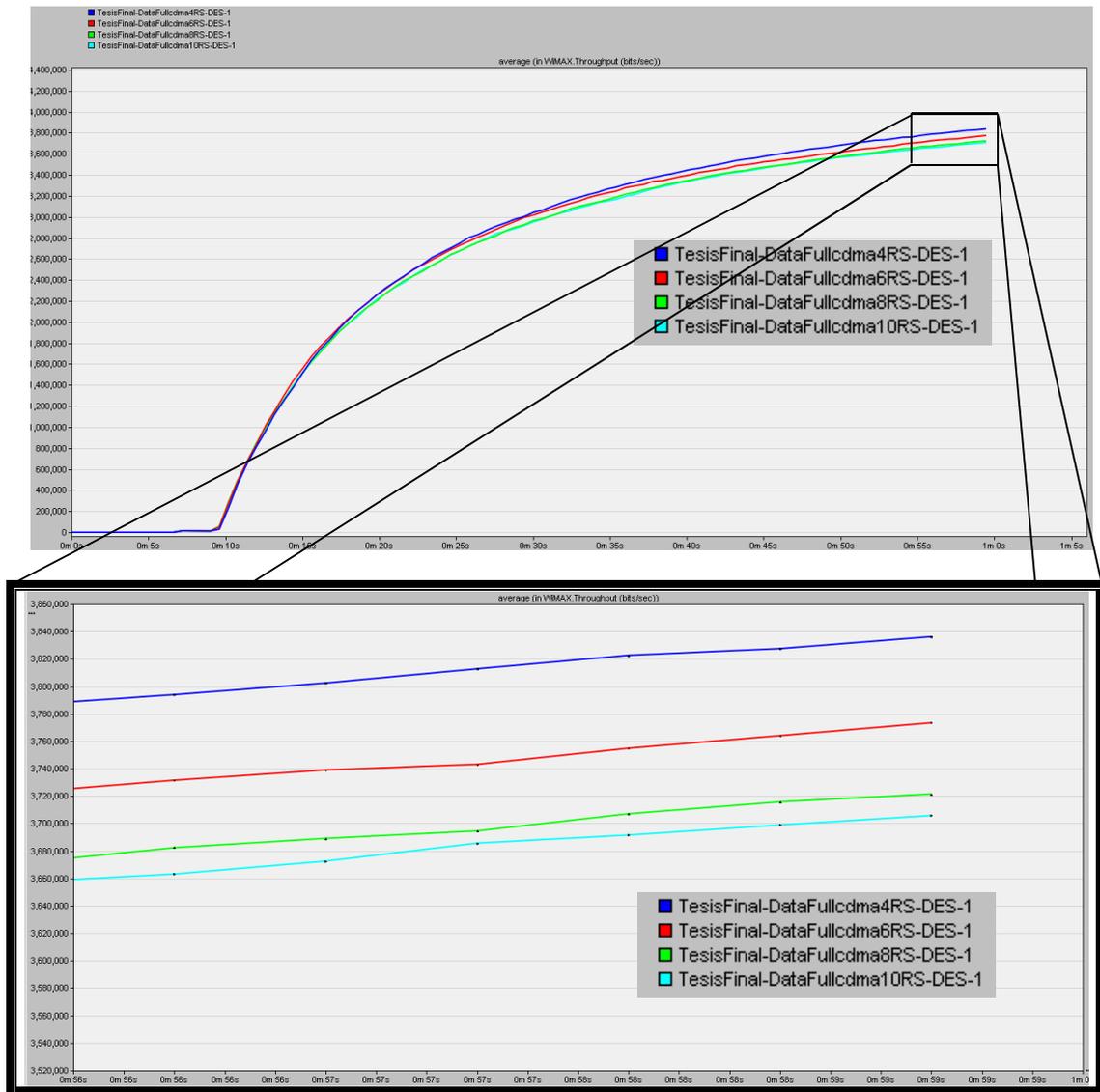


Figura 5.11 *Throughput* con diferentes intervalos de códigos CDMA con 200 usuarios y 4 RS.

Para 4 códigos CDMA junto con 4 RS se tiene un *throughput* de aproximadamente 3.84 Mbps, y para 10 códigos CDMA junto con 4 RS se tiene un *throughput* de aproximadamente 3.7 Mbps. Esto significa una diferencia del 3.8 %, sin embargo, se observa un comportamiento contrario al visto en figura 5.9.

Cuando utilizamos *RS* junto con códigos *CDMA*, como el número de *RS* es constante, se puede decir que a mayor número de códigos *CDMA* el *throughput* tiende a disminuir, por lo que será necesario analizar el caso cuando se incrementa el número de *RS*, los usuarios y el intervalo de códigos *CDMA* son constantes.

Ahora analizaremos el retardo registrado en la red bajo las mismas condiciones mostrado en la figura 5.12.

