

**Instituto Tecnológico de Costa Rica**

**Escuela de Ingeniería en Electrónica**



**Innovación WiMAX**

**Informe de Proyecto de Graduación para optar por el título de Ingeniero en  
Electrónica con el grado académico de Licenciatura**

**Alejandro De León Barahona**

**Cartago, Noviembre de 2007**

# INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA

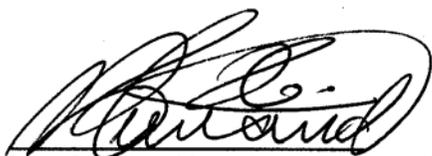
## ESCUELA DE INGENIERIA ELECTRÓNICA

### PROYECTO DE GRADUACIÓN

#### TRIBUNAL EVALUADOR

Proyecto de Graduación defendido ante el presente Tribunal Evaluador como requisito para optar por el título de Ingeniero en Electrónica con el grado académico de Licenciatura del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

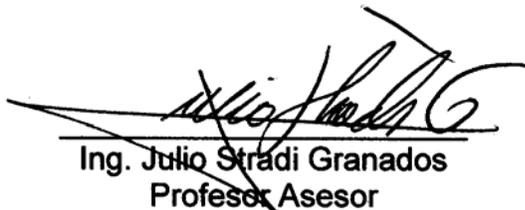
Miembros del Tribunal



Ing. Néstor Hernández Hostaller  
Profesor Lector



Ing. Carlos Badilla Corrales  
Profesor Lector



Ing. Julio Stradi Granados  
Profesor Asesor

Los miembros de este Tribunal dan fe de que el presente trabajo de graduación ha sido aprobado y cumple con las normas establecidas por la Escuela de Ingeniería Electrónica.

Cartago, viernes 24 de noviembre 2007.

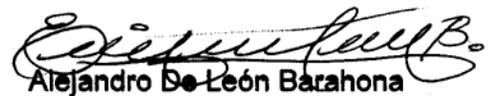
## Declaratoria de autenticidad

Declaro que el presente Proyecto de Graduación ha sido realizado enteramente por mi persona, utilizando y aplicando literatura referente al tema e introduciendo conocimientos propios.

En los casos en que he utilizado bibliografía, he procedido a indicar las fuentes mediante las respectivas citas bibliográficas.

En consecuencia, asumo la responsabilidad total por el trabajo de graduación realizado y por el contenido del correspondiente informe final.

Cartago, viernes 24 de noviembre 2007



Alejandro De León Barahona

Pasaporte 11121266

## **Resumen**

**Palabras Clave: WiMAX, inalámbrico, Internet, comunicaciones, IEEE 802.16e-2005.**

Los recientes avances que han tenido las comunicaciones eléctricas han redefinido el modo en el que vivimos actualmente. La comunicación inalámbrica se ha convertido en una tecnología única que está al alcance de muchas personas alrededor del mundo. El uso de Internet ha cambiado por completo la forma en que las personas trabajan, se comunican, juegan y aprenden.

La convergencia entre lo inalámbrico y el Internet busca lograr un cambio dramático en las comunicaciones de modo tal que pronto una conexión a Internet inalámbrica sea tan necesario como un lápiz y un papel. WiMAX (del inglés Worldwide Interoperability for Microwave Access) busca brindar servicio de Internet inalámbrico a cualquier tipo de dispositivo móvil en el mundo.

Este proyecto se realizó considerando los fundamentos técnicos de WiMAX basándose en el modelo de siete capas OSI. En el trabajo se describen detalles de la capa física, de enlace y de red del estándar WiMAX. Puede ser visto como un resumen práctico de las especificaciones que proponen la IEEE en su estándar 802.16e-2005. El último capítulo del proyecto provee el comportamiento esperado en una red WiMAX considerando los parámetros definidos a lo largo del desarrollo. Se realizaron simulaciones apoyados en el software Radio Mobile Deluxe.

## **Abstract**

**Keywords: WiMAX, wireless, Internet, communication, IEEE 802.16e-2005.**

Electric communication advances have redefined the way we live today. Wireless communication has grown to a unique technology that serves almost half of the world. Computers now play a crucial role in our daily activities. The Internet has completely reoriented the way people work, communicate, play and learn.

The convergence of wireless with the Internet is about to reach a change so dramatic that soon a wireless internet connection will become as important as pen and paper. WiMAX (which stands for Worldwide Interoperability for Microwave Access) is about to bring the wireless and Internet revolutions to portable devices across the world. In a few years WiMAX will provide the capabilities of the Internet, without any wires, to every kind of devices in the world.

This project was done covering the technical foundations of WiMAX following the OSI seven layer model. This document describes the details of the physical, link and network layers of WiMAX standard and can be viewed as a practical summary of the IEEE 802.16e-2005 specifications. The last chapter of this project provides a characterization of the expected performance of a WiMAX network based on simulations using the Radio Mobile Deluxe software.

## Dedicatoria

- A mis padres... que ven reflejados el esfuerzo de muchos años; por enseñarme a vivir, apoyarme y por darme el mayor tesoro que un padre le puede dar a un hijo: la educación.*
- A mis hermanos... porque siempre han sido una motivación muy grande para mi.*
- A mis abuelos... porque su perseverancia en la vida me inspira a luchar ante cualquier dificultad.*
- A Sofi... por ser mi apoyo incondicional durante los últimos años.*

## **Agradecimiento**

- A Dios.... que ha trazado un camino perfecto para mi vida y me ha llenado con miles de bendiciones.*
- A la Virgen... que ha escuchado fielmente mis oraciones y ha sido una intercesora perfecta ante cada paso de mi vida.*
- A los profesores... que han compartido sus conocimientos a lo largo de mi vida estudiantil.*
- A mis amigos... que me han dejado infinidad de enseñanzas y han hecho más fácil el camino recorrido. En especial a mis amigos de apartamento: Gerardo, Arturo, Chope, Anthony y Jorge. A mis amigos del trabajo: Marco y Diego.*
- Al Ing. Julio Stradi... que creyó en este proyecto y me brindó su tiempo para asesorarme.*
- Al Ing. Iván Mora... que me brindó la oportunidad de llevar a cabo el desarrollo del proyecto en la empresa.*

## INDICE GENERAL

Capítulo 1: Introducción .....	1
1.1. Generalidades .....	1
1.2. Enfoque de la solución .....	2
Capítulo 2: Meta y objetivos .....	5
2.1. Meta .....	5
2.2. Objetivos .....	5
2.2.1. Objetivo General .....	5
2.2.2. Objetivos Específicos .....	5
Capítulo 3: Marco teórico .....	7
3.1. ¿Qué hace diferenciable a WiMAX? .....	7
3.2. Consideraciones para una red de banda ancha inalámbrica .....	11
3.3. Retos técnicos que presenta WiMAX .....	12
3.3.1. Canal de radio inalámbrico .....	12
3.3.2. Limitaciones de espectro .....	15
3.3.3. Calidad de servicio .....	16
3.3.4. Movilidad .....	17
3.3.5. Seguridad .....	18
3.3.6. Soporte del protocolo IP .....	18
3.3.7. Estructura de una red .....	19
Capítulo 4: Procedimiento Metodológico .....	21
4.1. Establecimiento criterios de diseño .....	21
4.2. Elaboración prototipo simulado .....	22
4.3. Recomendaciones y comentarios .....	23
Capítulo 5: Diseño red WiMAX .....	24
5.1. Capa Física .....	24
5.1.1. Codificación del canal .....	25
5.1.2. Estructura de símbolo OFDM .....	31
5.1.3. Sistemas avanzados de antenas .....	33
5.1.4. Mecanismos de control para la capa física .....	34
5.2. Capa MAC .....	36
5.2.1. Subcapa de Convergencia (CS) .....	38
5.2.2. Subcapa Común .....	41
5.2.3. Petición y distribución del ancho de banda .....	45
5.2.4. Calidad de servicio (QoS) .....	46
5.2.5. Ingreso a la red e inicialización .....	48
5.2.6. Operaciones para el ahorro de energía .....	53
5.2.7. Administración de la movilidad .....	55
5.3. Capa de Red .....	58
5.3.1. Modelo de red .....	59
5.3.2. Protocolos de red .....	63
Capítulo 6: Análisis de resultados .....	75
6.1. Nivel de enlace .....	75
6.2. Nivel de sistema .....	88
Capítulo 7: Conclusiones y recomendaciones .....	93
7.1. Conclusiones .....	93
7.2. Recomendaciones .....	94

Bibliografía .....	95
Apéndices .....	97
A.1    Acrónimos .....	97

## INDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.1</b>	Diagrama de bloques de la solución proyectada.....	4
<b>Figura 3.1</b>	Aplicaciones generales de un sistema WiMAX.....	7
<b>Figura 3.2</b>	Obstrucciones en un sistema WiMAX.....	13
<b>Figura 3.3</b>	Atenuación multi-trayectoria en un sistema WiMAX.....	14
<b>Figura 3.4</b>	Capas de red definidas por el modelo OSI.....	20
<b>Figura 5.1</b>	Diagrama de bloques de la capa física de la red.....	19
<b>Figura 5.2</b>	Diagrama de bloques de la capa física de la red.....	20
<b>Figura 5.3</b>	Codificador convolucional de la red WiMAX.....	25
<b>Figura 5.4</b>	Codificador dúo binario de la red WiMAX.....	28
<b>Figura 5.5</b>	Proceso H-ARQ tipo II a implementar.....	30
<b>Figura 5.6</b>	Constelación de modulación QPSK.....	31
<b>Figura 5.7</b>	Representación de un símbolo OFDM en el dominio de la frecuencia.....	32
<b>Figura 5.8</b>	Construcción del proceso de medición de distancia.....	35
<b>Figura 5.9</b>	Capa MAC de la red WiMAX.....	37
<b>Figura 5.10</b>	Proceso de supresión del encabezado en la red WiMAX.....	39
<b>Figura 5.11</b>	Diagrama de flujo del proceso de supresión del encabezado en la red WiMAX.....	41
<b>Figura 5.12</b>	Proceso de creación de PDUs MAC.....	42
<b>Figura 5.13</b>	Encabezados de PDU (a) genérico (b) de petición de ancho de banda.....	43
<b>Figura 5.14</b>	Proceso de inicialización en la red WiMAX.....	48
<b>Figura 5.15</b>	Proceso de medición de la distancia entre estación móvil y estación base.....	50
<b>Figura 5.16</b>	Proceso de inicialización del flujo de servicio en la estación móvil.....	52
<b>Figura 5.17</b>	Proceso de inicialización del flujo de servicio en la estación base.....	53
<b>Figura 5.18</b>	Esquema de operación modo dormido en IEEE 802.16e-2005.....	54
<b>Figura 5.19</b>	Ejemplo de agrupación de celdas.....	55
<b>Figura 5.20</b>	Diagrama de flujo del proceso de conmutación de celdas.....	58
<b>Figura 5.21</b>	Modelo de red para el proyecto.....	60
<b>Figura 5.22</b>	Representación lógica de la arquitectura final de la red WiMAX.....	63
<b>Figura 5.23</b>	Procedimiento del protocolo PKMv2.....	66
<b>Figura 5.24</b>	Arquitectura funcional para la calidad del servicio.....	69

<b>Figura 5.25</b>	Escenarios soportados por WiMAX para la administración de la movilidad.....	71
<b>Figura 5.26</b>	Diagrama de bloques de la arquitectura para la movilidad.....	72
<b>Figura 5.27</b>	Esquema para la administración de los recursos de radio.....	74
<b>Figura 6.1</b>	Simulador de la red WiMAX a nivel de enlace.....	76
<b>Figura 6.2</b>	Escenario de simulación WiMAX a nivel de enlace.....	78
<b>Figura 6.3</b>	Eficiencia espectral de la red WiMAX utilizando distintas modulaciones.....	80
<b>Figura 6.4</b>	Tasa de error de bits utilizando distintos códigos para la codificación y modulación QPSK R1/2.....	82
<b>Figura 6.5</b>	Tasa de error de bits en función de la SNR utilizando distintos esquemas de permutación para la subportadora y modulación QPSK en el peatón B.....	83
<b>Figura 6.6</b>	Tasa de error de bits en función de la SNR utilizando distintos esquemas de permutación para la subportadora y modulación QPSK en el peatón A.....	84
<b>Figura 6.7</b>	Escenario de simulación WiMAX a nivel de enlace con dos peatones.....	85
<b>Figura 6.8</b>	Tasa de error de bits en función de la SNR para un vehículo desplazándose a 30km/h.....	86
<b>Figura 6.9</b>	Tasa de error de bits en función de la SNR para un vehículo desplazándose a 120km/h.....	87
<b>Figura 6.10</b>	Transmisiones promedio en función de la relación señal a ruido con distinta implementación para H-ARQ.....	88
<b>Figura 6.11</b>	Escenario de simulación WiMAX a nivel de sistema con dos peatones, un vehículo y 6 estaciones base.....	90
<b>Figura 6.12</b>	Comportamiento en Mbps para el peatón B utilizando distintos modelos para la reutilización de frecuencia.....	91
<b>Figura 6.13</b>	Comportamiento en Mbps para el peatón A utilizando distintos modelos para la reutilización de frecuencia.....	91

## INDICE DE TABLAS

<b>Tabla 3.1</b>	Comparación de WiMAX con otras tecnologías de banda ancha inalámbrica.....	10
<b>Tabla 3.2</b>	Parámetros de tráfico para aplicaciones en un sistema de banda ancha inalámbrica.....	17
<b>Tabla 3.3</b>	Resumen de los desafíos técnicos que se deben considerar en el proyecto.....	19
<b>Tabla 5.1</b>	Esquemas de permutación de subportadora en WiMAX.....	33
<b>Tabla 5.2</b>	Campos del encabezado PDU genérico.....	44
<b>Tabla 5.3</b>	Campos del encabezado PDU de petición de ancho de banda.....	44
<b>Tabla 5.4</b>	Parámetros a negociar entre BS y MS.....	51
<b>Tabla 5.5</b>	Esquemas de permutación de subportadora en WiMAX.....	62
<b>Tabla 6.1</b>	Parámetros de simulación a nivel de enlace para la red WiMAX.....	77
<b>Tabla 6.2</b>	Comportamiento del enlace en función de SNR para modulación QPSK R1/2.....	78
<b>Tabla 6.3</b>	Comportamiento del enlace en función de SNR para modulación QPSK R3/4.....	79
<b>Tabla 6.4</b>	Comportamiento del enlace en función de SNR para modulación 16 QAM.....	79
<b>Tabla 6.5</b>	Comportamiento del enlace en función de SNR para modulación 64 QAM.....	79
<b>Tabla 6.6</b>	Tasa de error de bits en función de SNR utilizando códigos turbo convolucionales de 48 bits y modulación QPSK.....	81
<b>Tabla 6.7</b>	Tasa de error de bits en función de SNR utilizando códigos turbo convolucionales de 432 bits y modulación QPSK.....	81
<b>Tabla 6.8</b>	Tasa de error de bits en función de SNR utilizando códigos convolucionales de 432 bits y modulación QPSK.....	81
<b>Tabla 6.9</b>	Parámetros de la red WiMAX determinados para la simulación a nivel de sistema.....	89
<b>Tabla 6.10</b>	Velocidad promedio de conexión por estación base en distintos escenarios y reutilización de frecuencia.....	92

# Capítulo 1: Introducción

## 1.1. Generalidades

En el mundo actual es de suma importancia estar al tanto de las nuevas ventajas que la tecnología puede ofrecer para implementarlas de la mejor manera posible y generar ventajas competitivas que impacten positivamente en la forma de hacer negocios.

Conocer WiMAX no sólo permite estar a la vanguardia de las tendencias tecnológicas sino que además genera competitividad soportada en una tecnología complementaria y novedosa. Es precisamente este tipo de competitividad el que genera que Procter & Gamble evalúe la elaboración de un proyecto en donde se diseñe un prototipo de prueba simulado de una red WiMAX en Santa Ana para obtener servicios diferenciados como telefonía IP y videoconferencias.

De este modo, se presenta la oportunidad de diseñar el prototipo simulado una red WiMAX que ofrezca nuevos servicios y facilidades al personal de P&G en los departamentos de ventas, logística y mercadeo. Estos departamentos son los que presentan la mayor necesidad de desplazarse fuera de oficina y debido al modo de operación de la empresa es de suma importancia la utilización de la telefonía IP para lograr la reducción de costos en las llamadas internacionales que se tornan imprescindibles para el correcto funcionamiento del negocio.

Una red WiMAX ofrece una gran variedad de servicios, sin embargo, para éste proyecto en particular, P&G considera importante contar con: conectividad a Internet inalámbrica con un amplio rango de cobertura, telefonía a través de la red (telefonía IP), alta tasa de transferencia en la comunicación y video conferencias. Contar con los servicios antes mencionados repercutiría dentro de la empresa con importantes reducciones en la telefonía celular (que actualmente la empresa paga a sus trabajadores), la comodidad de una comunicación inalámbrica y la facilidad de

comunicarse con contactos internacionales de forma inmediata y de bajo costo sin importar la ubicación del empleado.

Considerando la importancia que tienen las comunicaciones para P&G se justifica la elaboración de un proyecto que evalúe la factibilidad de implementar una red WiMAX a través del diseño de un prototipo simulado teniendo como escenario de prueba Santa Ana.

## **1.2. Enfoque de la solución**

A través del proyecto se busca diseñar y realizar un prototipo simulado, con la ayuda de software de computación, de una red WiMAX. Paralelo a esto, en el proyecto se deben de establecer recomendaciones para que la empresa pueda llevar a cabo la implementación del modelo planteado en una segunda fase.

En base a esto, el proyecto se subdivide en tres etapas: (a) establecimiento de los criterios de diseño en la red, (b) elaboración del prototipo simulado con la ayuda de un software apropiado y (c) elaboración de recomendaciones a la empresa para una futura implementación del prototipo en una segunda fase.

Dentro del diseño del prototipo deben de considerarse una serie de elementos de formarán en conjunto el diseño idóneo para que la empresa pueda solventar de la mejor manera posible su problemática. De este modo, se tiene que debe de considerarse un análisis del ancho de banda a emplear, de la tasa de transmisión deseada, del efecto Doppler así como de los aspectos exteriores que puedan repercutir en el funcionamiento del la red como la geografía del lugar a implementar, el medio ambiente, la ubicación idónea para el establecimiento de la red, el tráfico que puede soportar, la frecuencia apropiada para la transmisión, el equipo necesario e incluso se debe de considerar la expansión a futuro que pueda tener una red de este tipo.

Como uno de los aspectos a tomar en cuenta es importante conocer que la señal recibida en los sistemas inalámbricos es afectada por las pérdidas de espacio libre, por multitrayectorias y por las obstrucciones existentes entre transmisor y

receptor. Debido a esto, es necesario realizar un análisis que permita llegar a un modelo predictivo para conocer el comportamiento de una red WIMAX con las características que la empresa requiere.

Dichos modelos predictivos requieren de la aplicación de conceptos matemáticos dentro del campo de la física y se evidencia el nivel de diseño que se requiere para la elaboración de un prototipo de prueba de ésta índole.

Como ya fue mencionado es importante en el diseño de esta tecnología la frecuencia a utilizar, el rango de cobertura, el ancho de banda disponible, la modulación a emplear y la capacidad del canal de transmisión. Con todo lo anterior se busca aplicar los conocimientos adquiridos a lo largo de la carrera de ingeniería electrónica para lograr la elaboración de un prototipo de red que logre el cumplimiento de la calidad de servicios que busca la empresa.

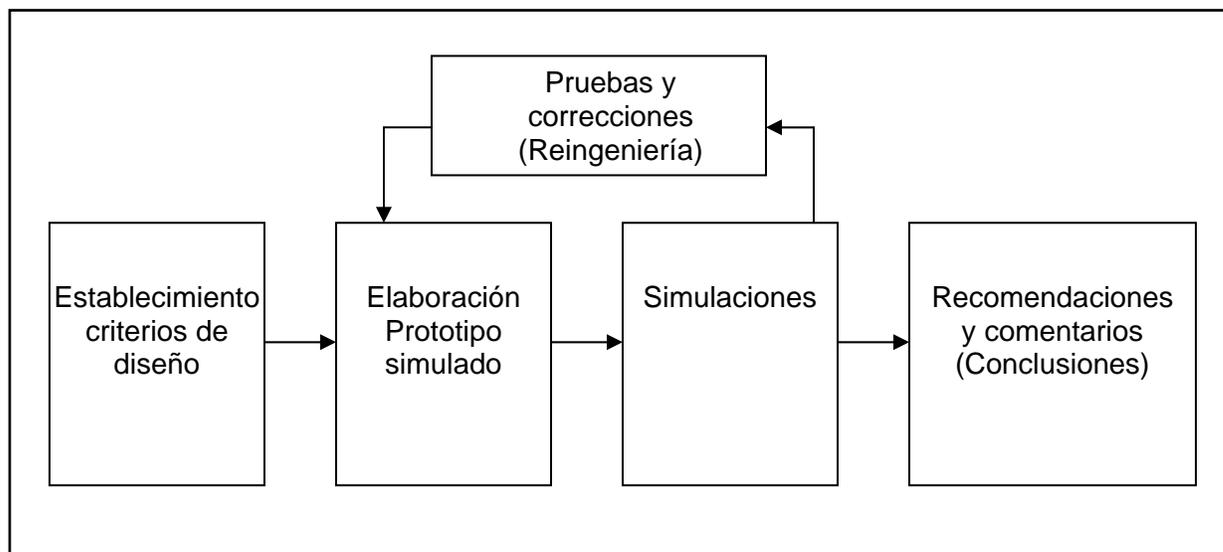
Deben de tomarse en cuenta además aspectos de electromagnetismo para evaluar el comportamiento de la propagación en el medio así como para la correcta escogencia de la antena WIMAX. Se considera acá un completo estudio de los lóbulos de propagación de la antena así como la potencia de la misma.