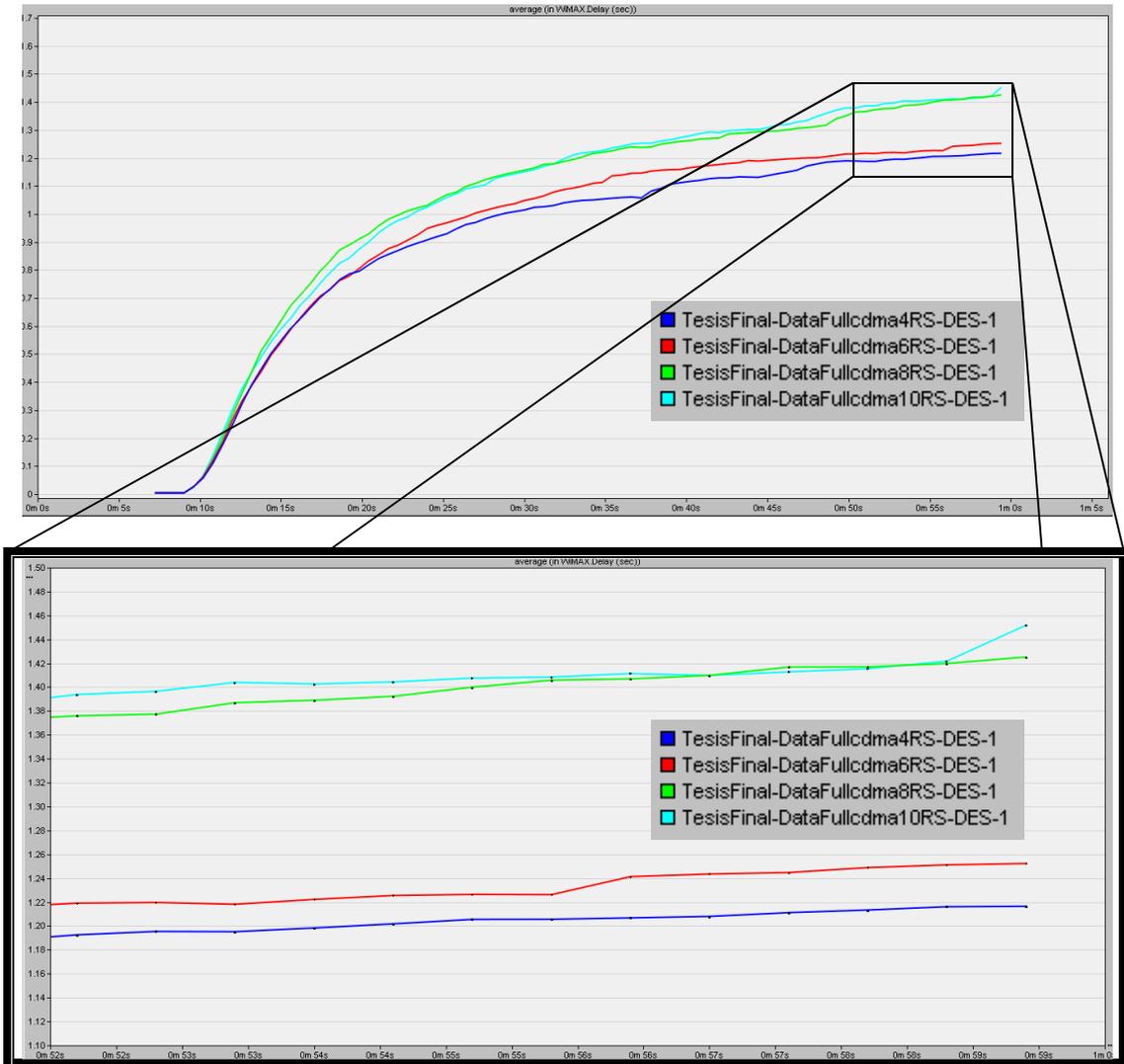


Figura 5.12 Retardo con diferentes intervalos de códigos *CDMA* con 200 usuarios y 4 *RS*.

En la siguiente tabla 5.7 se muestra los retardos máximos registrados para cada intervalo de código *CDMA*.

| Número de intervalo | Retardo en segundos |
|------------------------|---------------------|
| 4 códigos <i>CDMA</i> | 1.22 |
| 6 códigos <i>CDMA</i> | 1.25 |
| 8 códigos <i>CDMA</i> | 1.42 |
| 10 códigos <i>CDMA</i> | 1.45 |

Tabla 5.7 Retardo con 200 usuarios con *RS* y 200 *SS*.

Se puede observar que el retardo para 4 códigos *CDMA* es 18.85 % menor en comparación con 10 códigos *CDMA*, este comportamiento es similar a lo observado anteriormente cuando no utilizamos *RS*. Sin embargo, para todos los intervalos de códigos *CDMA* (4, 6, 8 y 10), se registró una disminución en el retardo con el uso de *RS*.

En el siguiente subtema 5.3.3 se analiza el comportamiento de la red cuando se tiene diferente número de estaciones repetidoras (*RS*).

El conteo de número de colisiones registradas para este caso es el mostrado en la siguiente figura 5.13.

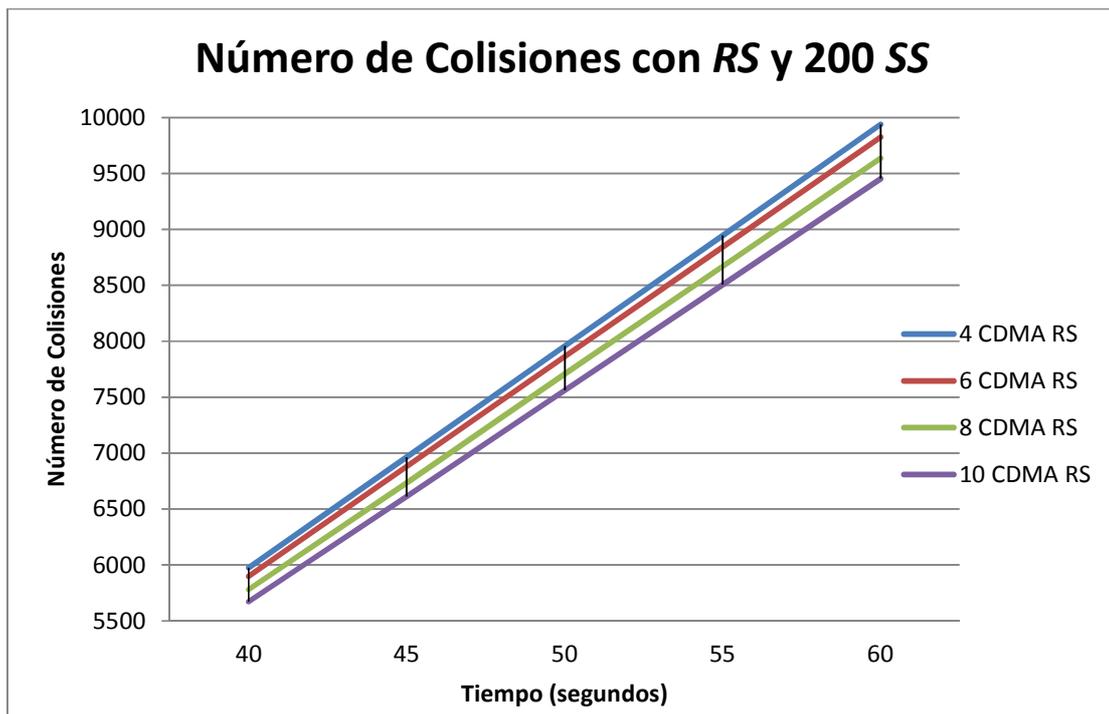


Figura 5.13 Colisiones con diferentes intervalos de códigos *CDMA* con 4 *RS*.

En la siguiente tabla 5.8 se muestra el número de colisiones registradas en el sistema.

| Intervalo de códigos <i>CDMA</i> | Número de colisiones |
|----------------------------------|----------------------|
| Con 4 códigos <i>CDMA</i> | 9938 |
| Con 6 códigos <i>CDMA</i> | 9824 |
| Con 8 códigos <i>CDMA</i> | 9634 |
| Con 10 códigos <i>CDMA</i> | 9452 |

Tabla 5.8 Número de colisiones con 4 *RS* y 200 *SS*.

Se observa que disminuye el número de colisiones conforme se aumenta el número de códigos *CDMA*, pero además, si se compara con la tabla 5.6 anterior, el número de colisiones registrado es menor gracias al uso de *RS*.

En el siguiente subtema 5.3.3 se analizará el comportamiento que tiene en una red la utilización de *RS*.