Los conocimientos en redes de computación también serán de gran ayuda para el diseño del backbone apropiado que permita una conectividad eficiente y segura.

La factibilidad de éste proyecto depende en gran medida de aspectos de seguridad y de salud ambiental ya que se sabe que el medio de transmisión para una comunicación inalámbrica es el aire. Necesariamente Procter & Gamble busca evaluar el establecimiento de una tecnología completamente segura para el manejo de su información y al mismo tiempo que no represente ningún tipo de impacto ambiental.

Durante el desarrollo del proyecto deben acatarse el cumplimiento del estándar establecido por la IEEE que se refiere a este tipo de tecnología como lo es el 802.16. Además, el proyecto también se encuentra sujeto al cumplimiento de leyes costarricenses referentes a la utilización del espectro de radio frecuencias públicas.

El proyecto “Innovación WiMAX” es un plan piloto que se intenta establecer inicialmente en Costa Rica (Santa Ana) para que, en base al prototipo diseñado y a las simulaciones presentadas, pueda llegar a implementarse en algún otro departamento similar que posee la empresa alrededor del mundo. El diagrama de bloques de la solución proyectada se muestra a continuación en la figura 1.1.



**Figura 1.1** Diagrama de bloques de la solución proyectada

## **Capítulo 2: Meta y objetivos**

### **2.1. Meta**

Prototipo simulado de una red inalámbrica de alto alcance (WiMAX) que permita la comunicación de telefonía IP inalámbrica en los empleados de Procter & Gamble con un alcance de 50 kms y una tasa de transferencia de información de 1Mbps.

### **2.2. Objetivos**

#### **2.2.1. Objetivo General**

- Diseñar el prototipo simulado de una red inalámbrica de alto alcance, basándose en el estándar IEEE 802.16, tomando en consideración los aspectos científicos y tecnológicos necesarios para solventar la problemática de la empresa Procter & Gamble en la comunicación internacional y con esto ofrecer a sus empleados en los departamentos de ventas, logística y mercadeo facilidades con servicios inalámbricos de alta calidad (video, voz, data) con una tasa de transferencia de 1Mbps y 50 kms de alcance cuando se encuentran fuera de la oficina.

Indicador:

Prototipo simulado de una red WiMAX con un alcance de 50 kms y una tasa de transferencia de 1Mbps.

#### **2.2.2. Objetivos Específicos**

- Definir escenario de prueba para la elaboración del prototipo de red WiMAX que permita el acceso a telefonía IP inalámbrica con una tasa de

transferencia de 1 Mbps en los puntos de mayor acceso por los empleados de P&G.

Indicador:

Delimitación de zona de prueba que permita el acceso a telefonía IP inalámbrica con una tasa de transferencia de 1 Mbps en los puntos de mayor acceso por los empleados de P&G.

- Determinar un modelo predictivo que establezca el efecto de las pérdidas de espacio libre, por multitraectorias y por obstrucciones en los enlaces de comunicación inalámbrica; con esto lograr simular el funcionamiento de una red WiMAX.

Indicador:

Modelo predictivo que permita simular el funcionamiento de una red WiMAX.

- Diseñar un sistema de seguridad que permita la confidencialidad en la transmisión de datos, que cumpla con el estándar IEEE 802.16, para resguardar todo tipo de información que se transmita a través de la red WiMAX.

Indicador:

Confidencialidad en la transmisión de información considerando el cumplimiento del estándar IEEE 802.16 en aspectos de seguridad

## Capítulo 3: Marco teórico

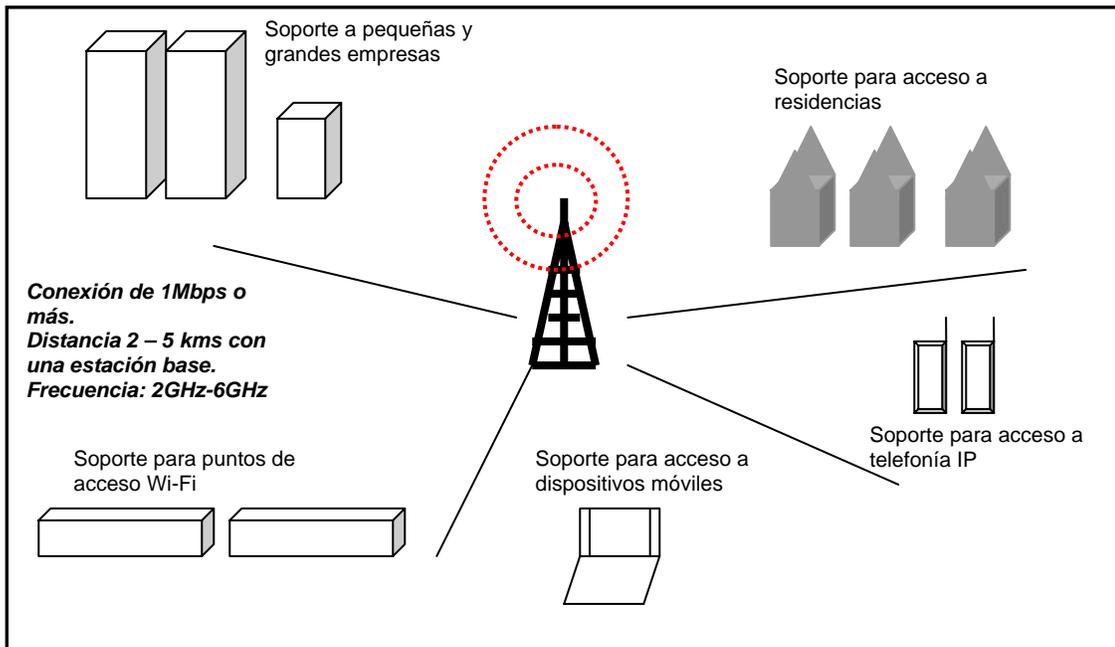
“Al igual que la televisión cambió el mundo del entretenimiento, publicidad y la sociedad en los años 40’s y 50’s; de la misma manera WiMAX puede hacer cambios dramáticos en nuestras vidas”.<sup>1</sup>

Comentarios como el anterior lleva a preguntarnos qué hace diferenciable la tecnología de WiMAX ante las actuales como WiFi y 3G.

### 3.1. ¿Qué hace diferenciable a WiMAX?

En este capítulo se hace un repaso por las principales características que hacen que WiMAX se esté convirtiendo en una tecnología con un potencial grandísimo dentro de las comunicaciones eléctricas. Además se analizan los retos que presenta ésta tecnología por sus propias características.

En la gráfica de la figura 3.1, a continuación, se muestra el esquema de funcionamiento de un sistema WiMAX.



<sup>1</sup> Theodore S. Rappaport [1]

**Figura 3.1** Aplicaciones generales de un sistema WiMAX

- *Canal de transmisión*

El rendimiento de WiMAX depende del ancho de banda del canal utilizado. A diferencia de los sistemas 3G, que tienen un ancho de banda del canal definido, WiMAX define un ancho de banda para el canal elegible entre 1.25MHz y 20MHz. Esto hace de la flexibilidad una característica diferenciable en cuanto al canal de transmisión.

- *Modulación*

La confianza de WiMAX en la modulación OFDM, al contrario de lo que sucede con CDMA en 3G, permite trabajar con picos de transferencia muy altos. La necesidad de una extensa cobertura hace que las tasas de transferencias muy altas sean más difíciles en los sistemas CDMA que en los basados en modulación OFDM.

- *Eficiencia espectral*

Mucho más importante que los picos de transferencia altos es el rendimiento total del sistema y su capacidad de desarrollarse en un ambiente multicelular.

Para evaluar la capacidad del sistema se debe tomar como punto de partida la eficiencia espectral. WiMAX logra alcanzar una eficiencia espectral mucho mayor que en los sistemas 3G debido al soporte de múltiples antenas y a que la capa física OFDM es mucho más amena para las implementaciones MIMO de lo que es para los sistemas CDMA.

Además, la modulación OFDM también hace más fácil realizar la hazaña de mejorar la capacidad del sistema a través de la diversidad de frecuencia y usuarios múltiples.

De éste modo, cuando se compara con 3G, WiMAX ofrece mayor tasa de transferencia, gran flexibilidad para el canal de transmisión y un mejor rendimiento total del sistema.

La capa MAC de WiMAX es construida para ofrecer soporte a una variedad de tráfico mixto, incluyendo tráfico en tiempo real y tráfico en tiempo no real, datos priorizados, datos de mejor esfuerzo y una variedad de niveles de calidad de servicio.

A pesar de todo lo anterior, la ventaja más importante que tiene WiMAX es el potencial de bajo costo que posee gracias a su arquitectura IP. Utilizando una arquitectura IP se reduce el trabajo de red, los gastos de capital, los gastos de operación y se permite una fácil convergencia con otro tipo de redes o aplicaciones.

A continuación en la tabla 3.1 se muestra un cuadro comparativo de WiMAX versus las demás tecnologías que también ofrecen una conexión de banda ancha inalámbrica.

**Tabla 3.1** Comparación de WiMAX con otras tecnologías de banda ancha inalámbrica<sup>2</sup>

Parámetro	WiMAX fijo	WiMAX móvil	HSPA	1x EV-DO Rev A	Wi-Fi
Estándar	IEEE 802,16-2004	IEEE 802,16e-2005	3GPP Release 6	3GPP2	IEEE 802,11a/g/h
Pico en tasa de transferencia de bajada	9,4Mbps en 3,5MHz con una proporción 3:1 DL-UL TDD; 6,1Mbps con 1:1	46Mbps* con proporción 3:1 DL-UL TDD; 32Mbps con 1:1	14,4Mbps usando 15 códigos; 7,2Mbps con 10 códigos	3,1Mbps; la Rev B soporta 4,9Mbps	
Pico en tasa de transferencia de subida	3,3Mbps en 3,5MHz con una proporción 3:1 DL-UL; 6,5Mbps con 1:1	7Mbps en 10MHz con una proporción 3:1 DL-UL; 4Mbps con 1:1	1,4Mbps inicialmente; 5,8Mbps luego	1,8Mbps	54 Mbps compartidos usando 802,11a/g; más de 100Mbps utilizando 802,11n
Ancho de banda	3,5MHz y 7MHz en una banda de 3,5GHz; 10MHz en una banda de 5,8GHz.	3,5MHz, 7MHz, 5MHz, 10MHz y 8,75MHz inicialmente	5MHz	1,25MHz	20MHz para 802,11a/g; 20/40MHz para 802,11n
Modulación	QSPK, 16 QAM, 64 QAM	QSPK, 16 QAM, 64 QAM	QPSK, 16 QAM	QPSK, 8 PSK, 16 QAM	BPSK, QPSK, 16 QAM, 64 QAM
Multiplexación	TDM	TDM/OFDMA	TDM/CDMA	TDM/CDMA	CSMA
Duplexación	TDD, FDD	TDD inicialmente	FDD	FDD	TDD
Frecuencia	3,5GHz y 5,8GHz inicialmente	2,3GHz, 2.5GHz y 3,5GHz inicialmente	800/900/1800/1900/2100MHz	800/900/1800/1900MHz	2,4GHz, 5GHz
Cobertura	3 a 5 millas	< a 2 millas	1 a 3 millas	1 a 3 millas	< 100 pies en interiores; < 1000 pies en exteriores

\* Asumiendo una configuración MIMO 2X2 y un canal de 10MHz.

<sup>2</sup> Andrews, J. Ghosh, A. Muhamed, R. Fundamentals of WiMAX. Prentice Hall. Primera Edición 2007.

### **3.2. Consideraciones para una red de banda ancha inalámbrica**

En esta sección se presentan las consideraciones que el diseñador debe contemplar para una correcta implementación de la red WiMAX. Para lograr el éxito en un sistema de banda ancha inalámbrico se debe entregar un rendimiento de mega bits por segundo a un nivel de usuario final manteniendo robustez en la calidad de servicio para soportar una amplia variedad de servicios (voz, datos y multimedia).

Debido al innegable éxito obtenido con Internet y la variedad de aplicaciones basadas en el protocolo IP, es de suma importancia que se diseñe una red capaz de dar un servicio eficaz a dichas aplicaciones. Para que la implementación de una red WiMAX sea considerada como exitosa es vital que el servicio ofrecido sea de mayor calidad ante las tecnologías alternativas como 3G y Wi-Fi.

Desde ésta perspectiva es importante para el diseño:

- Desarrollar una transmisión y recepción confiable para enviar información de banda ancha segura a través de un canal inalámbrico.
- Lograr alta eficacia espectral y cobertura para entregar servicios de banda ancha a un número grande de usuarios, utilizando el espectro disponible.
- Poseer servicios eficientemente multiplexados que permitan cumplir con las exigencias de la calidad de servicios.
- Ofrecer amplia movilidad considerando el roaming y la conmutación de las celdas.
- Asegurar bajo consumo de potencia para prolongar el tiempo de vida de las unidades inalámbricas operadas con batería.
- Proveer una seguridad de comunicación robusta.

- Adaptar los protocolos basados en IP para un ambiente inalámbrico de modo que se asegure bajo costo de implementación y convergencia con las redes alámbricas existentes.

En el diseño de una red WiMAX es importante encontrar el balance apropiado que permita una implementación inteligente. En la siguiente sección se explican cada uno de los desafíos técnicos que se deben considerar al diseñar una red WiMAX. En cuanto se avance en el proyecto se presentarán las posibles soluciones que se consideran más aptas ante cada uno de éstos desafíos.

### **3.3. Retos técnicos que presenta WiMAX**

#### **3.3.1. Canal de radio inalámbrico**

El primer y más importante desafío para la tecnología WiMAX es el canal de transmisión. Los requerimientos de la mayoría de servicios inalámbricos de banda ancha son tales que hacen que la señal deba viajar bajo condiciones NLOS. Las obstrucciones (pequeñas y grandes), las variaciones en el terreno, el movimiento relativo entre el receptor y el transmisor, la interferencia de otras señales, el ruido y muchos otros factores juntos hacen que la señal se debilite, retrase, atenúe y distorsione de un modo impredecible ante la variación del tiempo. Es un desafío para los sistemas de comunicación digital obtener un buen comportamiento antes éstas condiciones; especialmente cuando el servicio debe presentar tasas de transferencias muy altas y alta velocidad de movilidad.

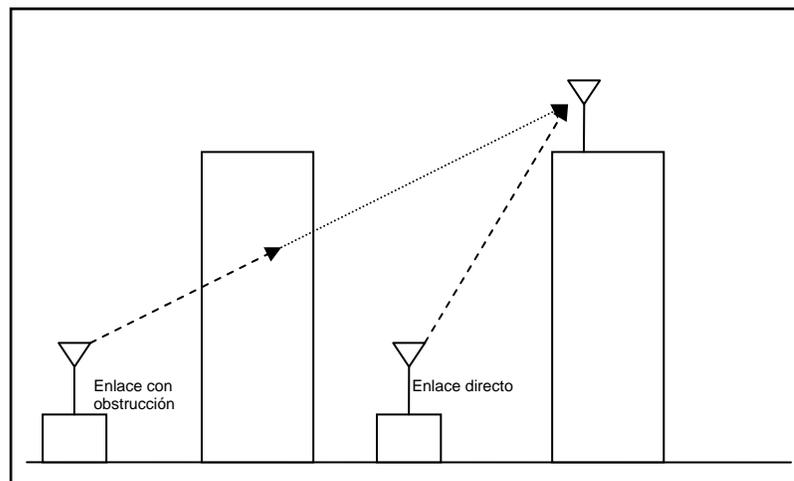
#### *- Pérdidas de camino (pathloss):*

En ambientes NLOS, la señal recibida generalmente decae proporcionalmente a la distancia en una tasa mucho mayor que en condiciones LOS. La relación existente entre la potencia de la señal y la distancia recorrida es llamada pérdida de camino (pathloss). Las pérdidas de camino dependen de muchas variables como el terreno, las obstrucciones y la altura de la antena. Matemáticamente las pérdidas de camino poseen una relación cuadrática inversa con la frecuencia portadora.

Debido a esto los sistemas de banda ancha inalámbricos deben de desarrollarse en bandas superiores a 2GHz si desea trabajar en condiciones NLOS.

- *Sombreado (shadowing)*

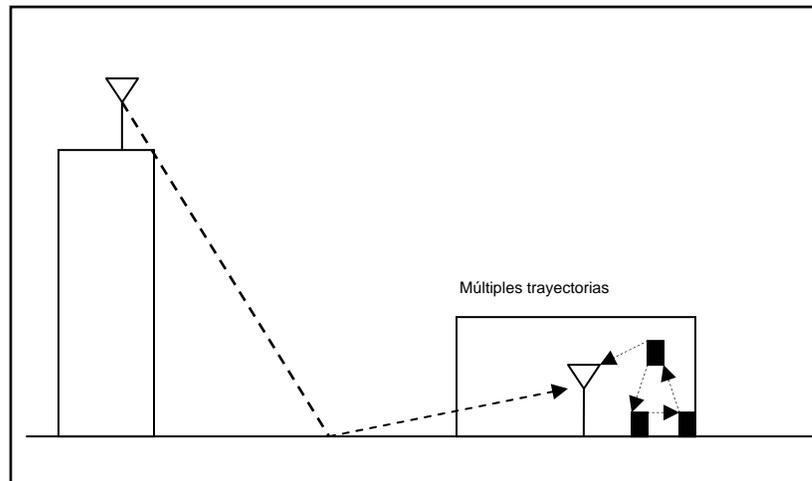
Obstrucciones presentes en el camino de transmisión, como edificios, bloquean de cierta forma las señales. Estas señales se propagan a través de las obstrucciones a través de la difracción; sin embargo, se incurre en grandes pérdidas en éste proceso. Este tipo de pérdidas se conoce como sombreado (shadowing) y se suma a la dependencia de la distancia como un reto importante a considerar. En la gráfica de la figura 3.2, a continuación, se ilustra éste caso.



**Figura 3.2** Obstrucciones en un sistema WiMAX

- *Atenuación multi-trayectoria (multipath fading)*

La presencia de objetos a lo largo del canal produce reflexión y dispersión ante la señal enviada. Esto provoca que la señal se propague a través de múltiples caminos; este fenómeno se conoce como atenuación multi-trayectoria (multipath fading). Dicho fenómeno se caracteriza por grandes variaciones (en la escala de 10dB's) en la amplitud de la señal recibida para distancias o duraciones muy cortas. En la gráfica de la figura 3.3, a continuación, se ilustra éste caso.



**Figura 3.3** Atenuación multi-trayectoria en un sistema WiMAX

- *Interferencia intersímbolo*

En un ambiente de multi-trayectoria, los retrasos debido a la dispersión del tiempo representan una fracción muy importante en el periodo de símbolos de la señal. De este modo, un símbolo transmitido puede llegar al receptor hasta en el siguiente período causando lo que se conoce como interferencia intersímbolo (ISI). Cuando se trabaja con tasas de transferencias muy altas el tiempo de cada símbolo es menor provocando que éste tipo de interferencia se produzca con retrasos muy pequeños. Esto hace de las ISI's algo muy importante a considerar en el diseño de las comunicaciones inalámbricas.

- *Efecto Doppler*

El movimiento relativo entre el transmisor y el receptor causa dispersión en la frecuencia portadora. A éste fenómeno se le conoce como efecto Doppler. El efecto Doppler está directamente relacionado a la velocidad del movimiento y a la frecuencia portadora. En los sistemas de banda ancha, éste efecto hace que se pierda la relación señal a ruido (SNR) y produce que se dificulte la recuperación de la portadora y la sincronización. El efecto Doppler es de mucho interés para los sistemas OFDM debido a que afecta la ortogonalidad de las subportadoras OFDM.

- *Ruido Gaussiano*

El ruido Gaussiano (AWGN) es el daño más básico que existe en los canales de comunicación. Debido a que el ruido es proporcional al ancho de banda, en receptores de banda ancha se percibe en mayor proporción comparado a los sistemas de banda angosta. El alto ruido presentado en estos sistemas hace que se reduzca el rango de cobertura.

### **3.3.2. Limitaciones de espectro**

El segundo gran desafío proviene de la escasez de los recursos del espectro de radio. Los entes reguladores del espectro alrededor del mundo establecen únicamente una cantidad limitada del espectro para el uso comercial. La necesidad de acomodar un número creciente de usuarios y ofrecer aplicaciones de banda ancha utilizando un espectro limitado hace que el diseñador plantee soluciones inteligentes para utilizar el espectro de la forma más eficiente posible.

Existen varias técnicas desarrolladas para maximizar la eficiencia del espectro y proveer la capacidad necesaria a un sistema con la tecnología WiMAX. A continuación se reseñan brevemente algunos ejemplos de dichas técnicas.

- *Modulación y codificación adaptativa*

La idea principal con esta técnica es variar la modulación y codificación por usuario y/o por paquete dependiendo de las condiciones de SINR existentes en el canal. Mediante la utilización de ésta técnica se consigue que las tasas de datos que recibe un usuario sean maximizadas.

- *Multiplexación espacial*

Con la multiplexación espacial se pretende que tramas independientes se transmitan en paralelo a través de múltiples antenas y que el receptor las pueda reconocer mediante la utilización de un procesamiento de la señal apropiado.

La multiplexación espacial hace que la tasa de transferencia y la capacidad del sistema aumenten proporcionalmente al número de antenas utilizado.

- *Técnicas de multi acceso*

Además de asegurar que cada usuario utilice el espectro lo más eficiente posible, deben de crearse métodos que permitan compartir los recursos eficientemente a través de los múltiples usuarios.

Es importante resaltar en este punto que la capacidad del sistema y la eficiencia espectral no deben de divorciarse de la necesidad de ofrecer una adecuada cobertura. El gran reto presente para el diseño de la red WiMAX es obtener el balance apropiado entre la capacidad y la cobertura que permitan una conexión de calidad y fiabilidad a un costo razonable.

**3.3.3. Calidad de servicio**

La calidad de servicio o QoS hace referencia a la colección de servicios de calidad que son percibidos por un usuario final. En el diseño de una red la QoS se llega a conocer a través de una serie de requisitos como: tasa de datos, flujo de tráfico, pérdida de paquetes y retardos. Una red inalámbrica de banda ancha como WiMAX debe de estar en capacidad de proveer una variedad de servicios como voz, datos, video y multimedia. Cada uno de estos servicios posee características distintas que se muestran a continuación en la tabla 3.2.

**Tabla 3.2 Parámetros de tráfico para aplicaciones en un sistema de banda ancha inalámbrica.<sup>3</sup>**

Parámetro	Medios de comunicación				
	Juegos Interactivos	Voz	Datos	Video	
Tasa de datos	50kbps-85kbps	4kbps-64kbps	5kbps-384-kbps	0,01Mbps-100Mbps	>1Mbps
Ejemplos de aplicaciones	Juegos Interactivos	VoIP	Musica, discursos, video clips	Navegación en la web, e-mail, mensajes instantáneos (IM), descarga de archivos	IPTV, descarga de películas, Video conferencias
Flujo del tráfico	Tiempo real	Tiempo real continuo	Continuo, a ráfagas	No tiempo real, a ráfagas	Continuo
Pérdida de paquetes	Cero	<1%	<1% para audio; <2% para video	Cero	<10E-8
Retraso	<50ms-150ms	<100ms	<250ms	Flexible	<100ms

### 3.3.4. Movilidad

Para los usuarios finales, la movilidad es una de las ventajas más distintivas que un sistema inalámbrico ofrece. El hecho que el suscriptor se desplace sobre un área grande representa un reto grande para el diseño de la red:

- Se debe proveer un medio para alcanzar aquellos usuarios que se encuentren inactivos y lograr la inicialización de la sesión sin importar la ubicación de los mismos.
- Mantener la conectividad de la sesión iniciada sin interrupciones mientras el suscriptor se desplaza (incluso a velocidad vehicular).

El primer punto hace referencia a lo que se conoce como roaming mientras que el segundo a handoff o conmutación de las celdas. Ambos puntos constituyen la directriz en cuanto a la movilidad del sistema; su correcta implementación asegura una buena experiencia para los suscriptores.

<sup>3</sup> ITU. Telecommunications indicators update – 2004. [www.itu.int/ITU-D/ict/statistics/](http://www.itu.int/ITU-D/ict/statistics/).

### **3.3.5. Seguridad**

La seguridad es un factor muy importante a considerar en el diseño de cualquier sistema de comunicación. Sin embargo, cuando se trata de comunicaciones inalámbricas, éste factor se hace aún más importante. El medio inalámbrico puede ser percibido por público en general lo que hace que estos sistemas sean más vulnerables ante los demás.

Desde la perspectiva del usuario final, la principal premisa debe ser la integridad y privacidad de los datos. Los usuarios deben sentirse seguros que nadie podrá tener acceso a su sesión y que los datos que atraviesan el enlace de comunicación no sean interceptados.

Desde la perspectiva del proveedor de servicio, es importante prevenir el uso sin autorización de los servicios de red.

### **3.3.6. Soporte del protocolo IP**

El protocolo IP se ha convertido en el protocolo de red de elección en los sistemas de comunicación modernos. No solo se está utilizando para datos sino que también para voz, video y multimedia. Voz sobre IP está emergiendo rápidamente como un competidor formidable ante el tradicional sistema de voz basado en circuitos conmutados. Video sobre IP e IPTV también surgen como rivales potenciales al sistema de televisión por cable. Debido a que cada vez son más las aplicaciones que emigran a IP, los protocolos y arquitectura basados en IP deben de ser considerados al momento de diseñar sistemas inalámbricos de banda ancha.

Los protocolos basados en IP son simples y flexibles, sin embargo no son del todo eficientes o robustos. Estas son las deficiencias que se deben considerar en un sistema inalámbrico: (1) hacer protocolos IP más eficientes para el ancho de banda; (2) adaptarlos para las características que se buscan con QoS; (3) hacerlos amigables para la movilidad de terminales dentro de la red.

A continuación, en la tabla 3.3 se resumen todas las características que representan un reto para el diseño de la red WiMAX de éste proyecto.

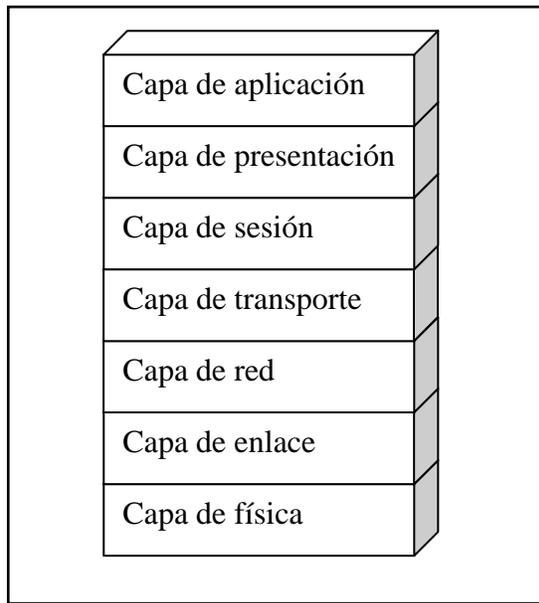
**Tabla 3.3 Resumen de los desafíos técnicos que se deben considerar en el proyecto**

Servicio	Desafío técnico
NLOS	Reducción de multi trayectorias e interferencia
Alta tasa de transferencia y capacidad	Asegurar alta eficiencia espectral
	Controlar la interferencia intersimbolo
QoS	Soportar voz, datos, video.
	Administración de los recursos de radio
	Calidad de servicio a usuario final
	Capacidad para alcanzar a un suscriptor independientemente de su ubicación
Movilidad	Darle continuidad a la conexión mientras se desplaza a través del área de cobertura
	Darle continuidad a la conexión mientras atraviesa diversas redes
Seguridad	Proteger la integridad y privacidad de la información del usuario
	Prevenir el acceso sin autorización a la red
Bajo costo	Proveer una comunicación eficiente y rentable mediante la utilización de arquitectura IP

### 3.3.7. Estructura de una red

El diseño de red de este proyecto se basa en el modelo OSI para la interconexión de sistemas abiertos. Dicho modelo describe el uso de datos entre la conexión física de la red y la aplicación del usuario final. A continuación en la figura 3.4 se muestran las capas definidas por el modelo OSI.<sup>4</sup>

<sup>4</sup> <http://www.ie.itcr.ac.cr/faustino/Redes/Clase1/1.1ModeloOSI.pdf>



**Figura 3.4** Capas de red definidas por el modelo OSI

La capa de enlace se trabajará como capa MAC dentro del proyecto debido a que constituye parte importante de la capa de enlace como tal.

## Capítulo 4: Procedimiento Metodológico

El proyecto se desarrolló considerando tres pilares fundamentales. El primer pilar conlleva la realización de una extensa investigación bibliográfica que repercutirá en la definición de los parámetros de diseño de la red WiMAX. El segundo hace referencia a un análisis de desempeño a través de varias simulaciones utilizando un software computacional. En base a los dos pilares anteriores se busca en el tercero realizar una serie de recomendaciones que permitan un rediseño e implementación como segunda fase del proyecto.

### **4.1. Establecimiento criterios de diseño**

Para lograr un establecimiento de los criterios de diseño en una red WiMAX se realizó una investigación bibliográfica extensa debido a lo nuevo de la tecnología en cuestión. Se indagó en sitios de Internet, publicaciones de Wimax Forum, publicaciones de fabricantes de equipo y libros de texto hasta tener el conocimiento adecuado para establecer parámetros de una red WiMAX.

Durante la investigación se consideró como objetivo cubrir temas fundamentales en una red WiMAX como lo son:

- Canal de transmisión
- Eficiencia Espectral
- Seguridad
- QoS
- Movilidad
- Bajo consumo de potencia
- Convergencia y escalabilidad

En cada uno de los temas anteriores se buscó obtener una solución factible a los problemas que se presentan en una red inalámbrica de banda ancha. Fue necesario en ocasiones recurrir a tecnologías precursoras para entender sus limitantes y debilidades ante WiMAX.

Importante notar a lo largo del proyecto que para una característica en específico se planteó más de una posible implementación; esto se analizó en la etapa de simulaciones para elegir el funcionamiento que mejor se ajuste a las necesidades del proyecto.

#### **4.2. *Elaboración prototipo simulado***

Una vez se obtuvo el conocimiento necesario para establecer criterios de diseño, se procedió a realizar pruebas de simulaciones para conocer el funcionamiento de una red WiMAX bajo condiciones establecidas.

La etapa de simulación (debido a las características de una red WiMAX) fue dividida en dos:

- Simulaciones a nivel de enlace
- Simulaciones a nivel de sistema

A través de cada simulación se obtienen comportamientos que determinan la elección de una u otra característica de red teniendo como norte las necesidades de la empresa ante una posible implementación. En este punto se realiza la elección en base a variables tales como la tasa de error de bits, la relación señal a ruido y la velocidad de conexión de un enlace.

### **4.3. *Recomendaciones y comentarios***

En base a las simulaciones realizadas y a las necesidades que la empresa tiene, se busca recomendar acerca de los posibles modelos de expansión y los aspectos importantes que se deben de considerar en una segunda fase del proyecto como podría ser la implementación propia de la red.

## Capítulo 5: Diseño red WiMAX

En este capítulo se realiza el diseño propio de la red WiMAX. Se mencionan las especificaciones de diseño de acorde a lo comentado en el marco teórico del modelo OSI. Referente al modelo se trabaja en este capítulo en el diseño de:

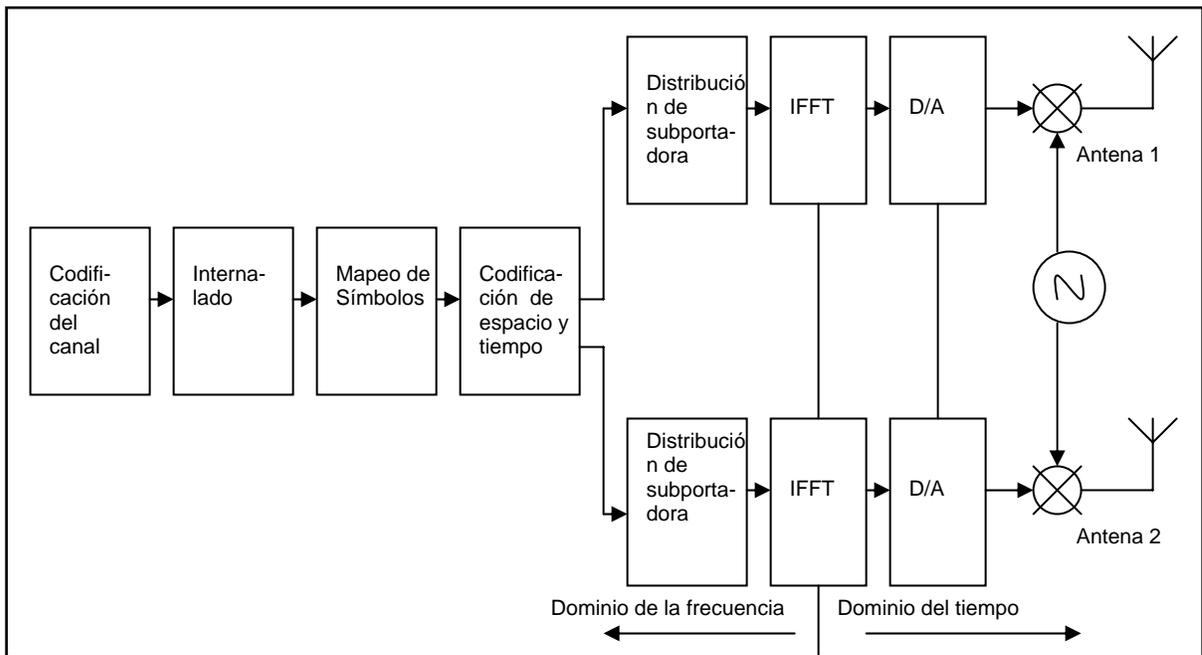
- Capa física
- Capa MAC (enlace)
- Capa de red.

### 5.1 *Capa Física*

La capa física se basa en los estándares que establece la IEEE en 802.16e-2005. Estos estándares fueron diseñados con mucha influencia de Wi-Fi, especialmente en el 802.11a. WiMAX se basa en los principios de OFDM (multiplexación por división de frecuencia ortogonal) la cual es una técnica muy satisfactoria para la modulación en condiciones NLOS con altas tasas de transferencias.

Para el diseño de la red de éste proyecto se ha considerado apropiado elegir como capa física a WirelessMAN-OFDMA debido a que es el estándar establecido por WiMAX Forum para la aplicación móvil de ésta tecnología. La misma es una capa basada en una FFT (transformada rápida de Fourier) con tamaño variable. Opera en condiciones NLOS a frecuencia entrega 2GHz y 11GHz. Para el estándar 806.16e-2005 ésta cualidad de tamaño FFT variable se conoce como SOFDMA (OFDMA escalable). El hecho que el tamaño sea variable permite óptima operación/implementación del sistema sobre un amplio rango de canales de ancho de banda y condiciones de radio.

La figura 5.1, a continuación, muestra los bloques funcionales que establecen la capa física del sistema WiMAX del proyecto.



**Figura 5.1** Diagrama de bloques de la capa física de la red

Según se muestra en la figura 1, se detallan a continuación los bloques funcionales que forman parte fundamental de la capa física de la red diseñada.

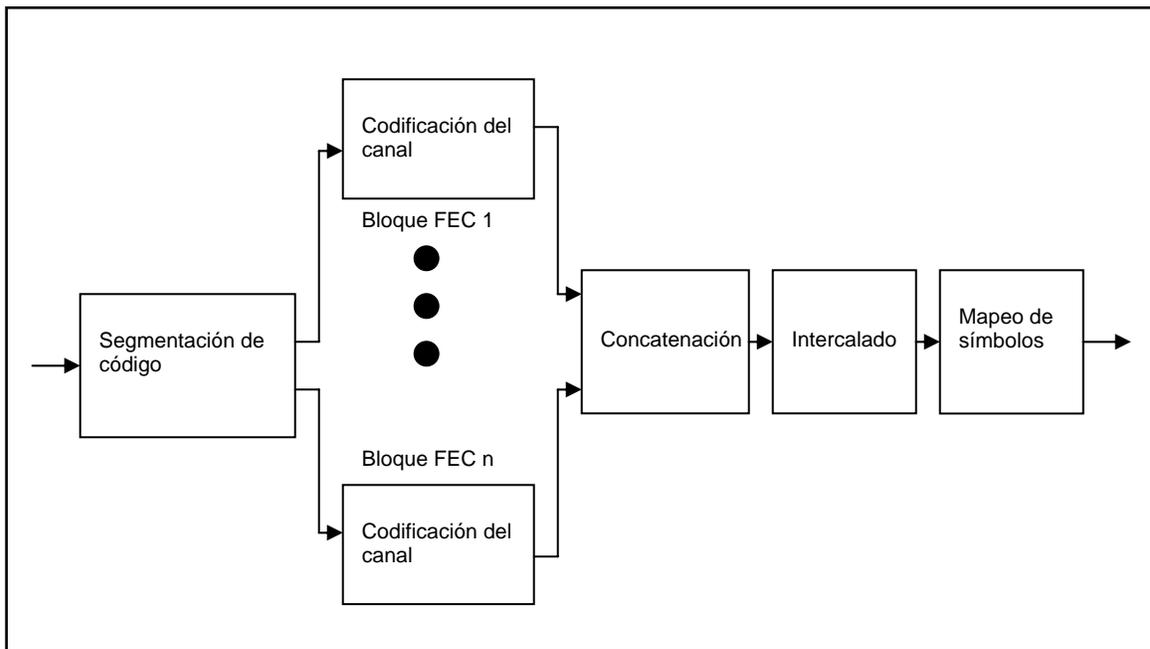
### 5.1.1. **Codificación del canal**

El primer paso en la codificación del canal es la aleatorización de la información. Es implementado tanto en UL (enlace de subida) como en DL (enlace de bajada) a través de una secuencia de corrimiento que inicia al principio de cada bloque FEC (forward error correction). El propósito de este paso es proveer a la capa 1 encriptación para prevenir que un receptor pueda descifrar los datos.

La codificación del canal se realiza en cada uno de los bloques FEC, los cuales consisten en un número entero de subcanales. Un subcanal es unidad básica de distribución en la capa física y contienen las subportadoras pilotos. El número exacto de subportadoras pilotos que se encuentran en un subcanal depende del esquema de permutación de subportadora a utilizar. Mas adelante se define el esquema elegido para este proyecto.

El número máximo de subcanales en un bloque FEC depende del esquema de codificación que se elija así como de la constelación de la modulación. Estas selecciones también serán explicadas mas adelante.

Importante resaltar en este punto que la tecnología WiMAX funciona de tal modo que, si el número de subcanales requeridos para un bloque FEC es mayor que el límite, el bloque es segmentado en varios sub-bloques FEC. De este modo cada uno de los sub-bloques se codifica independientemente para concatenarlos secuencialmente en un segundo paso. Este proceso se muestra a continuación en la gráfica de la figura 5.2.



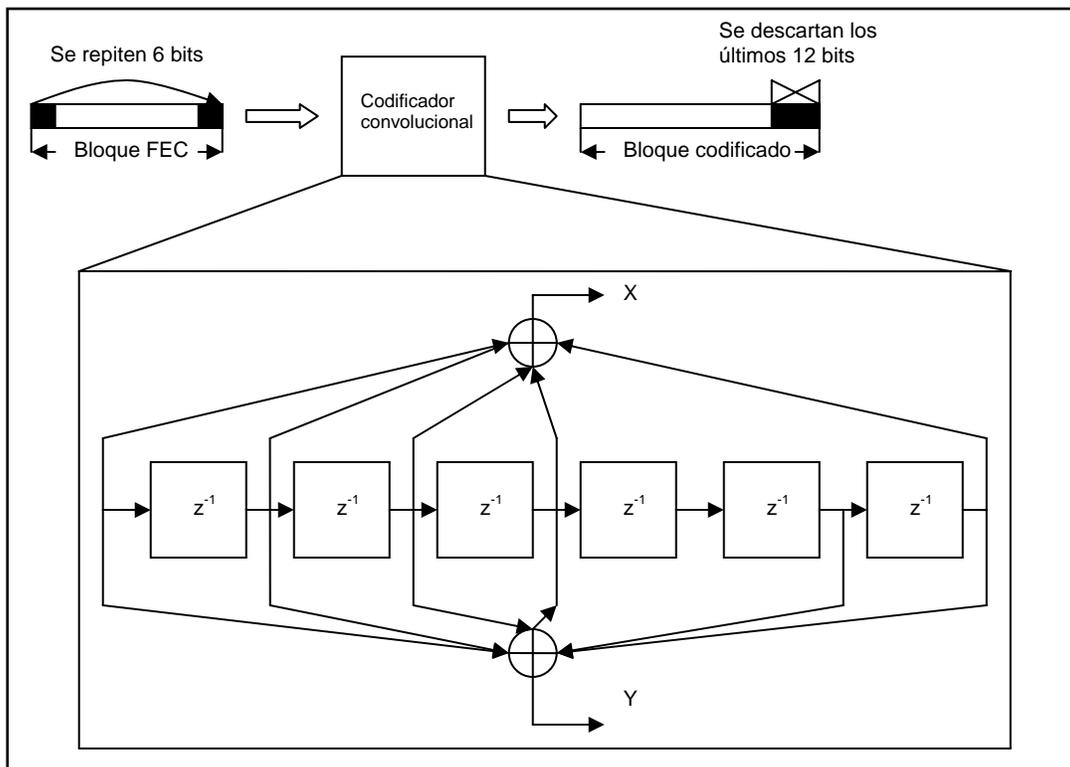
**Figura 5.2** Diagrama de bloques de la capa física de la red

El proceso de segmentación de bloques FEC logra prevenir la excesiva complejidad y requisitos de memoria en el algoritmo de decodificación en el receptor.