5.3.3 Resultados con 100 usuarios y utilización de RS

Debido a que el uso de estaciones repetidoras (RS) en una red, cambia drásticamente el comportamiento en comparación en donde no hay RS. Se forma una red con 100 usuarios con un intervalo constante de 6 códigos CDMA, se busca analizar las ventajas y desventajas que existen al utilizar diferentes números de RS. Los RS utilizados son transparentes, lo cual quiere decir que su objetivo es incrementar la cobertura de la BS. En la siguiente figura 5.14 se muestra el comportamiento del *throughput* gráficamente para cada número de RS utilizados (ninguno, 1, 3 y 5 RS en la red).

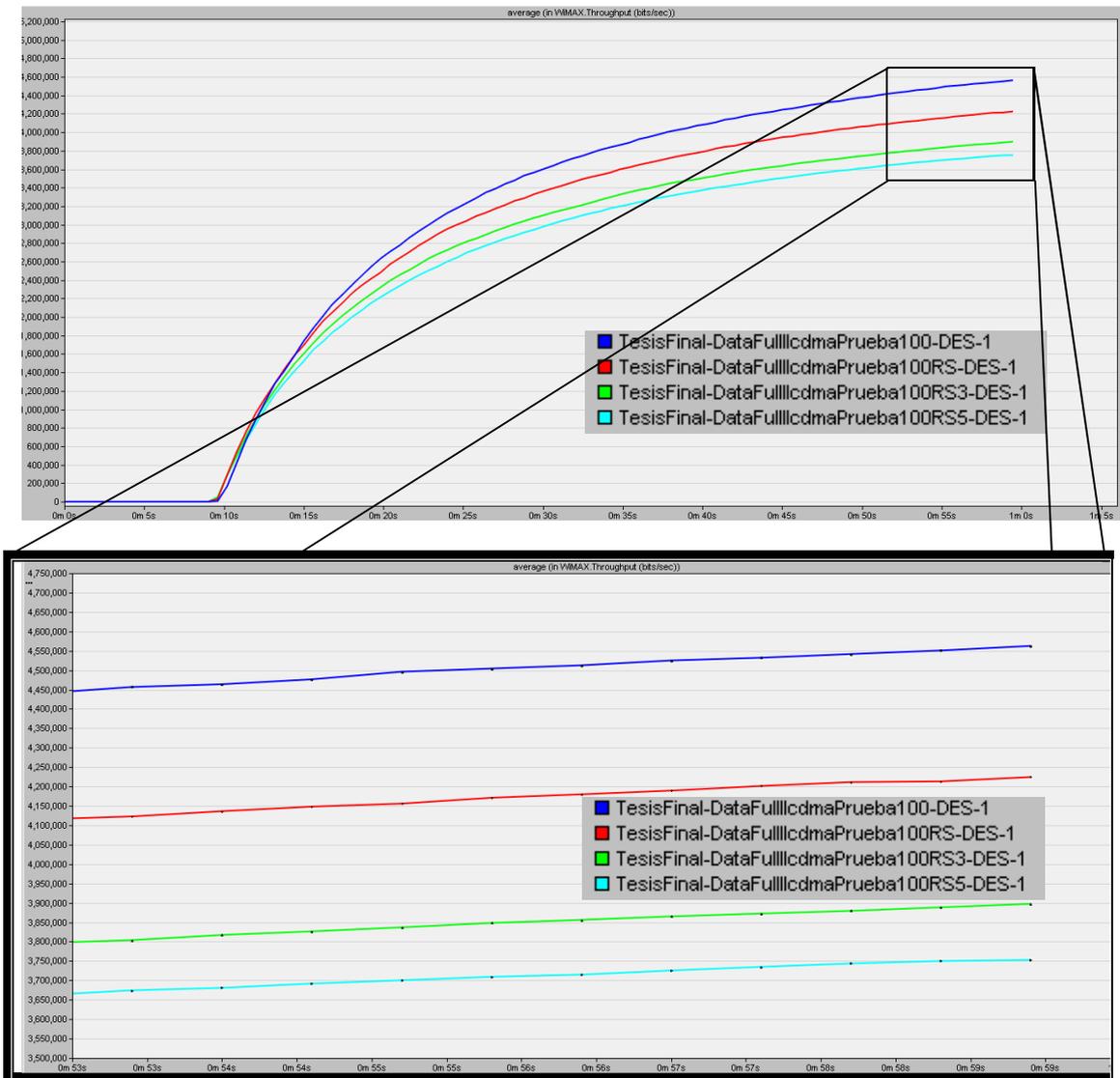


Figura 5.14 Throughput con 100 usuarios y ningún, 1, 3 y 5 RS.

Para el caso en que no se utiliza ningún *RS*, se tiene un *throughput* de 4.55 Mbps, para el caso en que se utilizan 5 *RS* se tiene un *throughput* de 3.75 Mbps, existiendo una diferencia entre ambos de 21.4 %. Se observa que a mayor número de *RS* exista en la red, el *throughput* decae considerablemente, esto es debido a que la sub *trama* de *UL* se divide entre el número de *RS* existentes en la red. Por lo que el *throughput* se degrada conforme más *RS* utilizemos en la red [2].

En la siguiente figura 5.15 se muestra el retardo observado en la misma red bajo mismas condiciones.