### *Codificación Convolutional*

El esquema de codificación con el que se trabaja en este proyecto es definido por el estándar 802.16e-2005 y se basa en una codificación convolutional binaria no

recursiva. La salida de la etapa de aleatorización sirve de entrada para el esquema de codificación tal como se muestra en la gráfica de la figura 5.3. Cada bloque FEC que se codifica ingresa con los primeros 6 bits repetidos al final; con esto se logra más eficiencia en el ancho de banda aunque hace que el proceso sea más complejo. Al final los últimos 12 bits se descartan y los datos han sido codificados mediante éste esquema.



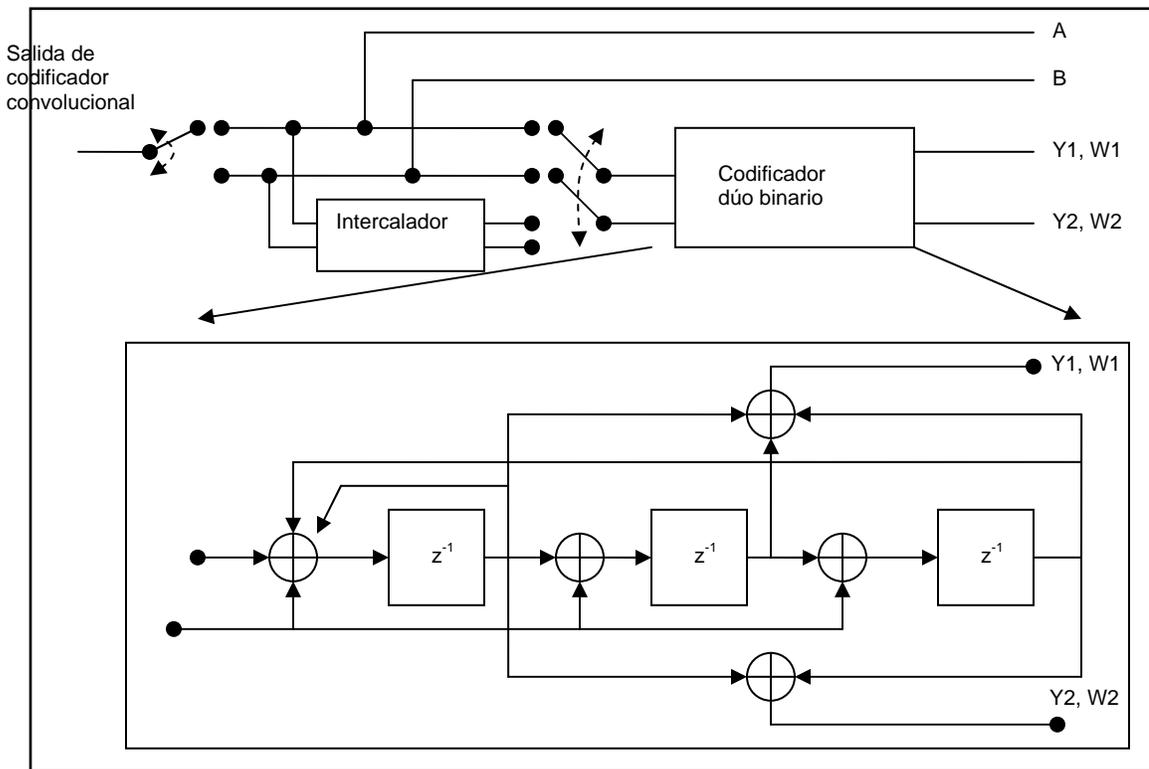
**Figura 5.3** Codificador convolucional de la red WiMAX

### *Códigos turbo dúo binarios*

Además del esquema convolucional de codificación, es posible utilizar esquemas opcionales que permiten obtener ventajas adicionales en cuando al funcionamiento del sistema. En este proyecto se analiza la implementación de códigos turbo dúo binarios que en comparación con los códigos turbo binarios permiten:

- Mejor Convergencia
- Distancia mínima mayor entre las palabras de los códigos.
- Tasas de codificación más altas que la pérdida por redundancia
- Robustez en la codificación

En la gráfica de la figura 5.4 se muestra el bloque que implementa los códigos turbo dúo binarios y su conexión con el intercalador previo para una correcta codificación de la información.



**Figura 5.4** Codificador dúo binario de la red WiMAX<sup>5</sup>

<sup>5</sup> Berrou, C. Jezequel, M. Non binary convolutional codes and turbo coding. Electronics Letters. Enero 1999. [www.ieee.com](http://www.ieee.com)

En la figura 5.4:

- A y B contienen los bits sin codificar
- Y1 y W1 contienen los bits de paridad de la secuencia de codificación en orden natural
- Y2 y W2 contienen los bits de paridad de la secuencia intercalada

Como se muestra en la figura 8, éste esquema también utiliza la convolución para codificar los símbolos y permitir mayor grado de libertad al momento de diseñar las permutaciones intersímbolos. Esto se debe a que la distancia mínima entre las palabras de código será mayor. La ventaja de la utilización de éste método se verá al implementar el intercalador.

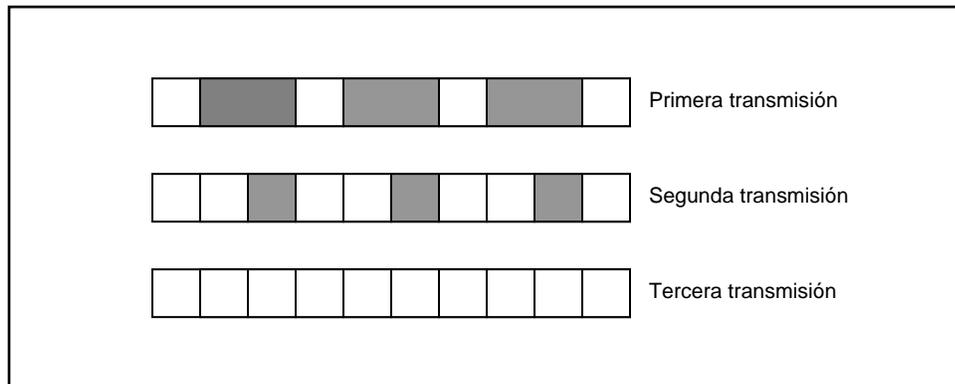
A través de éste esquema entonces, los bits sistemáticos pueden ser codificados utilizando el intercalador previo que genera el distanciamiento de las palabras de código.

#### *Solicitud automática de transmisiones Híbrida*

Solicitud automática de transmisiones híbridas (H-ARQ) es un sistema que se implementa en la capa física en conjunto a FEC para mejorar el funcionamiento del enlace sobre sistemas tradicionales de arquitectura. La idea detrás de este sistema es presentar un alto grado de fiabilidad en el traslado de información. El estándar WiMAX 802.166e-2005 permite la implementación de H-ARQ tipo I y tipo II.

Se utiliza en este proyecto H-ARQ tipo II que es también conocido como redundancia incremental. En este tipo se solicitan retransmisiones de la información a tasas cada vez mas bajas y la salida se compara con la entrada hasta que se obtenga información fiable en su salida. Este es un proceso opcional que asegura la correcta codificación de los datos y evita errores de primera mano.

En la figura 5.5, a continuación se muestra el proceso que se lleva a cabo mediante la utilización de H-ARQ tipo II.



**Figura 5.5** Proceso H-ARQ tipo II a implementar

### *Intercalador*

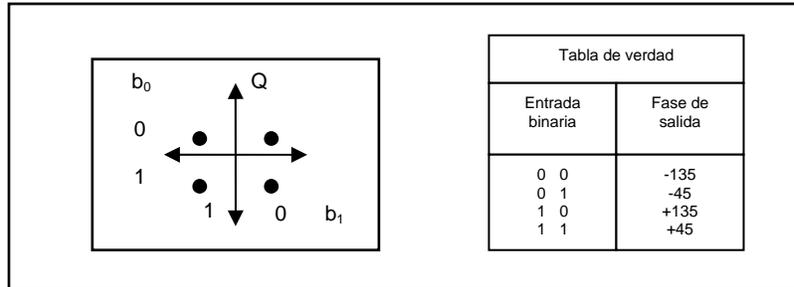
Después de codificar el canal, el siguiente paso es intercalar la información. Se utilizará un proceso de dos pasos para alcanzar éste objetivo:

- El primer paso es asegurar que los bits adyacentes que fueron codificados sean ubicados en subportadoras no adyacentes. Esto genera diversidad de frecuencia y mejora el comportamiento del decodificador.
- El segundo paso consiste en asegurar que los bits adyacentes sean ubicados del LSB al MSB en la constelación de modulación usada. Esto debido a que, dependiendo la constelación de modulación empleada, la probabilidad de error en un LSB es mayor que en un MSB.

### *Mapeo de símbolos*

En esta etapa la secuencia binaria de bits se convierte en una secuencia de símbolos complejos dependiendo de la constelación de modulación a emplear. En este proyecto se trabajará con la constelación de modulación QPSK que se muestra a continuación en la figura 5.6.<sup>6</sup>

<sup>6</sup> <http://www.udistrital.edu.co/comunidad/profesores/jruiz/jairocd/texto/usm/cd/modulacion.doc>



**Figura 5.6** Constelación de modulación QPSK

### 5.1.2. Estructura de símbolo OFDM

En un sistema OFDM (multiplexación por división de frecuencia ortogonal), una tasa alta de secuencia de símbolos se divide en varias secuencias de tasas bajas; las cuales utilizan una subportadora ortogonal para su modulación.

La flexibilidad de la capa física de WiMAX permite la selección de algunos parámetros de capa como por ejemplo: el número de subportadoras, la separación de las subportadoras y el intervalo de preámbulo.

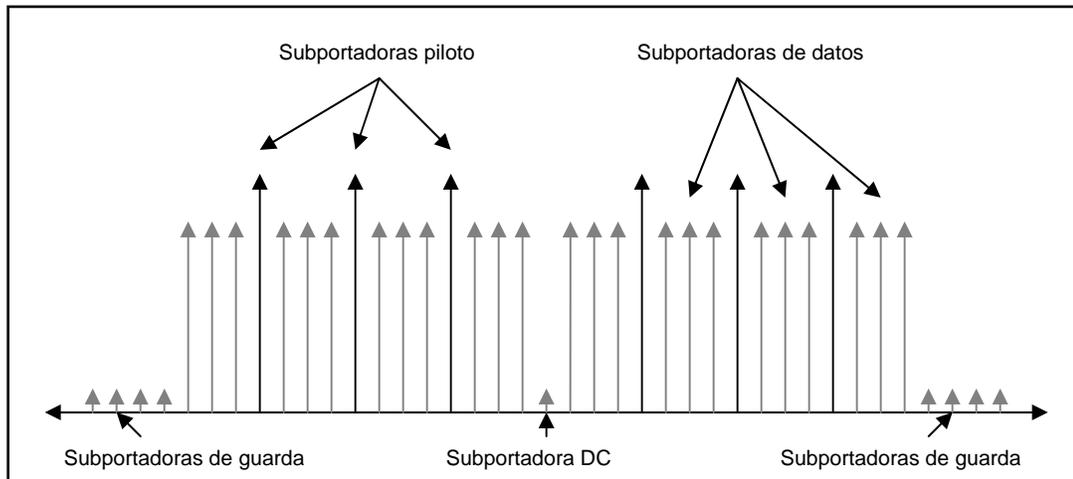
El concepto de modulación en OFDM es realizar múltiples modulaciones ortogonales independientemente con tramas de símbolos de banda angosta. Esto es lo mismo que primero construir la señal completa OFDM en el dominio de la frecuencia y luego utilizar la transformada inversa rápida de Fourier (IFFT) para convertir la señal en el dominio del tiempo. El método de la IFFT es sencillo de implementar debido a que no requiere múltiples osciladores para transmitir y recibir una señal OFDM.

En el dominio de la frecuencia, cada símbolo OFDM es creado ubicando las secuencias de símbolos en las subportadoras. En WiMAX se tienen tres clases de subportadoras:

1. Subportadoras de datos: usadas para tener los símbolos de datos.
2. Subportadoras pilotos: Utilizadas para seguimiento y estimaciones del canal.

3. Subportadoras nulas: No poseen potencia almacenada e incluye a la subportadora DC. La subportadora DC no es modulada para evitar efectos de saturación o exceso de potencia en el amplificador.

A continuación en la figura 5.7 se muestra una representación de un símbolo OFDM en el dominio de la frecuencia.<sup>7</sup>



**Figura 5.7** Representación de un símbolo OFDM en el dominio de la frecuencia

#### *Permutación de subcanal y subportadora<sup>8</sup>*

Como se mencionó antes, para crear el símbolo OFDM en el dominio de la frecuencia, los símbolos modulados se ubican en los subcanales establecidos para realizar la transmisión.

El estándar 806.16e-2005 define al subcanal como una colección lógica de subportadoras. El número y la distribución exacta de las subportadoras que constituyen un subcanal dependen del esquema de permutación de subportadora que se utilice. El número de subcanales asignados para transmitir un bloque de datos depende de varios parámetros: el tamaño del bloque de datos, el formato de modulación y la tasa de codificación.

<sup>7</sup> Cimini. L. *Análisis and simulation of a digital mobile channel using orthogonal frequency division multiplexing*. IEEE transactions on communications. Julio 1985. [www.ieee.com](http://www.ieee.com)

<sup>8</sup> Entiéndase permutación en este contexto como el cambio en el orden de la subportadora.

Es importante tomar en cuenta que, en WiMAX, las subportadoras que forman un subcanal pueden ser adyacentes o distribuidas a lo largo de la banda de frecuencia, dependiendo el modo de permutación de subportadora empleado.

En la tabla 5.1 a continuación se muestran los distintos esquemas de permutación de subportadora y su relación con un símbolo OFDM.

**Tabla 5.1** Esquemas de permutación de subportadora en WiMAX

<b>Esquema de permutación</b>	<b>Descripción</b>
Uso total de subportadora en la bajada (FUSC)	Cada segmento contiene 48 subportadoras en un símbolo OFDM
Uso parcial de subportadora en bajada (DL PUSC)	Cada segmento contiene 24 subportadoras en dos símbolos OFDM
Uso parcial de subportadora en subida (UL PUSC)	Cada segmento contiene 16 subportadoras en tres símbolos OFDM
Modulación de banda adaptativa y codificación (AMC)	Cada segmento contiene 8, 16 o 24 subportadoras en 6,3 o 2 símbolos OFDM.

### **5.1.3. Sistemas avanzados de antenas**

Para el estándar 802.16e-2005 es vital dar soporte a los sistemas avanzados de antenas (AAS) para ofrecer mejoras en el comportamiento total del sistema y en la eficiencia espectral de la red.

Los AAS en WiMAX utilizan múltiples antenas en el transmisor y el receptor para lograr: diversidad y multiplexación espacial. Un sistema de antenas avanzado puede ser implementado tanto en un modo de lazo abierto como de lazo cerrado.

#### *(a) AAS en modo lazo abierto*

Cuando AAS es utilizado en modo lazo abierto, el transmisor no conoce la información del estado del canal de un receptor específico. De este modo, las antenas múltiples pueden ser utilizadas para generar diversidad y multiplexación espacial.

*(b) AAS en modo lazo cerrado*

En el modo anterior, el transmisor no conocía información del estado del canal (CSI). Sin embargo, los sistemas MIMO (entradas múltiples y salidas múltiples) y los esquemas de diversidad se benefician grandemente si conocen la CSI del receptor.

Este tipo de información puede ser utilizada en el transmisor para seleccionar apropiadamente el modo MIMO (es decir, número de antenas transmisoras, número de tramas simultáneas y matriz de codificación espacio/tiempo).

El estándar IEEE 802.16e-2005 define cinco mecanismos para que el transmisor (estación base, BS) determine información valiosa del receptor (estación móvil, MS):

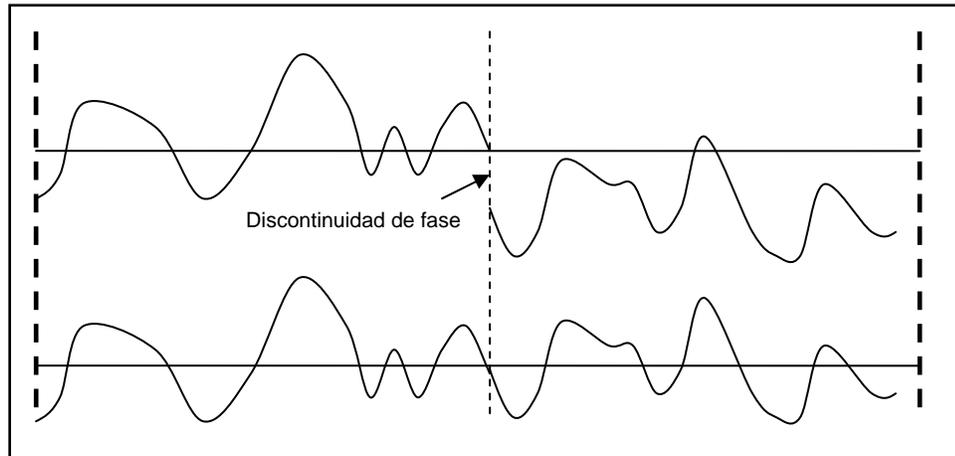
1. Selección de antena
2. Agrupación de antena
3. Realimentación basado en un libro de base de datos
4. Realimentación cuantificando el canal
5. Sondeo del canal

**5.1.4. Mecanismos de control para la capa física**

*Medición de la distancia*

En el estándar de la IEEE 802.16e-2005, la medición de la distancia de transmisión es un procedimiento realizado para mantener la calidad y la fiabilidad de la comunicación del enlace de radio entre BS y MS. Cuando se recibe una transmisión para medir la distancia de la estación móvil, la estación base procesa la señal recibida para estimar varios parámetros del enlace de radio que pueden ser mejorados u optimizados. Esto permite a la BS indicarle a la MS sobre cualquier tipo de ajuste que sea necesario realizar en el nivel de potencia de la señal o en la sincronización de los tiempos.

El proceso de medición de la distancia se lleva a cabo mediante la transmisión de una secuencia predeterminada conocida. En la figura 5.8 se muestra la construcción del símbolo de medición de distancia. En el mismo se compara la señal recibida con una predeterminada para establecer si los tiempos de llegada son los correctos o se debe hacer alguna modificación para sincronizar ambas señales. El proceso es tal que realizar auto solicitudes para comprobar continuamente la distancia y así generar la señal con la potencia y tiempo necesarios para que la información sea interpretada correctamente en la estación móvil. En la sección de la capa MAC se ve más a detalle el procedimiento a seguir para la medición de la distancia BS-MS.



**Figura 5.8** Construcción del proceso de medición de distancia

### *Control de potencia*

Con el objetivo de mantener la calidad del enlace de radio entre MS-BS y para controlar la interferencia del sistema en general, se lleva a cabo un mecanismo de control de potencia en la subida de información. Este mecanismo se realiza a través de una calibración de potencia inicial y de un procedimiento de ajustes periódicos.

La estación base utiliza las transmisiones de la medición de distancia de varias estaciones móviles para estimar el ajuste inicial para el control de potencia. La BS utiliza mensajes MAC dedicados para indicarle a la estación móvil los ajustes que debe hacer en el nivel de potencia.