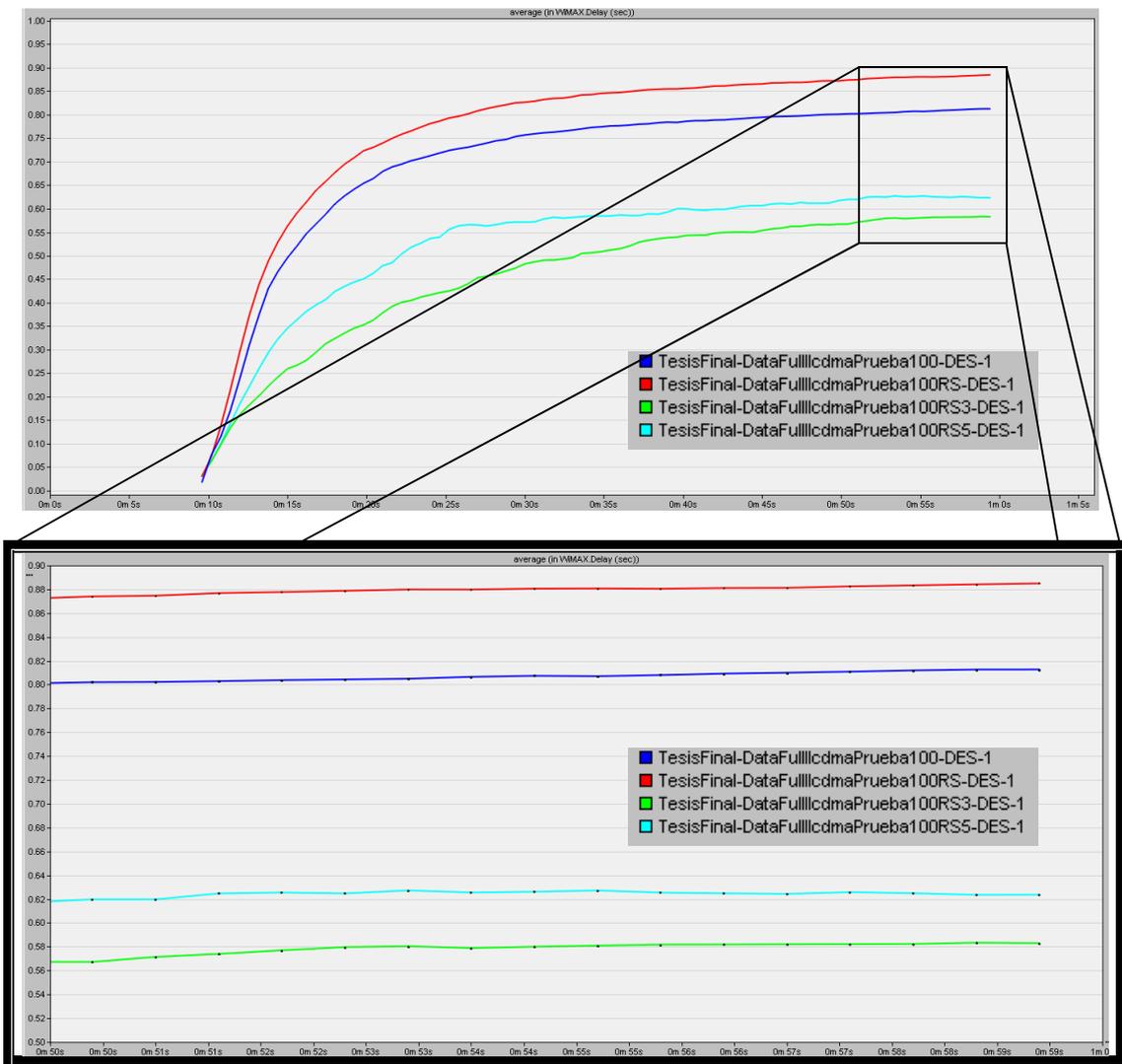


Figura 5.15 Retardo con 100 usuarios con ningún, 1, 3 y 5 *RS*.

En la siguiente tabla 5.9 se muestra el retardo registrado en la red.

| Número de <i>RS</i> | Retardo en segundos |
|---------------------|---------------------|
| Ninguno | 0.8 |
| 1 <i>RS</i> | 0.88 |
| 3 <i>RS</i> | 0.58 |
| 5 <i>RS</i> | 0.62 |

Tabla 5.9 Retardo con 100 usuarios con ningún, 1, 3, y 5 *RS*.

En general se observa una tendencia de que a mayor número de *RS* se utilicen, el retardo ira disminuyendo. Esto es debido a que el *RS* genera tuplas *CDMA* con cada usuario, por lo que la entrega de datos hacia la *BS* es de manera eficiente. También influye de manera importante, la forma o distribución en que se coloquen las estaciones repetidoras (*RS*) en la red [10], esto es porque como ejemplo tenemos que con 3 *RS* se experimentó un menor retardo en comparación con 5 *RS*.

En la siguiente tabla 5.10 se muestra el número de colisiones registrado para cada escenario con 1 minuto de simulación.

| Número de <i>RS</i> | Número de colisiones |
|---------------------|----------------------|
| Ninguno | 8157 |
| 1 <i>RS</i> | 7951 |
| 3 <i>RS</i> | 7555 |
| 5 <i>RS</i> | 7032 |

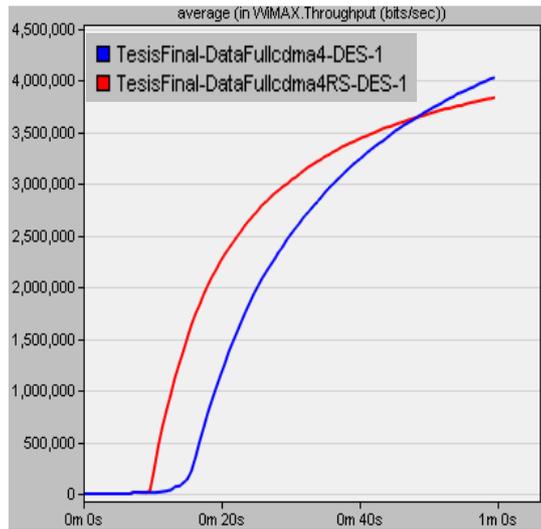
Tabla 5.10 Número de colisiones con ningún, 1, 3 y 5 *RS*.

Se puede observar que el incrementar el número de *RS* nos reduce de manera importante el número de colisiones que experimenta la red, además se observó que el uso de *RS* nos reduce el retardo de los paquetes en la red, debido a que se reduce el retardo de contención. Sin embargo, la desventaja principal que se presenta, es que se disminuye el *throughput*, por lo que su uso y colocación dependerá de los requisitos y tráfico de la red.

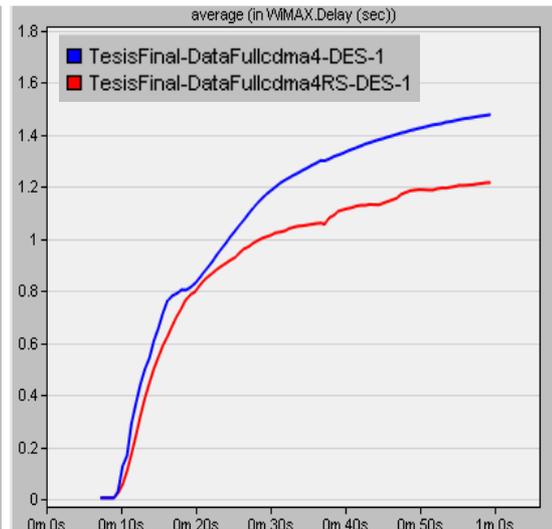
5.3.4 Resultados con diferente uso de intervalos de códigos *CDMA* junto con *RS*

En este apartado se muestra una recopilación de lo analizado anteriormente, haciendo énfasis de la ventaja y desventaja que existe cuando se utiliza códigos *CDMA* con *RS*, en comparación cuando no se utilizan *RS* en esos mismos intervalos de códigos *CDMA*.

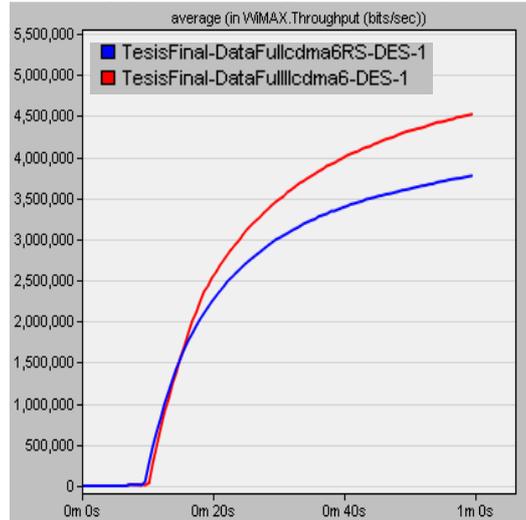
En la siguiente figura 5.16, se muestra las gráficas obtenidas cuando se utilizan 4, 6, 8 y 10 códigos *CDMA* con y sin *RS* con 200 usuarios. Mostrando el *throughput* y el retardo de cada una de ellas.



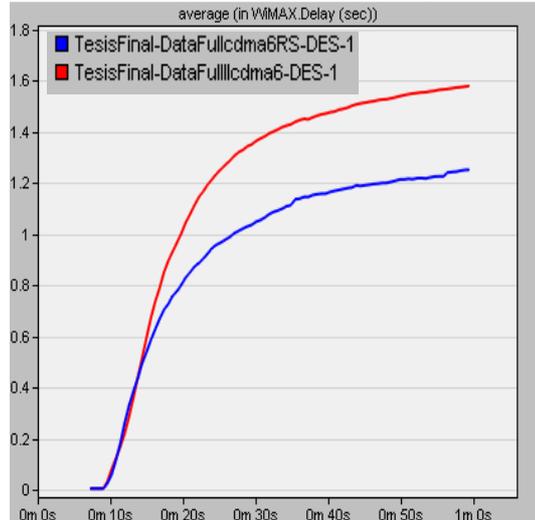
a) Throughput con 4 códigos CDMA con y sin RS.



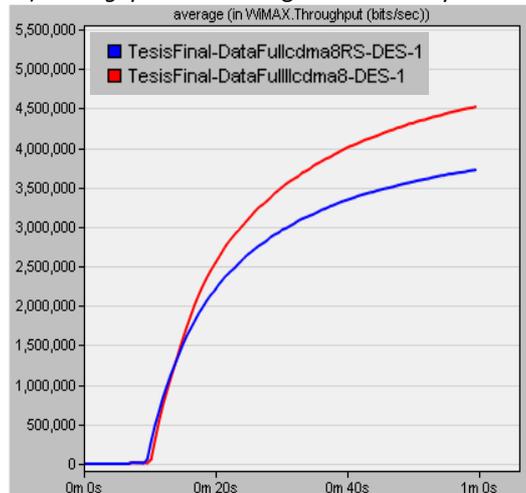
b) Retardo con 4 códigos CDMA con y sin RS.



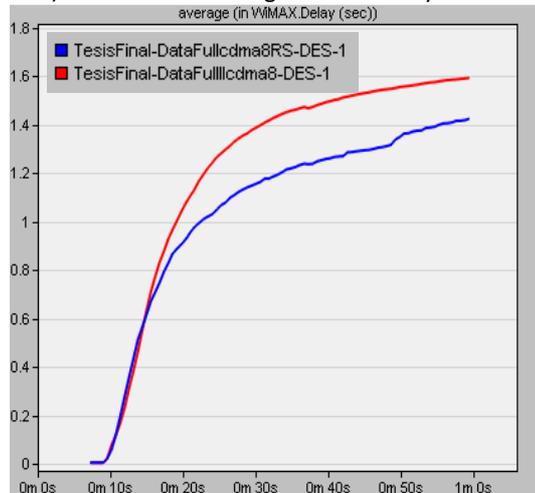
c) Throughput con 6 códigos CDMA con y sin RS.



d) Retardo con 6 códigos CDMA con y sin RS.



e) Throughput con 8 códigos CDMA con y sin RS.



f) Retardo con 8 códigos CDMA con y sin RS.

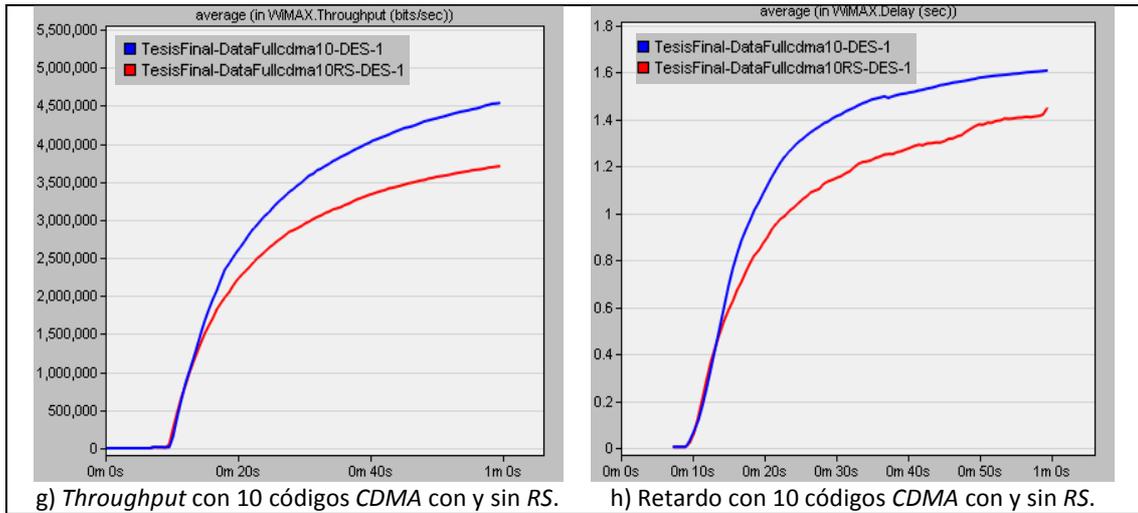


Figura 5.16 *Throughput* y retardo para 4, 6, 8 y 10 códigos CDMA con y sin RS para 200 usuarios.

En la figura 5.16 a) y b) se muestra el comportamiento de la red cuando se utilizan 4 códigos CDMA. Para el *throughput* se muestra una diferencia de 5 % (sin RS de 4 Mbps) menor cuando se usa RS en comparación de cuando no se utiliza RS. El retardo muestra una diferencia de 300 milisegundos menos cuando se usa RS en comparación cuando no se utiliza RS.

En la figura 5.16 c) y d) se muestra el comportamiento de la red cuando se utilizan 6 códigos CDMA. Para el *throughput* se muestra una diferencia de 21.7 % (sin RS de 4.5 Mbps) menor cuando se usa RS en comparación de cuando no se utiliza RS. El retardo muestra una diferencia de 340 milisegundos menos cuando se usa RS en comparación cuando no se utiliza RS.