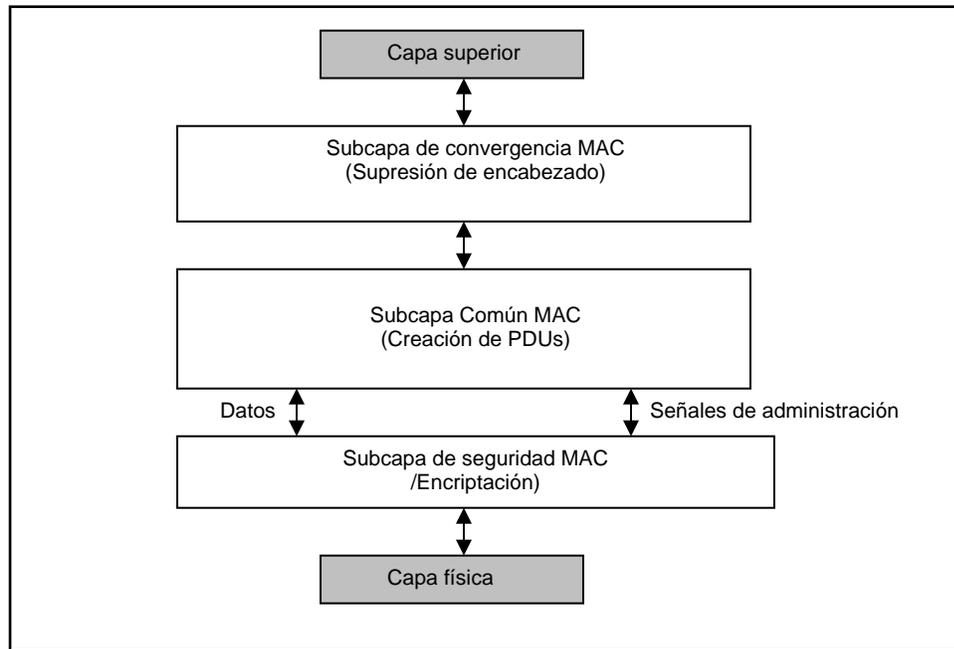
No se trabaja en este proyecto sobre un soporte explícito para el control de potencia en la bajada de información (downlink) ya que el trabajo en el receptor corresponde a las especificaciones que cada fabricante desee. Lo importante en todo caso es que al basar el diseño de la red WiMAX en los estándares de la IEEE 802.16e-2005, se asegura la interoperabilidad de la red y queda a criterio del diseñador aspectos opcionales como éste y otros que hemos mencionado.

## **5.2 Capa MAC**

La capa de control de acceso al medio o MAC se encuentra encima de la capa física y es responsable de controlar y multiplexar varios enlaces sobre el mismo medio físico en que trabaja la capa física. Algunas de las funciones importantes que se realizarán en la capa MAC de éste proyecto son:

- Segmentar y concatenar las unidades de servicio de datos (SDUs) que se reciben de las capas superiores a través del protocolo de unidades de datos (MAC PDU).
- Seleccionar los parámetros apropiados del perfil y el nivel de potencia que usan para la transmisión los protocolos de unidad de datos (MAC PDUs).
- Retransmitir los MAC PDUs que hayan sido recibidos con errores cuando se utilice la solicitud de repetición automática (ARQ).
- Controlar y priorizar la calidad de servicio (QoS) de los MAC PDUs de acuerdo al tipo de señal e información.
- Soportar a las capas superiores respecto a la administración de la movilidad.
- Proveer seguridad en la transmisión
- Proveer operaciones para el ahorro de la energía.

En la figura 5.9, a continuación se muestra el esquema de la capa MAC que se emplea en la red WiMAX de éste proyecto.<sup>9</sup>



**Figura 5.9** Capa MAC de la red WiMAX

La capa MAC de la figura 5.9 se divide en tres:

- La subcapa de convergencia (CS): Es la interfaz entre el resto de la capa MAC y la capa superior de la red. Los paquetes que son recibidos en esta subcapa por la capa superior se conocen como unidades de servicio de datos (SDUs). La CS es la responsable de realizar todas las operaciones de protocolo de la capa superior como: compresión de encabezados y direccionamiento.
- Subcapa común: Esta subcapa realiza todas las operaciones de paquetes que son independientes de las capas superiores como: fragmentación y concatenación de SDUs en MAC PDUs, transmisión de MAC PDUs, control de QoS y ARQ.

<sup>9</sup> Andrews, J. Ghosh, A. Muhamed, R. Fundamentals of WiMAX. Prentice Hall. Primera Edición 2007.

- Subcapa de seguridad: Es la subcapa responsable de la encriptación, autorización e intercambio apropiado de las claves de encriptación entre las estaciones base (BS) y las móviles (MS).

A continuación se detallan los aspectos que se toman en cuenta para el diseño de la capa MAC de la red WiMAX.

#### **5.2.1. Subcapa de Convergencia (CS)**

Además de la compresión del encabezado, ésta subcapa también es responsable de la ubicación de las direcciones de la capa superior. Por ejemplo las direcciones IP de las SDUs para identificar las conexiones MAC y PHY en las transmisiones.

La capa MAC de WiMAX es orientada a conexión e identifica una conexión lógica entre BS y MS a través de un identificador de conexión unidireccional (CID). Los CIDs son diferentes tanto para UL como para DL. Un CID debe ser visto como una dirección temporal y dinámica de capa 2 asignada por la BS para identificar la conexión unidireccional existente con una MS. Un CID contiene datos para el control del tráfico.

Con el objetivo de darle al CID información de las direcciones de las capas superiores, la subcapa de convergencia necesita tener seguimiento entre la dirección de destino y su respectiva dirección CID. De este modo, cada SDU que se destine a una dirección específica puede que sea enviado sobre distintas conexiones dependiendo de sus requerimientos de QoS. Finalmente es la subcapa de convergencia que determina el CID apropiado.

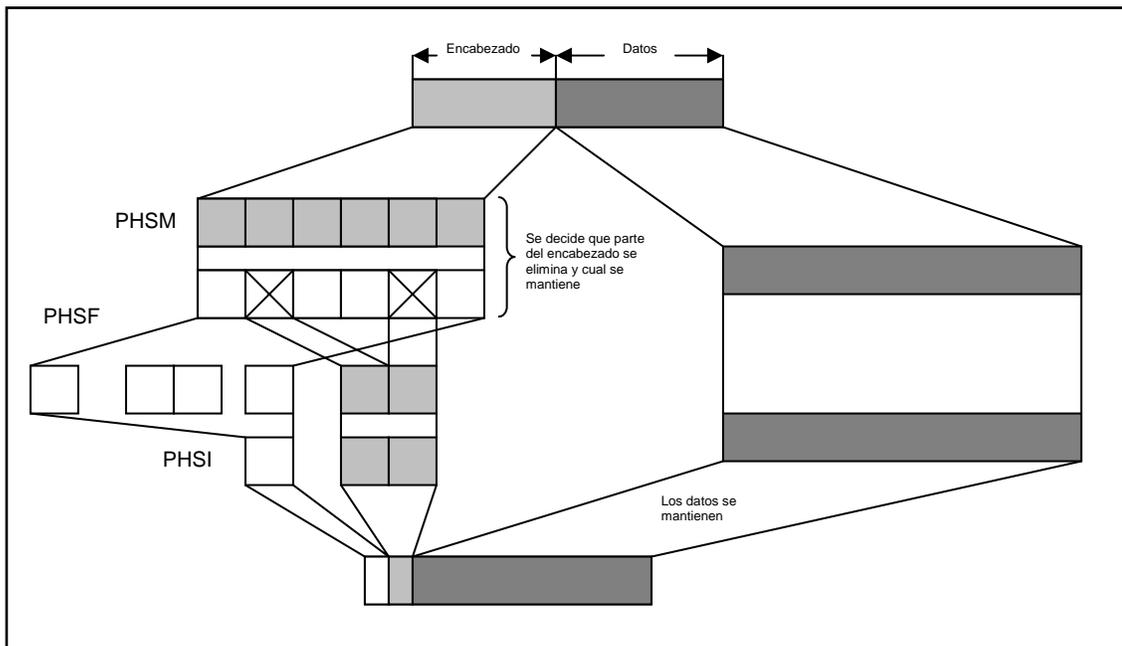
#### *Supresión del encabezado del paquete*

Una de las tareas más importantes de la CS es eliminar el encabezado del paquete (PHS). En el transmisor esto implica eliminar la parte repetitiva del encabezado de cada SDU. De forma similar, en el receptor, la parte repetitiva del encabezado puede ser reinsertada antes que sea enviado a las capas superiores. El

protocolo PHS establece y mantiene el grado de sincronización entre la subcapa de convergencia en el transmisor y el receptor.

En WiMAX la implementación de PHS es opcional; sin embargo, para éste proyecto se torna vital debido a que la PHS mejora la eficiencia de la red para ofrecer servicios como VoIP.

En la figura 5.10 se muestra la operación básica de supresión de encabezado en WiMAX.



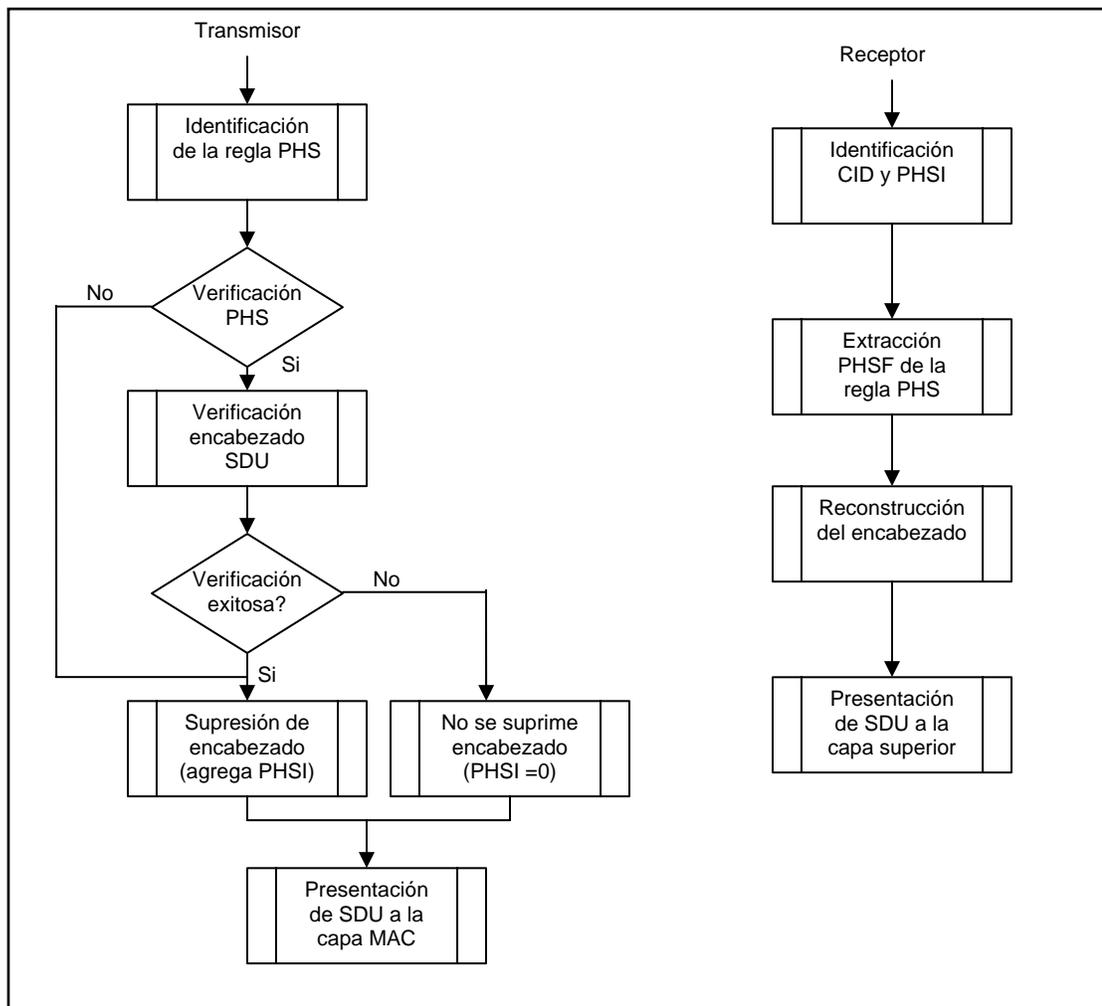
**Figura 5.10** Proceso de supresión del encabezado en la red WiMAX

El funcionamiento de la supresión del encabezado se puede sintetizar en los siguientes pasos:

- Cuando un SDU llega, la CS determina si existe una regla de PHS previamente definida para ese SDU.
- Si esto sucede, la CS determina qué parte del encabezado no debe ser suprimida mediante la utilización de una máscara PHS (PHSM).

- La porción del encabezado que será eliminada se denomina campo PHS o PHSF.
- En dado caso se esté utilizando una regla PHS entonces se compara el PHSF con lo que establece la regla PHS.
- Si ambos campos (PHSF con lo que determina la regla PHS) entonces se elimina el campo PHSF y se establece como índice PSH o PHSI lo que determina la regla PHS.
- Si no coinciden, PHSI toma el valor de 0.

A continuación en la figura 5.11 se muestra un diagrama de flujo del proceso anterior.



**Figura 5.11** Diagrama de flujo del proceso de supresión del encabezado en la red WiMAX

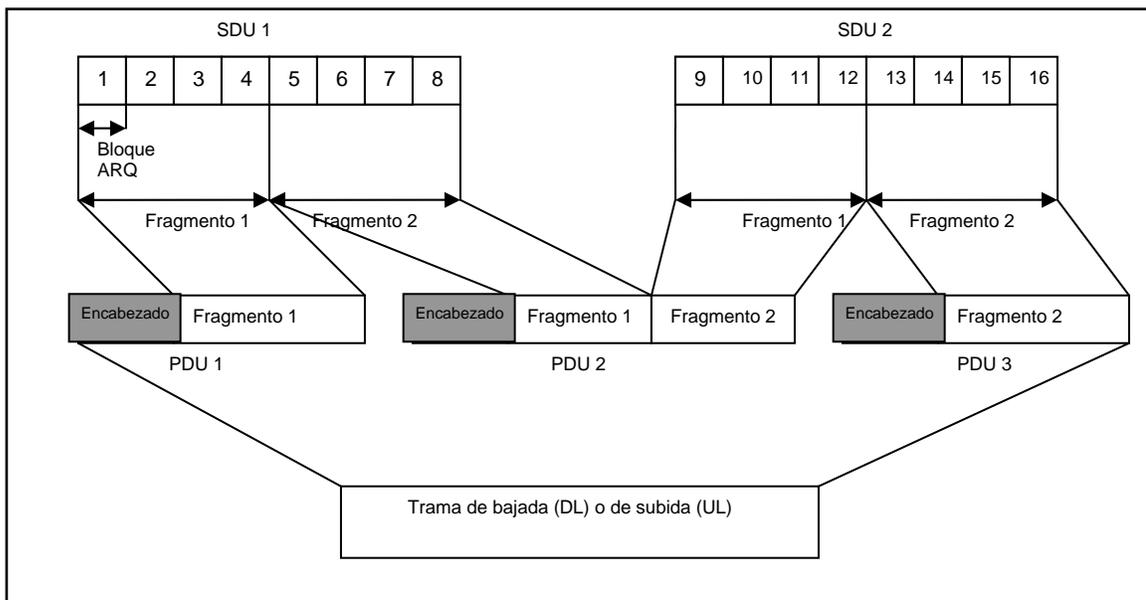
### 5.2.2. Subcapa Común

Esta subcapa es la encargada de la construcción y transmisión de los PDU MAC. Con esto llevar a cabo tareas como la planificación de las transmisiones, la distribución del ancho de banda, modulación y la selección de la tasa de codificación.

Los SDUs que lleguen a ésta subcapa sirven para la creación de los PDUs de la capa MAC. Basándose en el tamaño, múltiples SDUs pueden unirse para formar un solo PDU; o de lo contrario, un solo SDU puede ser fragmentado para distribuirse en varios PDUs.

Cuando un PDU es fragmentado, cada sección del fragmento es etiquetado por un número secuencial; de este modo, el receptor puede obtener la información en el orden correcto.

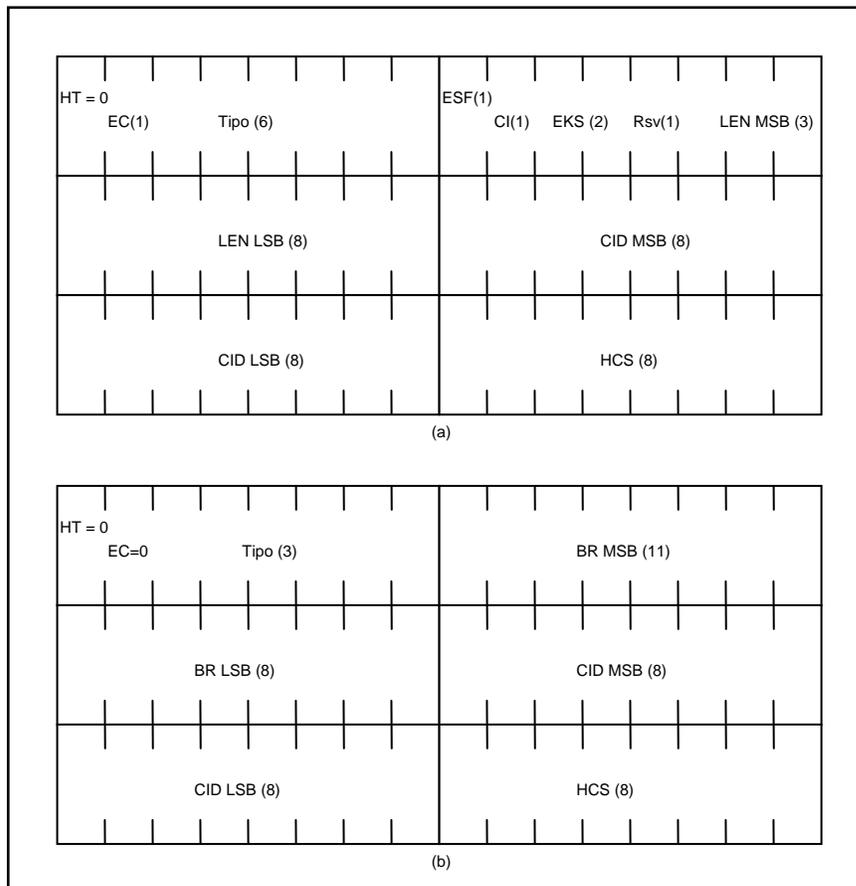
Con el objetivo de utilizar eficientemente los recursos de la capa física, PDUs que han sido destinados al mismo receptor pueden ser concatenados para transmitirse en una misma transmisión. Este proceso se muestra a continuación en la figura 5.12.<sup>10</sup>



**Figura 5.12** Proceso de creación de PDUs MAC

En este proyecto se definen dos tipos de PDUs: el PDU genérico y el de petición de ancho de banda. Cada uno de éstos tiene una estructura diferente en el encabezado como lo muestra a continuación la figura 5.13.

<sup>10</sup> Andrews, J. Ghosh, A. Muhamed, R. Fundamentals of WiMAX. Prentice Hall. Primera Edición 2007.



**Figura 5.13** Encabezados de PDU (a) genérico (b) de petición de ancho de banda

PDU genérico: Utilizado para transportar datos y mensajes propios de la capa MAC. En la figura 5.13 (a) se muestra el encabezado que posee éste tipo de PDU. Además en la tabla 5.2 se muestra la información de cada uno de los elementos del encabezado.

PDU de petición de ancho de banda: Utilizado por la MS para indicar a la BS que es requerido más ancho de banda. Contiene un encabezado y a diferencia del genérico no posee comprobación de redundancia cíclica (CRC). La estructura del

encabezado y la información de los elementos del mismo se muestran en la figura 5.13 (b) y tabla 5.3 respectivamente.<sup>11</sup>

**Tabla 5.2** Campos del encabezado PDU genérico

<b>Campo</b>	<b>Tamaño (bits)</b>	<b>Descripción</b>
HT	1	Tipo del encabezado (Igual 0 para los tipos vistos)
EC	1	Control de encriptación (0= desactivado; 1 = activado)
Tipo	6	Tipo
ESF	1	Campo del subencabezado (1= subencabezado presente; 0 = no presente)
CI	1	Indicador de comprobación de redundancia cíclica (1= CRC activa; 0= CRC desactivada)
EKS	2	Secuencia utilizada para la encriptación
Rsv	1	Reservado
LEN	11	Tamaño en bytes de un PDU MAC, incluyendo encabezado
CID	16	Identificador de la conexión (a donde se enviará la información)
HCS	8	Secuencia de chequeo de encabezado

**Tabla 5.3** Campos del encabezado PDU de petición de ancho de banda

<b>Campo</b>	<b>Tamaño (bits)</b>	<b>Descripción</b>
HT	1	Tipo del encabezado (Igual 0 para los tipos vistos)
EC	1	Control de encriptación (0= desactivado; 1 = activado)
Tipo	6	Tipo
BR	19	Solicitud de ancho de banda (el número de bytes requeridos de ancho de banda)
CID	16	Identificador de la conexión (a donde se enviará la información)
HCS	8	Secuencia de chequeo de encabezado

Además de los encabezados antes mencionados, WiMAX también define cinco tipos de subencabezados que pueden ser utilizados en un PDU genérico:

Subencabezado Mixto: Utilizado después del encabezado genérico para indicar que se está utilizando una red mixta.

Subencabezado de fragmentación: Indica que el SDU fue fragmentado en múltiples PDUs.

<sup>11</sup> IEEE. Standard 802.16-2004. Parte 16: Air Interface for fixed and mobile broadband wireless access systems. Diciembre 2005.

Subencabezado de realimentación: Indica que la MS ofrece realimentación con información del estado del canal.

Subencabezado de administración: Utilizado por la MS para ofrecer varios tipos de mensajes administrativos como peticiones de encuestas y petición extra de ancho de banda.

### **5.2.3. *Petición y distribución del ancho de banda***

Para el enlace de bajada (Downlink, DL), todas las decisiones de distribución de ancho de banda son tomadas por la estación base (BS) de acuerdo al identificador de conexión (CID).