En la figura 5.16 e) y f) se muestra el comportamiento de la red cuando se utilizan 8 códigos CDMA. Para el *throughput* se muestra una diferencia de 25 % (sin RS de 4.5 Mbps) menor cuando se usa RS en comparación de cuando no se utiliza RS. El retardo muestra una diferencia de 190 milisegundos menos cuando se usa RS en comparación cuando no se utiliza RS.

En la figura 5.16 g) y h) se muestra el comportamiento de la red cuando se utilizan 10 códigos CDMA. Para el *throughput* se muestra una diferencia de 25 % (sin RS de 4.5 Mbps) menor cuando se usa RS en comparación de cuando no se utiliza RS. El retardo muestra una diferencia de 170 milisegundos menos cuando se usa RS en comparación cuando no se utiliza RS.

En el caso de 4 códigos *CDMA*, se descarta su uso debido a que es el que menor *throughput* genera, a pesar de registrar el retardo menor de entre todos los intervalos de códigos *CDMA* estudiados.

Para el caso de 10 códigos *CDMA*, podemos descartar también su uso, debido a que no hay incremento en *throughput* con respecto a intervalos menores de códigos *CDMA*. Al ser este el intervalo más grande, se busca tener el menor número de códigos *CDMA* en el sistema, por lo que su utilización no es recomendable ya que aumentaría el costo de la *BS* [6].

Podemos concluir, que el mejor intervalo para esta red y que se comporta mejor cuando utilizamos *RS*, es cuando utilizamos intervalos de códigos *CDMA* de 6 y 8. Esto es porque ambos nos dan un máximo de *throughput* de 4.5 Mbps, cuando se utiliza *RS* en ambos casos el *throughput* decae aproximadamente el mismo porcentaje. Sin embargo, en el retardo con y sin *RS*, si hay una diferencia de 340 milisegundos para 6 códigos *CDMA* y de 190 milisegundos para 8 códigos *CDMA*, lo que significa una reducción en el retardo de contención.

Ya dependerá del tipo de tráfico a transmitir, la elección de entre estos dos intervalos, podemos decir que para tráfico donde el retardo no es importante, se puede utilizar un intervalo de 6 códigos *CDMA*. Para tráfico de voz y video, donde el retardo es importante, se puede utilizar 8 códigos *CDMA*.

En la tabla 5.11, se muestra el número de colisiones que se obtuvieron con 200 usuarios, diferentes combinaciones de intervalos de código *CDMA*, con y sin *RS* en la red.

| Intervalo de códigos <i>CDMA</i> | Número de colisiones | |
|----------------------------------|----------------------|---------------|
| | Con <i>RS</i> | Sin <i>RS</i> |
| Con 4 códigos <i>CDMA</i> | 9938 | 9946 |
| Con 6 códigos <i>CDMA</i> | 9824 | 9877 |
| Con 8 códigos <i>CDMA</i> | 9634 | 9738 |
| Con 10 códigos <i>CDMA</i> | 9452 | 9549 |

Tabla 5.11 Número de colisiones para 4, 6, 8 y 10 códigos *CDMA* con y sin *RS*.

Se observa que a partir de los datos obtenidos de la tabla 5.11, el uso de estaciones repetidoras (*RS*) con la implementación de *tuplas CDMA*, reduce el número de colisiones en comparación en donde no se utilizan.

5.4 Conclusiones

Se analizó las ventajas y desventajas de usar intervalos de códigos *CDMA* adecuados para una red de comunicaciones en estado de saturación, esto sumado el uso de estaciones repetidoras (*RS*) acorde al estándar IEEE 802.16j, donde se obtuvieron diversos comportamientos.

Se modeló una red con 200 y 100 usuarios, donde el tráfico fue de datos, utilizando un tráfico con distribución *PDF* y generando así un promedio de 368.1 bytes por paquete, analizando el comportamiento con diferentes intervalos de códigos *CDMA*, con y sin uso de *RS*.

Sin *RS*, se observó un incremento importante en el *throughput* cuando se utilizan 6, 8 y 10 códigos *CDMA* en comparación con 4 códigos *CDMA*, en el retardo se observa todo lo contrario, se registró un menor retardo cuando se utiliza 4 códigos *CDMA* en comparación con los demás. En el número de colisiones se registró un mínimo para 10 códigos *CDMA* y un máximo para 4 códigos *CDMA*.

Lo que se concluye es que al tener un mayor número de intervalo de códigos *CDMA*, la *BS* tarda más en procesar un mayor número de códigos, por lo que a mayor número de códigos, el retardo de los paquetes aumenta, aumentando también la complejidad de la *BS*. Sin embargo, el *throughput* de la red aumenta cuando se usa un mayor número de códigos *CDMA*, debido a que se tiene un mayor intervalo en el cual escoger un código *CDMA* y existe una mayor posibilidad de transmisión y reservación de datos de usuarios activos (*SS*) que buscan transmitir hacia la *BS*.

El número de colisiones disminuye conforme mayor sea el número de códigos *CDMA* que se utilicen, esto es porque los usuarios tienen un mayor intervalo en el cual pueden escoger su código *CDMA*, por lo que la probabilidad de que dos o más usuarios colisionen, escogiendo un mismo código, es cada vez menor conforme más aumentemos el número de códigos *CDMA* a utilizar.

Con *RS*, se observó un comportamiento diferente, el *throughput* fue mayor cuando se utilizan 4 códigos *CDMA* en comparación con 6, 8 y 10 códigos, el retardo fue menor para 4 códigos *CDMA* en comparación con el resto, el número de colisiones registrado fue mayor para 4 códigos *CDMA* y el menor para 10 códigos *CDMA*.

Se analizó el comportamiento donde se registra *throughput* máximo y mínimo con 4 códigos *CDMA* con y sin *RS* respectivamente. Por lo que se modeló una red con 100 usuarios activos, con 6 códigos *CDMA* y variando el número de *RS*. Lo que se obtuvo es que al usar un mayor número de *RS* en la red, hace que el *throughput* disminuya, esto es debido a que cuando se utilizan *RS*, estos necesitan un espacio reservado en la subtrama de *uplink*, el enlace de subida (*uplink*) se divide entre el número de *RS* que se utilicen, por lo que la capacidad del enlace de subida se ve seriamente afectado, limitando la capacidad de transmisión de datos de la red.

Sin embargo, la ventaja que presenta el implementar *RS*, es que el retardo disminuye, esto es debido a que el *RS* utiliza las *tuplas CDMA* para enviar datos de sus usuarios activos conectados a través de él, lo que significa una reducción en el retardo de contención, brindando una manera de transmisión eficiente, pero limitando el *throughput* de la red.

El incluir *RS* en una red de comunicaciones *WiMAX*, debe ser de manera cuidadosa, ya que no es bueno cuando se necesita un máximo de *throughput*, pero si son buenos para aplicaciones de voz y video en donde el retardo es un factor importante, además de que su uso disminuye el número de colisiones.

Por otro lado, el utilizar *RS* es conveniente cuando se tiene un número de más de 6 códigos *CDMA*, ya que esto hace que el retardo disminuya, sacrificando un poco la cantidad de *throughput*, por lo que se tiene un balance entre el máximo *throughput* con el mínimo retardo y el mínimo número de colisiones.

Acorde a los datos obtenidos, el intervalo que mejor se comporta es utilizando 6 y 8 códigos *CDMA*, esto es por que obtenemos el mejor *throughput*, se puede utilizar *RS*, compensando así el retardo y obteniendo el mínimo de colisiones en el sistema.

Con los resultados obtenidos, se deja la oportunidad de trabajos futuros en nuevas áreas de investigación y desarrollo haciendo uso de códigos *CDMA* en redes *WiMAX* junto con *RS* transparentes y no transparentes en modo de operación centralizado y distribuido.

Referencias

[1] Zhifeng Tao, Anfei Li†, Koon Hoo Teo, Jinyun Zhang, “Frame Structure Design for IEEE 802.16j Mobile Multihop Relay (MMR) Networks” ,Mitsubishi Electric Research Laboratories, Cambridge, MA 02139. 2007.

[2] Adisak Sukul*, J. Morris Chang**, Pattarasinee Bhattarakosol* Network Coding-Based Relay for IEEE 802.16j Multi-hop Relay Network*Department of Mathematics, Faculty of Science, Chulalongkorn University, Thailand. 2010.

[3] Ben-Jye Chang, Sung-Ju Hsieh, Ying-Hsin Liang and De-Yu Wang, “QoS Guarantee-based Fast Handoff in IEEE 802.16j WiMAX MMR Networks”, University of Technology, Department of CSIE, 2009 International Conference on Advanced Information Technologies (AIT)

[4] V. Rangel et al., «Performance Evaluation of Five New Adaptive Contention Slot Allocators for IEEE 802.16 Based Systems», en Networking and Communications, 2008. WIMOB '08. IEEE International Conference on Wireless and Mobile Computing, (presented at the Networking and Communications, 2008. WIMOB '08. IEEE International Conference on Wireless and Mobile Computing,, IEEE, 2008), 316-321.

[5] Niyato, D., E. Hossain, Dong In Kim, y Zhu Han. «Joint Optimization of Placement and Bandwidth Reservation for Relays in IEEE 802.16j Mobile Multihop Networks». En IEEE International Conference on Communications, 2009. ICC '09, 1 –5, 2009.

[6] Thapa, Anup, S. Pudasaini, y Seokjoo Shin. «Ranging code collision probability in OFDMA based BWA network». En 11th International Conference on Advanced Communication Technology, 2009. ICACT 2009, 03:2103 –2107, 2009.

[7] Chu, Kuo-Chih, Yi-Hung Chen, y Lin-Chuan Tsai. «Priority bandwidth request scheme in IEEE802.16j networks». En International Conference on Wireless Communications Signal Processing, 2009. WCSP 2009, 1 –5, 2009.

[8] Yusoff, R., M.D. Dani Baba, R. Abd Rahman, M. Ibrahim, y N. Mat Isa. «Performance analysis of transparent and non-transparent relays in MMR WiMAX networks». En 2011 IEEE Symposium on Industrial Electronics and Applications (ISIEA), 237 –240, 2011.

[9] Yusoff, R., y M.D. Baba. «Throughput analysis for transparent and non-transparent relay in IEEE 802.16j WiMAX networks». En 2011 IEEE Control and System Graduate Research Colloquium (ICSGRC), 135 –138, 2011.

[10] Lin, Cheng-Hsien, Jeng-Farn Lee, y Jia-Hui Wan. «A Utility-Based Mechanism for Broadcast Recipient Maximization in WiMAX Multilevel Relay Networks». IEEE Transactions on Vehicular Technology 61, n.º 5 (2012): 2233-2242. doi:10.1109/TVT.2012.2190948.

[11] Genc, V., S. Murphy, Yang Yu, y J. Murphy. «IEEE 802.16J relay-based wireless access networks: an overview». IEEE Wireless Communications 15, n.º 5 (2008): 56-63. doi:10.1109/MWC.2008.4653133.

[12] The Journal of the society of cable telecommunication Engineers, CTE. Volume 24 No 3 Septiembre 2002.

[13] “Evaluation Models for digital bi-directional IEEE 802.14 MAC protocol”, IEEE 802.14 Subcommittee, 14/95-061R2, January 1996.

[14] IEEE Standard for Local and metropolitan area networks, IEEE Std 802.16™-2009. IEEE Computer Society. May 2009

[15] IEEE Standard for Local and metropolitan area networks, Amendment 1: Multihop Relay Specification. IEEE Std 802.16j™-2009. IEEE Computer Society. June 2009

[16] OPNET Modeler, Application and Network performance, Versión 16.0 A PL6.

[17] Tesis de maestría “Análisis del comportamiento dinámico de las redes WiMAX móviles basados en un modelo teórico”. Apolo González Valdez. UNAM 2010.

Bibliografía consultada

*Spread Spectrum and CDMA, Principles and Aplications. Valery P. Ipatov. Ed WILEY 2005. ISBN: 0-470-09178-9.

*Applications of CDMA in Wireless/Personal Communications. Vijay K. Garg, Kenneth Smolik, Joseph E. Wilkies. Ed. Prentice Hall PTR 1997. ISBN: 0-13-572157-1

*WiMAX, Taking Wireless to the MAX. Deepak Pareek. Ed. Auerbach Publications 2006. ISBN: 0-8493-7186-4

*WiMAX Evolution, Emerging Technologies and Applications. Marcos D. Katz, Frank H. P. Fitzek. Ed WILEY 2009. ISBN: 978-0-470-69680-4.