Como todos los PDUs contienen un identificador de conexión, la estación base los ordena según sus requerimientos de calidad de servicio. Una vez que estén ordenados, ésta información se comparte a la estación móvil.

Para el enlace de subida (Uplink, UL), la estación móvil realiza peticiones de recursos a través de peticiones de ancho de banda. Esto lo hace mediante un PDU genérico conteniendo un subencabezado de administración.

Cuando la BS recibe una petición de incremento de ancho de banda de una MS, agrega la cantidad de banda solicitada. En dado caso que no exista ancho de banda disponible para ofrecer, se lleva a cabo un proceso de encuesta. Para evitar cualquier tipo de tráfico o colisión, solo se toman en cuenta a las estaciones móviles utilizando un ancho de banda considerable.

De esta forma se busca entonces liberar el ancho de banda de alguna estación móvil para transferírselo a otra. Si aún no existe ancho de banda disponible entonces se repite el proceso. El número de intentos permitidos es definido por el fabricante o por el proveedor de servicio.

#### **5.2.4. Calidad de servicio (QoS)**

Una de las funciones claves de la capa MAC de WiMAX es asegurar que los requerimientos de QoS que solicitan los PDUs MAC sean reales. Esto implica que deben de conocerse muy bien los factores que pueden perjudicar la calidad de servicio de la conexión como por ejemplo: latencia, tasa de transferencia de datos, tasa de error de paquetes y la disponibilidad del sistema.

Debido a que los requisitos de calidad de servicio son muy distintos, WiMAX ha definido varios mecanismos que permiten definir cada uno de los servicios que requieren de una calidad especial.

##### *Planificación de servicios*

La capa MAC de WiMAX utiliza un servicio de planificación para clasificar cada tipo de servicio de acorde a su necesidad de ancho de banda y calidad en general. Un servicio de planificación únicamente sirve para definirle a la red el método a emplear de transmisión considerando el tipo de servicio. WiMAX define cinco servicios de planificación; éstos son:

1. Autorización de servicio no solicitado (UGS): Diseñado para soportar servicios en tiempo real como VoIP.
2. Servicio de sondeo en tiempo real (rtPS): Diseñado para soportar servicios en tiempo real que requieren paquetes de información de tamaño variable como por ejemplo video MPEG.
3. Servicio de sondeo en tiempo no real (nrtPS): Similar al rtPS sin embargo, por ser un servicio en tiempo no real, contiene retrasos de algunos segundos en cuanto a su respuesta.
4. Servicio de mejor esfuerzo (BE): Provee un pequeño soporte de QoS a aquellas aplicaciones que no tienen requisitos estrictos de calidad de servicio.
5. Servicio de sondeo extendido en tiempo real (ertPS): Es un nuevo servicio de planificación introducido por la IEEE 802.16e para lograr la eficiencia de UGS

y rtPS. Este servicio tiene la ventaja de trabajar con servicios de datos que poseen requisitos de ancho de banda variantes con el tiempo.

### *Flujo de servicios y operaciones de QoS*

En WiMAX, un flujo de servicio es un servicio de transporte que provee la capa MAC para el tráfico de transmisión tanto en DL como en UL. El flujo de servicio es un concepto de suma importancia para la arquitectura de QoS. Cada flujo de servicio tiene asociado un único conjunto de parámetros que el sistema se esfuerza por alcanzar, por ejemplo: latencia y tasa de error de paquetes.

Un flujo de servicio está compuesto por:

- *Identificación del flujo de servicio:* Identificador de 32 bits para el flujo de servicio.
- *Identificación de conexión:* Identificador de 16 bits de la conexión lógica a ser usada. Este CID es análogo al visto en la capa física para identificar a una estación móvil. Una MS puede tener más de un CID, esto es, una CID principal y varios secundarios. La información de la capa MAC se encuentra dentro del CID principal.
- *Conjunto de parámetros de QoS recomendados:* Representan los valores de QoS recomendados por una capa superior.
- *Conjunto de parámetros de QoS admitidos:* Representan los parámetros de QoS para los cuales la estación base y la móvil reservaron sus recursos.
- *Conjunto de parámetros de QoS activos:* Representan los parámetros de QoS activos en un momento dado.
- *Módulo de autorización:* Función lógica de la estación base que aprueba o deniega algún cambio en los parámetros de QoS.

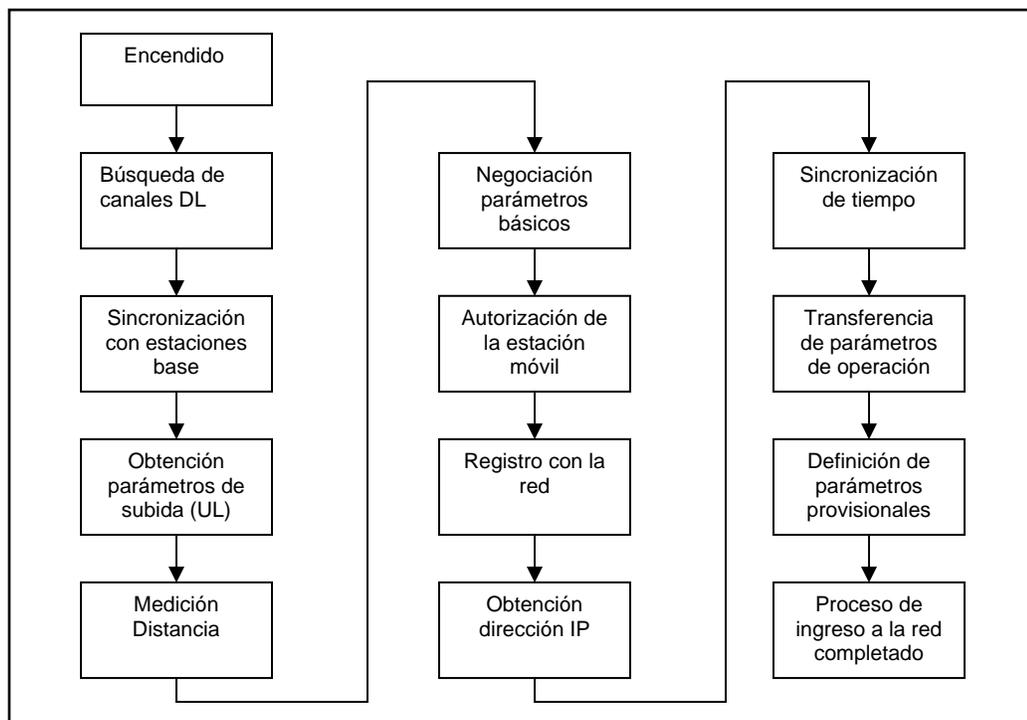
Los flujos de servicios permitidos por una red WiMAX son agrupados en clases; cada una identificada apropiadamente según su tipo de requerimientos de QoS. Este

agrupamiento permite que las capas superiores puedan realizar peticiones de QoS de un modo global en las estaciones base o móviles.

Tanto los flujos de servicios como el concepto de clases, permite flexibilidad para el proveedor de servicio ya que ofrece un alto grado de libertad para administrar la calidad de los servicios según el tipo de aplicación a trabajar.

### 5.2.5. Ingreso a la red e inicialización

Para que una estación móvil pueda tener acceso a la red WiMAX, debe de realizar un proceso que conlleva una serie de pasos. Se muestra en la figura 5.14 el diagrama de flujo detallando cada uno de los pasos necesarios para ingresar a la red WiMAX.



**Figura 5.14** Proceso de inicialización en la red WiMAX

*Búsqueda y sincronización del canal de bajada*

Al encender una MS, debe realizar un escaneo de las frecuencias disponibles en el ambiente. Con esto puede determinar el nivel de cobertura presente de la red WiMAX. Cada MS almacena una lista no volátil con la información de los niveles de cobertura presentes en el pasado. De este modo, lo primero que hace la MS es intentar sincronizarse con alguna de las frecuencias almacenadas en la lista. Si esto falla entonces se realiza una nueva búsqueda e intentar sincronizarse con la BS conveniente. Importante resaltar que ésta lista puede ser modificada por el administrador de la red.

Durante la sincronización, la MS recibe una trama de preámbulo DL. Cuando es recibida correctamente esta trama, se inicia la sincronización tanto en tiempo como en frecuencia con la estación base. Una vez termina ésta sincronía, la estación móvil recibe una serie de mensajes de control para ir obteniendo los parámetros de la capa física y MAC referentes a las transmisiones UL y DL.

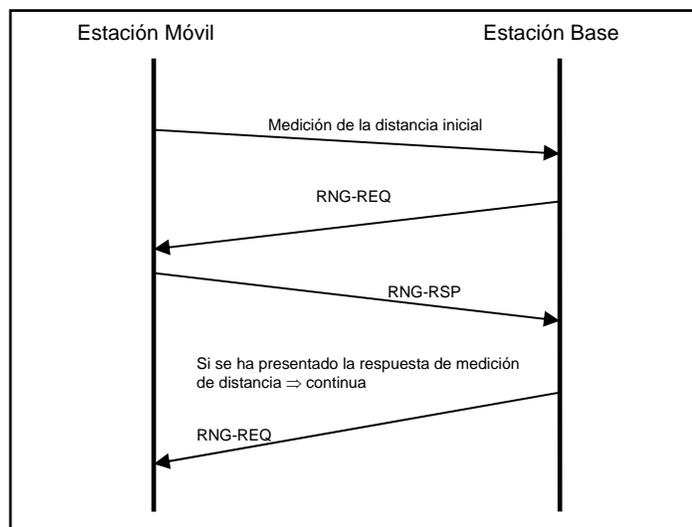
#### *Obtención de los parámetros de subida*

Basándose en los parámetros de UL obtenidos en los mensajes de control, la estación móvil decide si el canal es conveniente para seguir conectado. Si se determina que el canal no es el apropiado, la MS se regresa al primer paso para realizar una nueva búsqueda. Por el contrario, si se establece que el canal es conveniente, la MS recibe un mensaje con información sobre la medición de la distancia entre MS y BS.

#### *Medición de la distancia*

En este paso la MS realiza una medición inicial con la estación base para obtener valores apropiados de tiempo y de nivel de potencia que permitan mantener en buen estado la conexión. Una vez que la conexión es estable, la MS realiza mediciones periódicas para darle el seguimiento apropiado a las fluctuaciones de tiempo y nivel de potencia. Dichas fluctuaciones pueden deberse a la movilidad, debilidad de la señal, atenuación, sombreado o cualquiera de sus combinaciones. El

proceso que se lleva a cabo para la medición de la distancia se muestra a continuación en la figura 5.15.



**Figura 5.15** Proceso de medición de la distancia entre estación móvil y estación base

### *Negociación de las especificaciones básicas*

Una vez que se inició el proceso de medición de distancia, la estación móvil (MS) envía un mensaje SBC-REQ informando a la estación base (BS) sobre el conjunto de especificaciones en la relación BS – MS. A continuación, en la tabla 5.4, se muestran los parámetros relacionados a la capa física que son negociados en esta parte del proceso.<sup>12</sup>

<sup>12</sup> IEEE. Standard 802.16-2004. Parte 16: Air Interface for fixed and mobile broadband wireless access systems. Diciembre 2005.

**Tabla 5.4** Parámetros a negociar entre BS y MS

<b>Parámetros a negociar</b>	<b>Descripción</b>
Diferencia de transmisión	Diferencia entre DL y UL
Maxima potencia de transmisión	Maxima potencia disponible para transmitir
Potencia de transmisión actual	Potencia de transmisión utilizada para el mensaje SBC-REQ
Tamaño de FFT	Tamaño de la transformada rápida de Fourier
Soporte FEC	Modo de FEC soportado
Soporte H-ARQ	Soporte para H-ARQ
Soporte MIMO	Especificación del modo MIMO y codificación espacio/tiempo
Soporte para el sistema de antena	Suporte el sistema de antenas utilizado
Soporte para el control de potencia	Opciones de control de potencia
Soporte para la permutación de subportadora	Soporte para el esquema de permutación utilizado
Soporte TDD o FDD	Soporte para TDD y FDD

#### *Establecimiento de conectividad IP*

Después de haber negociado las especificaciones de transmisión básicas, se debe de registrar la estación móvil en la red. En una red WiMAX registrar significa autorizar a la estación móvil el ingreso a la red y la recepción CIDs secundarios.

El proceso de registro empieza cuando la MS envía un mensaje REG-REQ a la BS. Dicho mensaje contiene un mensaje de autenticación utilizado por la BS para su validación. Inmediatamente después que la BS valida el mensaje recibido, se envía un mensaje REG-RSP conteniendo un CID secundario.

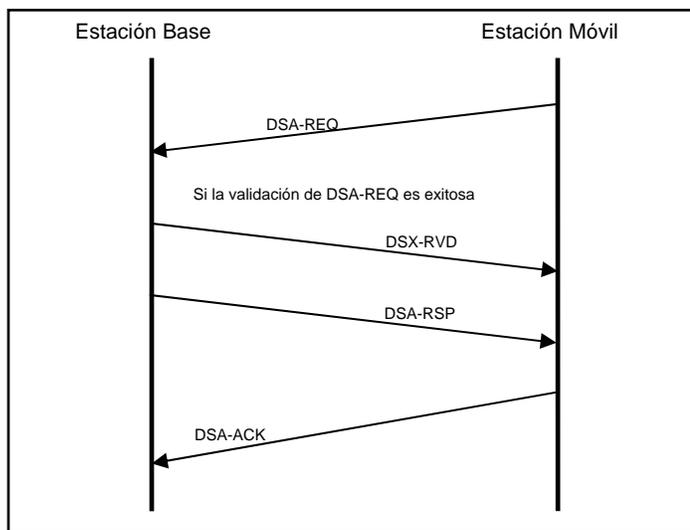
En el mensaje REG-REQ también se envía información a la BS sobre la versión soportada IP, la subcapa de convergencia soportada y la ARQ permitida. En dado caso que sea omitido esta información en el mensaje REG-REQ, la estación base asume que la MS únicamente puede soportar IPv4.

Después que la MS recibe el mensaje REG-RSP, se utiliza DHCP para obtener su dirección IP.

#### *Establecimiento del flujo de servicio*

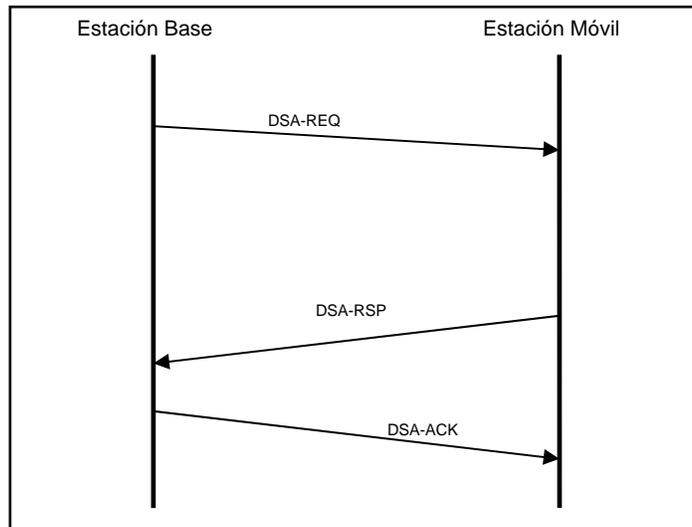
La creación del flujo de servicio puede ser iniciado tanto por la MS como por la BS. Cuando es la MS la que inicia la creación del flujo de servicio, envía un mensaje

DSA-REQ conteniendo el conjunto de parámetros del flujo de servicio. Una vez que la BS recibe el mensaje, valida la información y envía enseguida un mensaje DSX-RVD indicando que se recibió correctamente la petición para establecer el flujo de servicio. Después de esto, la BS crea una nueva identificación de flujo de servicio (SFID) y envía un nuevo mensaje a la MS indicando los parámetros válidos para la QoS. Este proceso se muestra a continuación en la figura 5.16.



**Figura 5.16** Proceso de inicialización del flujo de servicio en la estación móvil

El proceso que se lleva a cabo en caso que fuera la BS que inicia la creación del flujo de servicio se muestra a continuación en la figura 5.17.



**Figura 5.17** Proceso de inicialización del flujo de servicio en la estación base

### **5.2.6. Operaciones para el ahorro de energía**

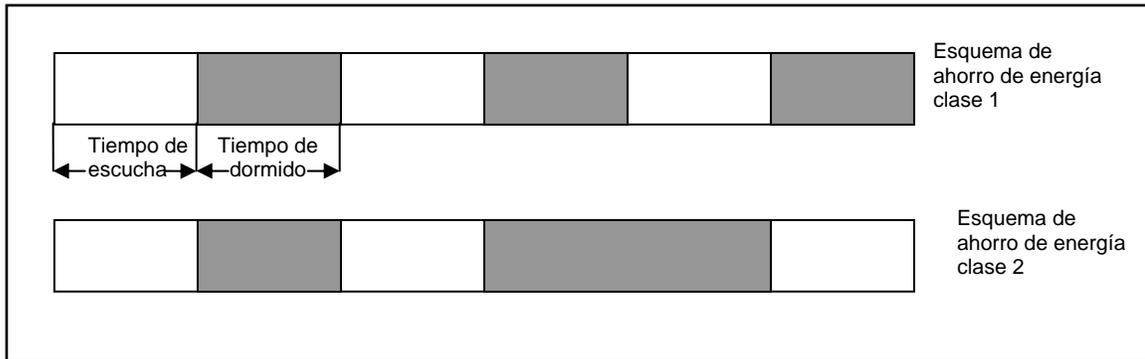
El estándar IEEE 802.16e-2005 introduce nuevos conceptos relacionados a la administración de la movilidad y la administración de la energía. Aunque muchas veces estos factores se encuentran muy relacionados, son conceptualmente distintos. La administración de la energía hace referencia a la conservación de la vida de los recursos de batería de la MS. Por otro lado, la administración de la movilidad se refiere a la propiedad de la MS de mantener activa la conectividad a la red a pesar del desplazamiento dentro del área de cobertura.

En esta sección se explican los criterios de diseño considerados para la red en lo que refiere al ahorro de la energía. Más adelante se hace para la movilidad.

#### *Modo dormido*

El modo dormido es una operación opcional en una red WiMAX. Una estación móvil negocia, a través de CIDs, con la estación base para interrumpir su conexión por un tiempo predeterminado. A este tiempo se le conoce como ventana de dormir. Cada ventana de dormir es seguida por una ventana de escucha mediante la cual la MS reestablece la conexión.

Como se muestra a continuación en la figura 5.18, la estación base entra en una etapa de conexión y desconexión permitiendo el ahorro de energía durante algunos lapsos de tiempo. El tamaño de cada ventana de dormir y de escucha es negociado entre MS y BS dependiendo de la clase de operación establecida.



**Figura 5.18** Esquema de operación modo dormido en IEEE 802.16e-2005

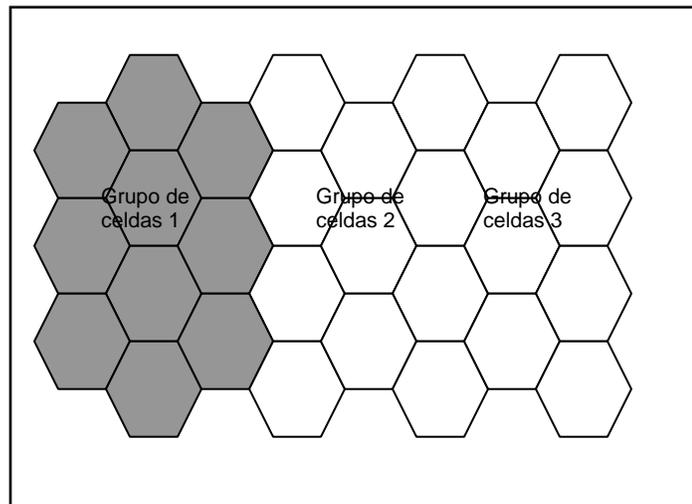
De acuerdo a cada uno de los parámetros, existen tres clases de ahorro de energía:

- **Ahorro de energía clase 1:** En esta clase se va duplicando el tiempo de cada ventana de dormir respecto a su anterior hasta llegar a un límite establecido. La BS debe indicarle a la MS el tamaño inicial y final de la ventana de dormir. En cualquier momento durante el proceso, la BS tiene la autorización para resetear el tamaño de la ventana de dormir al inicio; el proceso entonces se repite.
- **Ahorro de energía clase 2:** En esta clase tanto la ventana de dormir como la de escucha tienen el mismo tamaño. Al igual que en la clase anterior, es la BS la que debe indicarle a la MS el tamaño definido para el tamaño de las ventanas.
- **Ahorro de energía clase 3:** Al contrario de las clases anteriores, esta clase consiste únicamente de una ventana de dormir. El momento de inicio y el tamaño de la ventana son determinadas por la BS antes de activar éste modo. Al finalizar la ventana, la operación de ahorro de energía se inactiva.

### *Modo inactivo*

El modo inactivo es una mecanismo que permite a la MS recibir transmisiones DL de la BS sin necesidad de registrarse a la red. Esta operación también es opcional para una red WiMAX, sin embargo representa una ayuda muy importante para eliminar la necesidad de realizar conmutación de celdas. Es decir, si no existe una conexión activa, con este mecanismo se puede evitar la necesidad de realizar el switcheo de celdas.

Para la operación de modo inactivo, se asignan un grupo de estaciones base para formar grupos de celdas como se muestra en la figura 5.19.



**Figura 5.19** Ejemplo de agrupación de celdas

Una MS monitorea periódicamente las transmisiones de la red para determinar el grupo de celdas activo según su ubicación. Si se detecta que la MS se ha desplazado al territorio de otro grupo de celdas, se realiza una actualización en cuanto al grupo de celdas activo. Sin el concepto de grupo de celdas, una MS debería de buscar conexión a través de todas las BSs de la red.

#### **5.2.7. Administración de la movilidad**

En una red WiMAX, al igual que en cualquier otra red celular, el proceso de switcheo requiere soporte de las capas 1, 2 y 3 de la red. A pesar que la decisión

final de éste proceso la determina la capa 3, la capa física y MAC juegan un papel crucial suministrando información importante para la ejecución de la capa 3.

Para tomar en cuenta el ambiente de radio frecuencia, cada BS asigna un tiempo a cada MS para monitorear y medir las condiciones de radio de las BSs vecinas. Este proceso es llamado escaneo y el tiempo asignado a cada MS es el intervalo de escaneo. Este proceso se lleva a cabo mediante el intercambio de mensajes de peticiones y respuestas.

Durante éste proceso la MS mide la fuerza de la señal recibida (RSSI) y la relación señal a ruido (SINR) de las estaciones base vecinas. Existen tres niveles de asociación posibles para el proceso de escaneo:

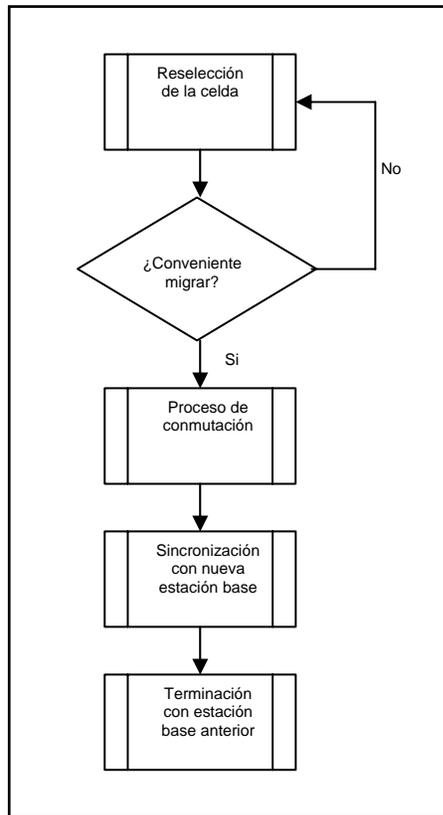
1. Nivel de asociación 0 (escaneo sin coordinación): Durante este nivel la MS actúa midiendo la distancia con su BS sin tener la coordinación de la red. Cuando ya se tiene información de distancia con una BS, la MS recibe un mensaje indicando el éxito de la operación.
2. Nivel de asociación 1 (escaneo con coordinación): En este nivel la BS coordina el procedimiento de asociación con sus BSs vecinas. La red provee para cada MS un código de escaneo y un intervalo de transmisión con las BSs. Cuando ya se tiene información de distancia con una BS, la MS recibe un mensaje indicando el éxito de la operación.
3. Nivel de asociación 2 (reporte asistido de red): Este nivel es similar al nivel 1 excepto que después que se tiene información de distancia entre una MS y una BS, la MS no necesita esperar por un mensaje de respuesta. En su lugar el mensaje es enviado a la BS activa para que genere un mensaje con el reporte de la información del escaneo realizado.

#### *Proceso de switcheo y selección de celdas*

En WiMAX, el proceso de switcheo de celdas es definido por una serie de pasos y decisiones que habilitan a una MS a migrar de una BS a otra. Las etapas de éste proceso son:

1. Reselección de celda: En esta etapa la MS realiza un escaneo con una o más de las BSs vecinas para determinar si es o no conveniente iniciar el proceso de migración hacia una nueva BS. Después de realizar éste escaneo se regresa a la operación normal con la BS actual.
2. Decisión de switcheo e iniciación: El proceso de switcheo inicia una vez se haya tomado la decisión que es conveniente migrar a una nueva BS. Esta decisión puede ser tomada tanto por la BS, por la MS o por el administrador de la red. El proceso de iniciación se lleva mediante el envío de mensajes petición/respuesta por parte de la BS y la MS.
3. Sincronización con la BS: Una vez que el objetivo ha sido determinado, la MS necesita sincronizarse con la BS elegida. La MS procesa la trama de preámbulo DL de la BS. Esta trama contiene información de tiempo y de frecuencia para que la MS puede sincronizarse apropiadamente. Además se comparte a la MS información importante sobre el canal que posee la BS.
4. Medición de la distancia con la BS: La MS utiliza la medición del canal para iniciar la sincronización de la transmisión UL con la BS y obtener información sobre el nivel de potencia inicial y la medición de la distancia.
5. Terminación con la BS anterior: Después de haber establecido conexión con una nueva BS, la MS puede decidir terminar la conexión con la BS previa mediante el envío de un mensaje. Una vez que la BS reciba el mensaje se activa un tiempo de espera para asegurar que todas las actividades que se hayan estado realizando terminen. Una vez que este tiempo de espera termina, la BS da por terminada cualquier tipo de relación con la MS en cuestión y se asume que el proceso ha sido completado.

A continuación se muestra, en la figura 5.20, un diagrama de flujo detallando el proceso anterior.



**Figura 5.20** Diagrama de flujo del proceso de conmutación de celdas

### **5.3 Capa de Red**

Una vez especificado el diseño a considerar en la capa física y la de enlace (MAC), se hace necesario definir la capa de red. Este apartado se centrará entonces, en la arquitectura de red de WiMAX. Uno de los aspectos más sobresalientes de una red WiMAX es la interoperabilidad que permite para los dispositivos de distintos fabricantes. Esta interoperabilidad se hará notar de manera importante en el diseño de ésta capa; por tal motivo, las especificaciones dadas en este apartado serán de un modo muy general y se puedan adaptar a cualquier tipo de implementación.

A pesar que el estándar IEEE 802.16e-2005 define ciertos parámetros para el funcionamiento de la capa de red; el foro de WiMAX (WiMAX Forum's Network Working Group) ha desarrollado un conjunto de estándares precisamente buscando la interoperabilidad del sistema.

Para éste proyecto, es importante considerar para la capa de red 3 etapas:

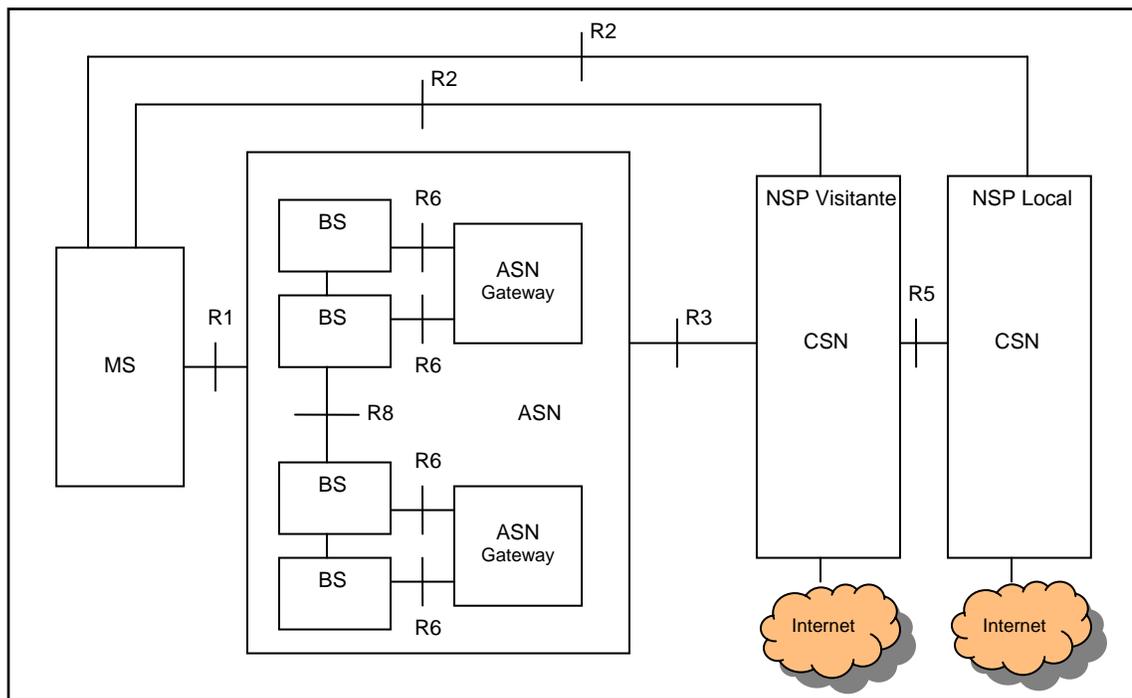
1. Se determinan los escenarios y los servicios a desarrollar.
2. Se determina la arquitectura necesaria para implementar los servicios establecidos.
3. Se determinan los protocolos para la arquitectura de red.

El punto 1 ya fue tratado en los apartados anteriores pues se establecieron los servicios que se requieren en para el proyecto. Los escenarios quedarán expuestos más adelante cuando se entre a la etapa de simulaciones. El punto 2 y el 3 serán el fuerte de éste apartado. Para el punto 2 se analizará el modelo de red definido para el proyecto. Enseguida se verán los protocolos a considerar a lo largo de la red WiMAX (punto 3).

### **5.3.1. Modelo de red**

En la figura 5.21 se muestra el modelo de red definido para el proyecto; el mismo es una representación lógica de la arquitectura de red. En la figura se identifican bloques funcionales que, por su estructura, permiten la interoperabilidad de la red. El modelo se divide en 3 partes lógicas:

- Las estaciones móviles utilizadas por el suscriptor del servicio para ofrecer conectividad.
- La red de acceso al servicio (ASN) que consta de las estaciones base y de las puertas de acceso (gateway) ASN.
- La red de conectividad al servicio (CSN).



**Figura 5.21** Modelo de red para el proyecto

Las funciones de las estaciones móviles son conocidas. Las funciones de la ASN y de la CSN se detallan a continuación:

#### *Red de acceso al servicio (ASN)*

El funcionamiento de la red de acceso al servicio busca cumplir con las siguientes funciones:

- Ofrecer conectividad de capa 2 a las estaciones móviles.
- Identificar y seleccionar el suscriptor de red
- Permitir la transferencia de dispositivos, usuarios y credenciales de servicio
- Soporte para la conectividad IP entre la estación móvil y la CSN.

- Administración de los recursos de radio en base las políticas de QoS establecidas por el proveedor de servicio de red (NSP) o por el proveedor de aplicaciones (ASP).
- Soporte para la conmutación de celdas,

Como se aprecia en la figura 5.21, la ASN se divide en dos partes claramente identificadas: las estaciones base y las puertas de acceso ASN.

La estación base representa un sector con una frecuencia asignada a implementar para las estaciones móviles. Además se encarga de la distribución y clasificación del tráfico de acorde a las políticas de calidad de servicio; ofrece soporte para los protocolos de comunicación entre las puertas de acceso ASN y las estaciones móviles. Las estaciones móviles sirven de puente para las transmisiones de mensajes autenticación y de encriptación. Como se muestra en la figura 5.21, una estación base puede ser conectada a una o a más puertas de acceso ASN,

Las puertas de acceso ASN permite la localización de las distintas estaciones base ante la red de conectividad (CSN). De este modo, dentro de las funciones más importantes de las puertas de acceso ASN se encuentran: actuar como servidor para las sesiones de red, controla la admisión a la red, administra mensajes de autenticación, encriptación y autorización para todos los servicios que ofrecen las estaciones base. En resumen, las puertas de acceso ASN realizan tareas administrativas y controlan todo tipo de mensajes entre la etapa CSN y las estaciones base.

### Red de conectividad al servicio (CSN)

El funcionamiento de la red de conectividad al servicio busca cumplir con las siguientes funciones:

- Distribución de las direcciones IP de las estaciones móviles
- Establece la política de calidad de servicio.
- Funciona como servidor para la autenticación y autorización de los servicios establecidos.
- Establece las políticas de control para todo tipo de servicio que ofrece la red.

En resumen, la red de conectividad al servicio (CSN) funciona como un administrador de todas las tareas y servicios que ofrece la red ante la ASN y las estaciones móviles. Como se muestra en la figura 5.21, la CSN tiene relación directa con la ASN como con las estaciones móviles.

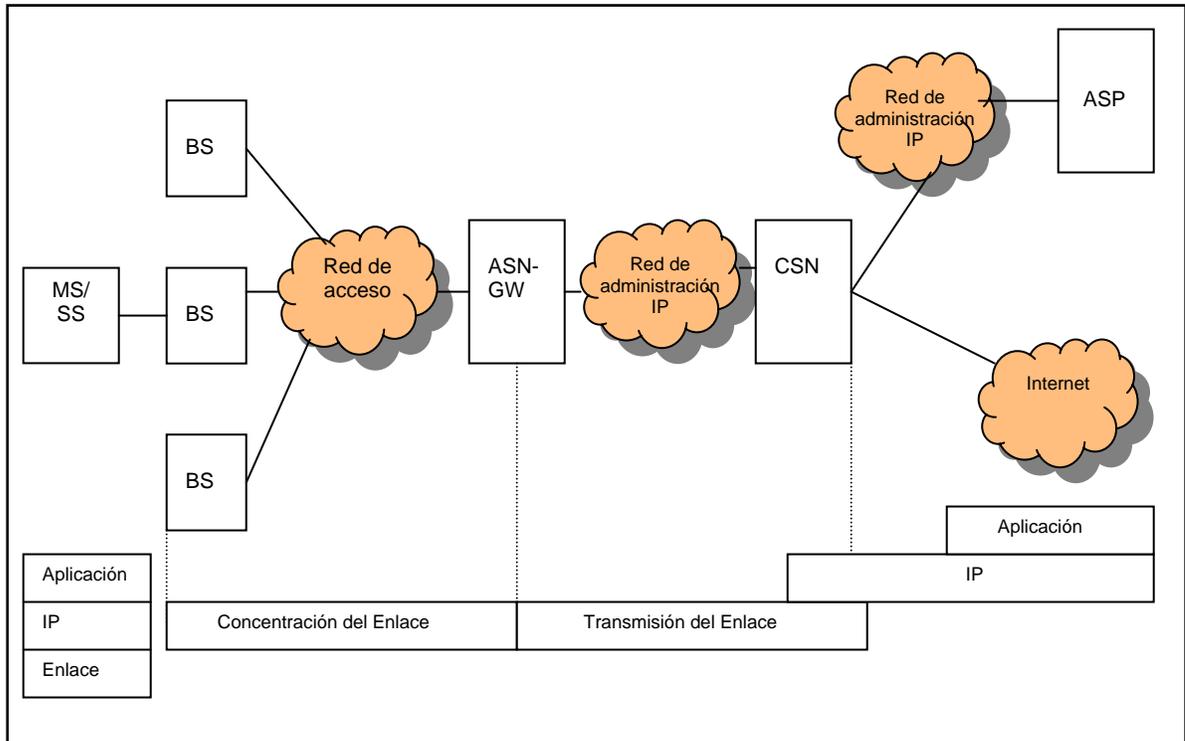
En la tabla 5.5, a continuación se explica cada uno de los enlaces que se encuentran en la figura 5.21.

**Tabla 5.5** Esquemas de permutación de subportadora en WiMAX

Punto de referencia	Puntos de enlace	Descripción
R1	MS y ASN	Enlace representado por la interfaz de aire.
R2	MS y CSN	Enlace dedicado a la autenticación, autorización y configuración IP,
R3	ASN y CSN	Enlace que presta soporte al establecimiento de las políticas de servicio y de administración de la movilidad.
R4	ASN y ASN	Enlace dedicado a coordinar la movilidad de MS's entre ASN's.
R5	CSN y CSN	Enlace que permite la interoperabilidad de redes CSN's (locales como visitantes)
R6	BS y ASN-GW	Enlace que soporta la comunicación entre ANS y BS como el entunelamiento de la información para su correcta transmisión.
R7	ASN-GW-DP y ASN-GW-EP	Enlace que ofrece un soporte extra para el enlace R6 ya que a través de R7 se relacionan los subtipos de gateways existentes.
R8	BS y BS	Enlace dedicado a la comunicación entre estaciones base para permitir una rápida conmutación de celdas.

### 5.3.2. Protocolos de red

En esta sección se analizan los protocolos necesarios para el modelo de red. La arquitectura de red mostrada en la figura 5.21 puede dibujarse de modo que permita visualizar el funcionamiento con cada una de las capas implicadas en los protocolos. Se muestra la arquitectura de red, desde esta perspectiva, a continuación en la figura 5.22.



**Figura 5.22** Representación lógica de la arquitectura final de la red WiMAX

La arquitectura mostrada en la figura 5.23 es muy similar a la mayoría de redes de acceso IP donde la infraestructura de la capa de enlace se utiliza para concentrar el tráfico de cada uno de los usuarios. Se muestra también que el direccionamiento IP y el acceso a las aplicaciones IP son llevadas a cabo por separado.

A continuación se detallan los protocolos de comunicación establecidos para cada una de las características de red como lo son:

- Protocolos para el direccionamiento IP
- Protocolos para la seguridad de la red
- Protocolos para la política de calidad de servicio (QoS)
- Protocolos para la administración de la movilidad
- Protocolos para la administración de los recursos de radio

### *Protocolo para el direccionamiento IP*

El protocolo DHCP (del inglés dynamic host control protocol) es el utilizado en la red WiMAX como mecanismo primario de distribución IP en las estaciones móviles. De forma alternativa, la red de conectividad al servicio (CSN) puede distribuir las direcciones IP a través de mensajes de autorización y autenticación (mensajes AAA).

El protocolo DHCP funciona sobre un servidor central que asigna las direcciones IP a todas las estaciones de la red WiMAX. La utilización de éste protocolo reduce el trabajo del administrador para establecer la configuración de direcciones IP, máscaras de subred, puertas de acceso y DNS. Un servidor DHCP se mantiene a la escucha de peticiones broadcast DHCP; cuando una de estas peticiones es oída, el servidor responde con una dirección IP y opcionalmente con información adicional.<sup>13</sup>

Existen 3 modos en DHCP para la asignación de direcciones IP:

- Asignación manual:* El administrador configura manualmente las direcciones IP del cliente en el servidor DHCP. Cuando alguna estación de trabajo pide una dirección IP, el servidor se basa en la dirección MAC y procede a asignar la que configuró el administrador.
- Asignación automática:* Al cliente DHCP se le asigna una dirección IP cuando contacta por primera vez con el servidor DHCP. En este método la IP es asignada de forma aleatoria y no es configurada de antemano.