Sitios de Internet

<http://www.opnet.com>

<http://ieeexplore.ieee.org>

<http://profesores.fi-b.unam.mx/victor/>

Glosario

| | |
|------------------------------------|--|
| Access link | Enlace de acceso, enlace entre el SS y el RS. |
| Acceso RS | Parte de la sub trama de uplink donde se tiene acceso el repetido RS. |
| AdHoc | Red inalámbrica donde usuarios móviles se conectan entre sí para dar servicio de datos para otros nodos de forma dinámica. |
| Backoff | Mecanismo de contención, el cual asigna un tiempo de espera para poder transmitir una reservación. |
| Best effort | Se envía una petición o solicitud con el mejor esfuerzo. |
| Buffer | Espacio reservado de memoria, se almacenan datos que serán procesados después. |
| BW-REQ | Bandwidth Request. Mensaje de solicitud de ancho de banda. |
| Cabecera de control de trama (FCH) | Frame Check Header. Proporciona información sobre la configuración de la trama. |
| Canal | Conexión de comunicación entre el origen y destino. |
| CDMA | Code Division Multiple Access. Método de multiplexación o de acceso al medio basado en tecnología de espectro ensanchado y códigos ortogonales. |
| Clase de servicio | Servicio que garantiza una tasa de transmisión mínima y que además asigna una cierta prioridad (<i>Gold, Silver, Bronce y Básica</i>) |
| CID | Identificación de conexión. Es un valor de 16 bits, que identifica una conexión de transporte o un par de conexiones de administración de UL Y DL. |
| Conexión Básica | Conexión establecida entre un SS en el ranging inicial y usada para transportar mensajes de administración MAC. |

Glosario

| | |
|-------------------------------------|---|
| Descriptor de canal de bajada (DCD) | Downlink Channel Descriptor. Mensaje MAC que describe la capa física y características del canal de DL. |
| Delay o retardo | Tiempo que tarda un paquete en llegar a su destino exitosamente, expresado en segundos. |
| Downlink (DL) | Enlace de bajada. Canal de bajada, desde la BS hacia al SS. |
| Estación de acceso | Una estación que provee un punto de acceso dentro de una red para un SS o un RS. |
| Estación repetidora (RS) | Relay Station. Repetidor que depende de un MR-BS para proveer conectividad a otros RS o SS. Existiendo dos tipos: transparente y no transparente. |
| Estación móvil (MS) | Mobile Station. Estación SS donde el usuario se mueve de un punto a otro dentro de la red. |
| Estación suscriptora (SS) | Subscriber Station. Usuario dentro de la red en la cual se conecta a un RS y/o BS. |
| Enlace de subida MAP (UL-MAP) | Uplink MAP. Un conjunto de información que define el acceso entero a la red. Utilizado por el SS para enviar en el peticiones hacia la BS. |
| Enlace de bajada MAP (DL-MAP) | Downlink MAP. Un conjunto de información que define la transferencia de datos desde la BS hacia el usuario SS. |
| Frame o trama | Una secuencia de datos estructurados de duración fija usada por la capa física que contiene una sub trama de UL y una sub trama de DL. |
| FTP | File Transfer Protocol, protocolo para la transferencia de archivos. |
| FFT | Fast Fourier transform, transformada rápida de Fourier. |
| Full duplex | Comunicación donde hay recepción y transmisión al mismo tiempo. |
| Half duplex | Comunicación donde la transmisión y la recepción no es al mismo tiempo |

Glosario

| | |
|-------------------------|---|
| Handoff o Handover (HO) | Es el proceso en el cual un SS móvil (MS) pasa de ser administrado por un BS por otra BS debido al movimiento del mismo. |
| Http | Hypertext Transfer Protocol. Protocolo usado para la transferencia de datos en Internet. |
| IP | Internet Protocol. Protocolo de comunicación de la capa de red. |
| IE | Information Element. Define las asignaciones en el enlace de subida. |
| IEEE | Institute of Electrical and Electronics Engineers. Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos, es una asociación mundial asociada a la estandarización. |
| MAC | Medium Access control. Control de acceso al medio, conjunto de mecanismos y protocolos para compartir un medio de transmisión común. |
| Minislot | Una unidad en la asignación de ancho de banda en UL equivalente a un número de slots físicos (PS). |
| MR-BS | Multihop Relay – Base Station. Retransmisión multisaltos - estación base, Equipo que provee conectividad, administración y control a RS y SS. Utilizado comúnmente en redes con RS. |
| Multicast | Envío de información desde un transmisor hacia varios receptores. |
| OFDMA | Orthogonal Frequency Division Multiple Access. Acceso múltiple por división de ortogonal frecuencia. |
| PDU | Protocol Data Unit. Unidad de datos de protocolo. |
| PHY | Physical, Acrónimo para referirse a la capa física. |
| Planeación Centralizada | Un modo de operación aplicable a la retransmisión de multisaltos donde el BS multisalto (MR-BS) determina la asignación de ancho de banda y genera el correspondiente MAP para todos los accesos. |
| Planeación Distribuida | Un modo de operación aplicable a la retransmisión de multisaltos donde el BS multisalto (MR-BS) y cada RS en el sistema determina la asignación de ancho de banda y genera los correspondientes MAPs. |

Glosario

| | |
|------------------------|---|
| Ranging | Proceso o etapa en donde un SS ajusta y se sincroniza con la BS. |
| Relay link | Enlace de repetidor, enlace entre <i>RS</i> y <i>BS</i> . |
| <i>RNG-RSP</i> | Acrónimo que refiere a un mensaje de ranging de respuesta. |
| Slot físico (PS) | Physical Slot. Una unidad de tiempo que depende de la capa física utilizada para asignación de ancho de banda. Unidad o recurso mínimo para asignar recursos. |
| Scheduler o Scheduling | Programador de paquetes, reparte el ancho de banda entre todos los SS que tienen datos por transmitir. |
| <i>SSTG</i> | Espacio de transición para el SS. |
| Sub trama | Parte o porción de trama, comúnmente existe sub trama de DL y sub trama de UL. |
| Sub canal | Parte independiente dentro de un canal de comunicaciones. |
| TCP | Transmission Control Protocol. Protocolo de control de transmisión, orientado a conexión, garantiza entrega de los datos al destino. |
| Tranceiver | Dispositivo transmisor y receptor. |
| TTRRS | Acrónimo de Time-division transmit and receive, mecanismo de relay donde las transmisiones y recepciones a estaciones subordinadas o a las estaciones superordinadas son separadas en tiempo. |
| Throughput | Volumen de trabajo o de datos que fluye en un sistema. |
| Tupla | Lista con número limitado de objetos. |
| UCD | Uplink Channel Descriptor. Descriptor de canal de subida. |
| UDP | User Datagram Protocol, Protocolo basado en el intercambio de datagramas a nivel de transporte. |
| Unicast | Envío de información entre un transmisor y un receptor. |
| Uplink | Enlace de subida. Canal de subida, del SS hacia la <i>BS</i> . |
| VoIP | Voice Over Internet Protocol, protocolo aplicado al envío de voz sobre Internet. |

Glosario

| | |
|-------------------|---|
| WiFi | Estándar IEEE 802.11, el cual es una tecnología de envío de datos de forma inalámbrica. |
| Wireless Backhaul | Conexión entre redes por medio inalámbrico. |
| WiMAX | World Wide Interoperability for Microwave Access. Interoperabilidad mundial para acceso con microondas. |