---

<sup>13</sup> <http://www.ordenadores-y-portatiles.com/dhcp.html>

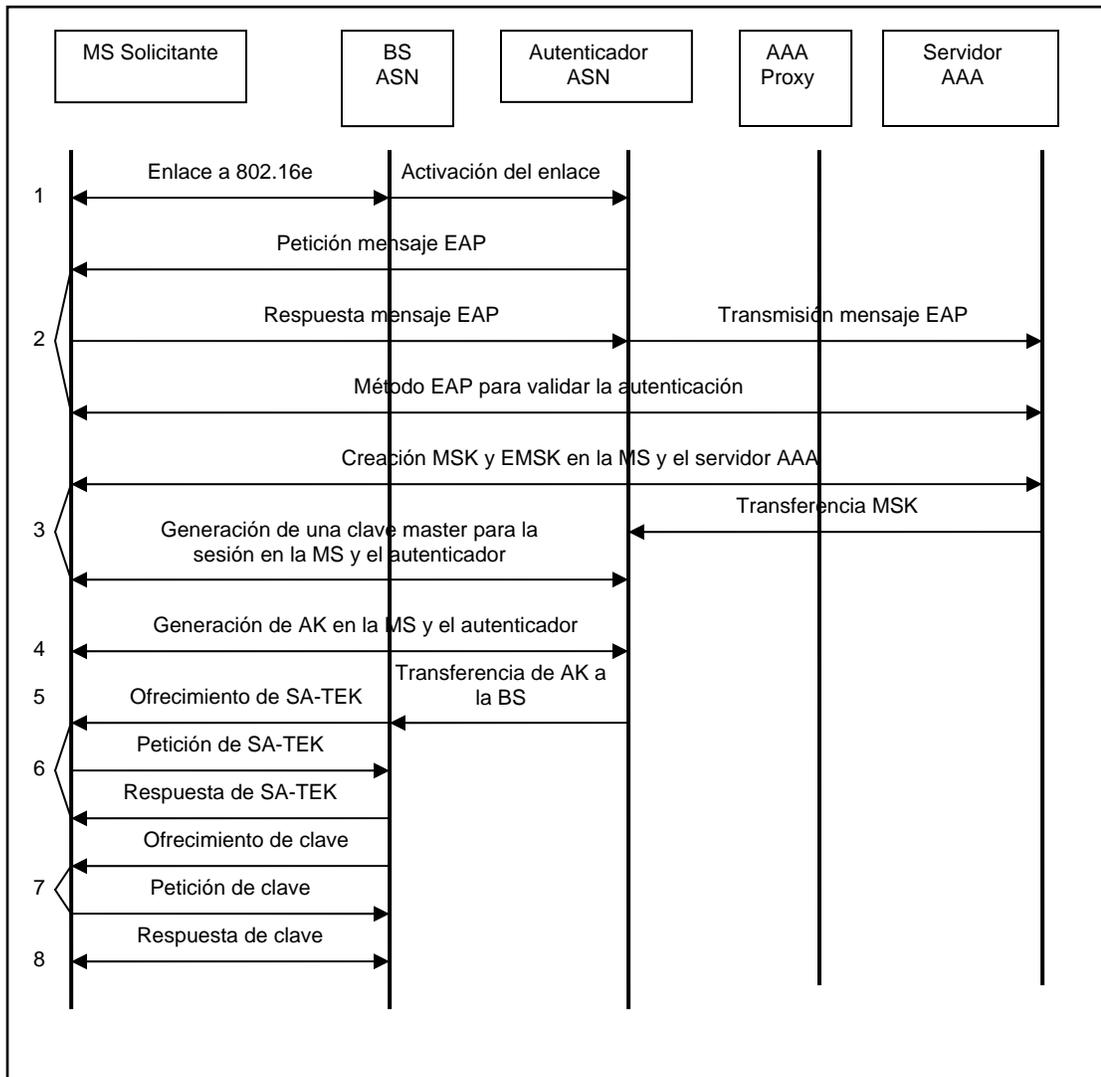
- c. *Asignación dinámica:* El servidor DHCP asigna una dirección IP a un cliente de forma temporal. Cuando este tiempo acaba, la IP es revocada y la estación de trabajo ya no puede funcionar en la red hasta que no solicite una nueva.

#### *Protocolo para la seguridad de la red*

La arquitectura de autenticación y seguridad de WiMAX está diseñada para soportar todos los servicios de seguridad que ofrece el estándar 802.16e-2005. En cuanto a la seguridad de red es vital un protocolo capaz de autenticar todo tipo de acceso a la misma; para esta tarea se contempla la utilización del protocolo PKM (del inglés *privacy and key management*) en su versión 2 (PKMv2). Este protocolo, de la mano del protocolo extensible de autenticación (EAP) se hace cargo de la privacidad de la red WiMAX.

La red WiMAX permite realizar la autenticación considerando tanto el usuario como el dispositivo. El operador será el que finalmente decida el modo de uso, sin embargo es recomendable realizar la autenticación tanto del usuario como del dispositivo.

En la figura 5.23, a continuación, se muestra el procedimiento seguido por el protocolo PKMv2, una vez que una sesión se haya iniciado, para poder establecer un servicio entre la MS y la red WiMAX:



**Figura 5.23** Procedimiento del protocolo PKMv2

Los pasos involucrados en la figura anterior son:

1. Entrada a la red 802.16e y negociación:

Una vez se haya terminado exitosamente el proceso de medición de la distancia, la MS y la ASN negocian las habilidades de seguridad de la red, es decir, las características que poseerá el protocolo PKMv2 para el caso de éste proyecto. Ek inicio de la comunicación del protocolo PKMv2 se lleva a cabo a través de una conversación EAP; de este modo, la MS envía un mensaje PKMv2-EAP de inicio a la ASN. Una vez se establezca el enlace de aire entre

la MS y la BS, un mensaje de activación del enlace es enviado al autenticador para iniciar la secuencia EAP.

2. Intercambio de mensajes EAP:

El intercambio de mensajes EAP empieza con un mensaje EAP de solicitud de identidad generado desde el autenticador, hacia la MS. La MS responde con un mensaje EAP de respuesta al autenticador que traslada ésta información hacia el servidor AAA. De este modo se determina si el proceso de autenticación es o no exitoso.

3. Establecimiento de una sesión master compartida:

Una vez se haya realizado exitosamente el intercambio de mensajes EAP, se crea una clave de sesión master (MSK) y una clave de sesión master mejorada (EMSK). La MSK se envía hacia el autenticador. Por otra parte, la estación móvil y el servidor AAA utilizan la EMSK para generar las claves móviles.

4. Creación de una clave de autenticación:

La estación móvil genera una clave de autenticación (AK) basándose en el algoritmo que especifica el estándar 802.16e-2005.

5. Transferencia de la clave de autenticación:

La AK y su contenido son enviados a través de una entidad distribuidor de claves en el autenticador, hacia la entidad receptora de claves que se encuentra en la estación base.

6. Transferencia de información de seguridad:

La información de seguridad se representa mediante asociaciones de seguridad (SA's) y se comparten entre las MS's y las BS's para dar soporte a las seguridad de la comunicación. Una asociación de seguridad (SA) incluye información como la clave de encriptación de tráfico (TEK) y vectores de inicialización de bloques (CBC). Las SA's se transfieren entre la BS y la MS

mediante un procedimiento de *apretón de manos* de tres vías. Primero, la BS transmite un mensaje de cuestionamiento SA-TEK que define la AK que utilizará la SA. En el segundo paso, la MS transmite un mensaje de solicitud SA-TEK hacia la BS. Este mensaje busca solicitar la autorización para el acceso a la red y el uso de propiedades particulares. Como tercer paso, la BS transmite un mensaje de respuesta SA-TEK especificando los servicios que son permitidos para la MS que realizó la solicitud.

7. Generación y transferencia de las claves de encriptación:

Enseguida del proceso de 3 pasos anterior, la MS solicita a la BS dos claves de encriptación de tráfico (TEK's) por cada asociación de seguridad (SA) enviado. La BS genera aleatoriamente las TEK's y se las envía a la MS.

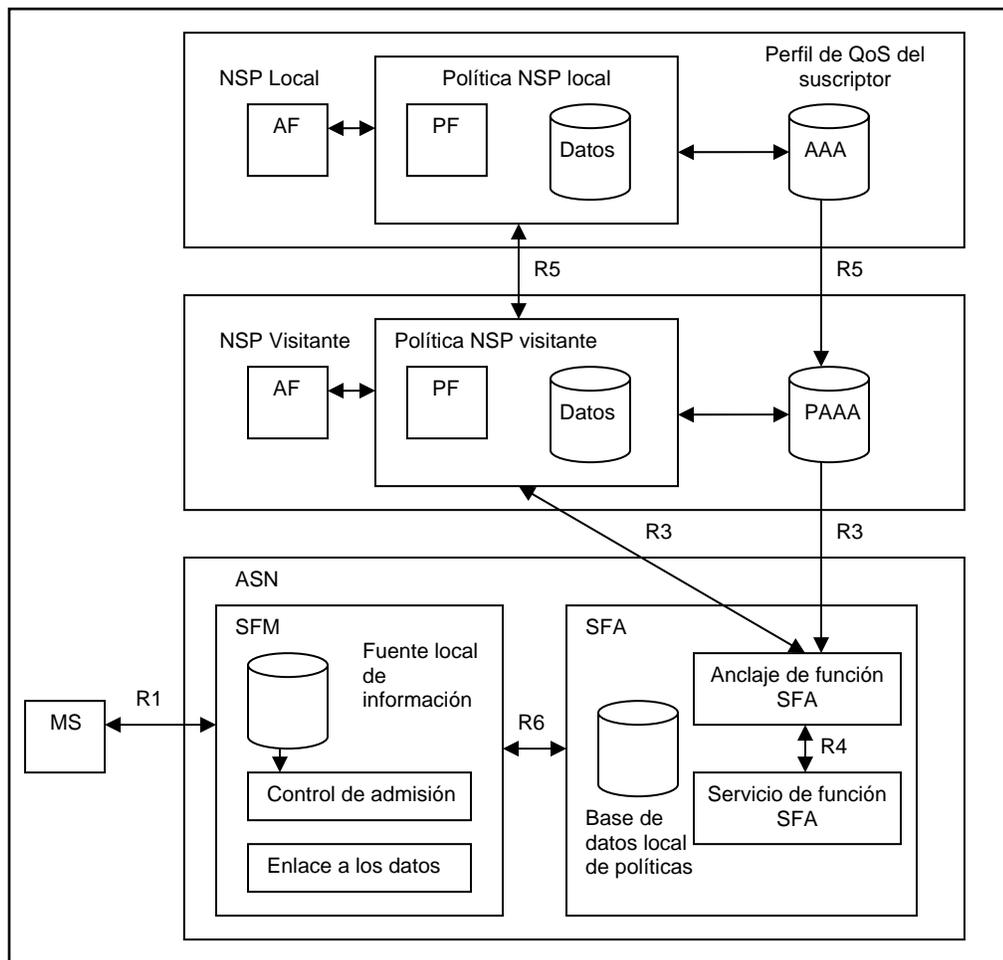
8. Creación del flujo de servicio:

Una vez que las TEK's son satisfactoriamente enviados entre BS-MS, se crean los flujos de servicio.

### *Protocolo para la política de QoS*

La arquitectura para la calidad de servicios (QoS) posee la capacidad de soportar varios servicios IP simultáneamente: distintos niveles de QoS por usuario, control de admisión y administración del ancho de banda.

La estructura QoS de WiMAX soporta tanto flujos de servicios dinámicos como estáticos. En el proyecto se trabaja con flujos de servicios estáticos debido a que la utilización de flujos dinámicos se encuentra en desarrollo actualmente. En la figura 5.24, a continuación, se muestra la arquitectura funcional para la QoS a utilizar.



**Figura 5.24** Arquitectura funcional para la calidad del servicio

Dentro de las entidades funcionales más importantes de la figura anterior se encuentran:

1. Políticas de servicio: La entidad de políticas de servicio (PF) se encuentra dentro de la NSP. Opcionalmente puede estar compuesta por un servidor AAA conteniendo los perfiles e información para las políticas de QoS. Esta entidad es la responsable de evaluar las peticiones de servicio.
2. Servidor AAA: La información de los perfiles de usuarios y reglas para la política de QoS es almacenada en el servidor AAA. Esta información es accedida por medio de una autorización para el flujo de servicio (SFA) que se genera como parte del proceso de inicialización a la red. El servidor AAA

además, puede proveer soporte para la entidad de políticas de servicio (PF) con información sobre los suscriptores o usuarios de la red.

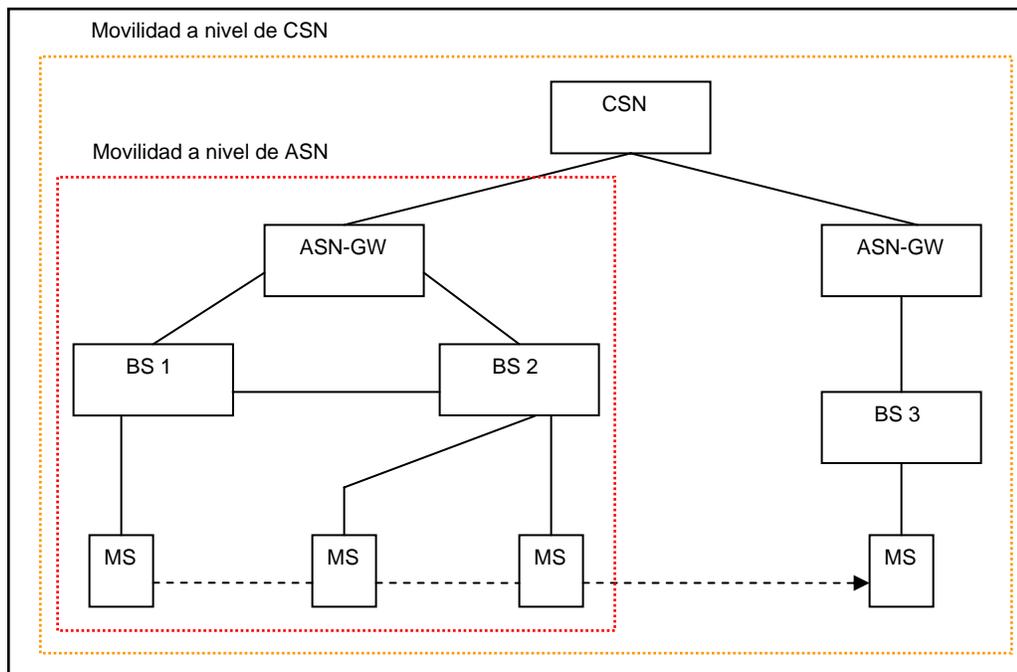
3. Administrador del flujo de servicio: El administrador del flujo de servicio (SFM) es una entidad lógica en la BS responsable de la creación, admisión, activación, modificación y eliminación de los flujos de servicio.
4. Autorización del flujo de servicio: La entidad de autorización del flujo de servicio (SFA) es una entidad lógica que se encuentra en la ASN. Sirve de puente o intermediario entre el SFM y el servidor AAA.

#### *Protocolo para la administración de la movilidad*

La arquitectura para la administración de la movilidad del proyecto está diseñada de modo tal que permita:

- Minimizar la pérdida de paquetes y la latencia generada por la conmutación de celdas incluso al existir moviendo a velocidad vehicular en la MS.
- Complementar la arquitectura de seguridad basándose en el protocolo IETF (Internet Engineering Task Force).
- Minimizar la cantidad de viajes de la señal para ejecutar la conmutación de celdas.
- Mantener el control de conmutación y de enlace como dos controles independientes.
- Soportar distintos tipos de escenarios en los que se pueda desenvolver una MS.
- Permitir a un solo proveedor de acceso de red (NAP) ofrecer el servicio a varias estaciones móviles.

Una red WiMAX está en la capacidad de soportar dos tipos de arquitecturas para la administración de la movilidad: (1) movilidad a nivel de ASN y (2) movilidad a nivel de CSN. En la figura 5.25, a continuación, se muestran ambos casos.



**Figura 5.25** Escenarios soportados por WiMAX para la administración de la movilidad

Para este proyecto, debido a las dimensiones del mismo, se trabaja con la arquitectura de movilidad a nivel de ASN. Este tipo de arquitectura, como se muestra en la figura 5.25, soporta escenarios de conmutación en los cuales una MS se puede desplazar a lo largo de distintas BS's pero sin cambiar su ASN. Esto permite que este tipo de movimiento sea invisible para la CSN evitando conflictos en la capa de red. La implementación de éste tipo de arquitectura no requiere la instalación de algún software adicional en la MS.

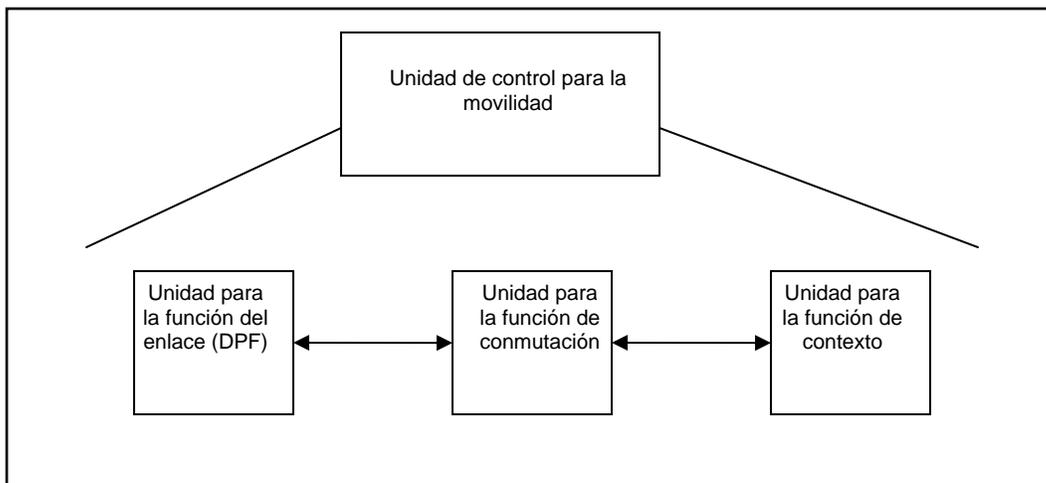
Para la arquitectura elegida para el proyecto sobresalen tres bloques funcionales que conforman la unidad de control para la movilidad:

- Unidad para la función del enlace (DPF): Es la responsable de administrar los enlaces requeridos para la transmisión de paquetes de datos entre todas las entidades funcionales; por ejemplo el enlace entre las BS's y las ASN-GW's (puertas de acceso ASN) necesario para la conmutación.
- Unidad para la función de conmutación: Es la unidad responsable de realizar todo tipo de decisiones referentes a la conmutación de celdas. Esta unidad

permite la conmutación iniciada tanto por el usuario como por la configuración de red.

- Unidad para la función de contexto: Es la unidad encargada del intercambio de mensajes con información del estado de la conmutación. Durante un proceso de conmutación se generan distintos tipos de mensajes que deben enviarse a distintas entidades de red; esta es la tarea que cumple la unidad para la función de contexto.

En la figura 5.26, a continuación, se muestra un diagrama de bloques de la arquitectura para la movilidad.



**Figura 5.26** Diagrama de bloques de la arquitectura para la movilidad

### *Protocolo para la administración de los recursos de radio*

La función del administrador de los recursos de radio (RRM) se resume en maximizar la eficiencia de la utilización de los recursos por parte de la ASN. Dentro de las tareas del RRM se encuentran: (1) obtener mediciones de los recursos de radio presentes en BS's y MS's, (2) reportar éstas mediciones a la base de datos de la red, (3) dar mantenimiento a dichas bases de datos, (4) ofrecer este tipo de información hacia otras entidades de red como por ejemplo al administrador de conmutación y calidad de servicio.

Para el proyecto se ha dividido la arquitectura del RRM en dos bloques funcionales: el agente de recursos de radio (RRA) y el controlador de recursos de radio (RRC).

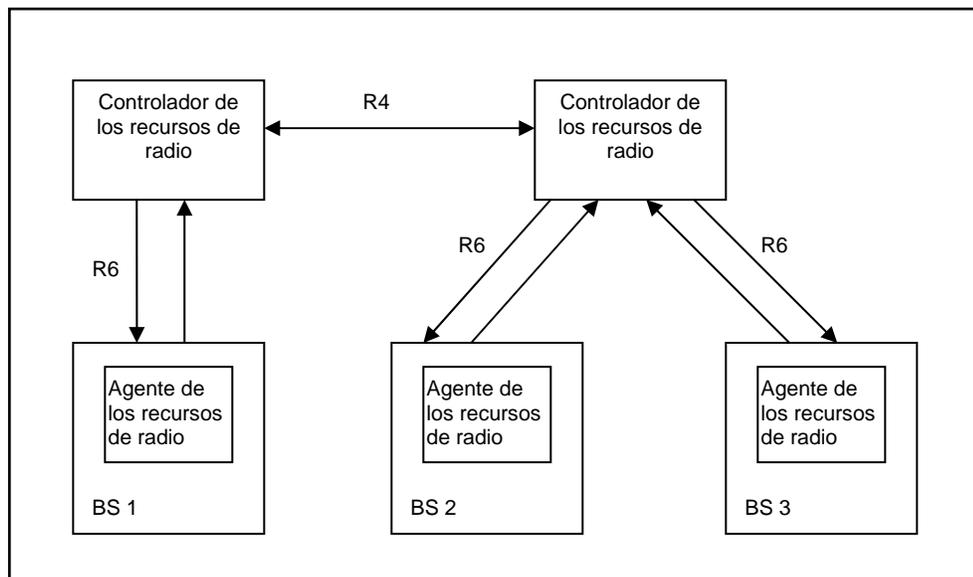
El RRA se encuentra en cada BS y desde ahí recolecta los indicadores de los recursos de radio como por ejemplo la intensidad de la señal ofrecida a las MS's. El RRA también reúne información del RRM como por ejemplo la señal que proporciona alguna BS vecina hacia sus correspondientes MS's.

El RRC es una unidad lógica que puede residir en cada BS o en la puerta de acceso ASN (ASN-GW). Es responsable de recolectar la información de distintas RRA's para mantener una base de datos "regional". Los RRC's se comunican entre ellos como se muestra a continuación en la figura 5.27.

Cada RRA en la BS también es responsable de controlar los recursos de radio basándose en sus propios reportes y los que obtenga del RRC. Dentro de las tareas de control del RRA está el control de potencia, supervisión de la capa física y de enlace, asistencia con la administración del flujo local y la inicialización de la conmutación de celdas.

Como protocolos de comunicación RRC-RRC y RRC-RRA se utilizan mensajes primitivos ya que el objetivo es únicamente un intercambio de reportes. Se trabaja entonces con mensajes de solicitud, respuesta y confirmación.

En la figura 5.27 se muestra el esquema cuando el RRC se encuentra fuera de la estación base.



**Figura 5.27** Esquema para la administración de los recursos de radio

## Capítulo 6: Análisis de resultados

Debido a la naturaleza no lineal de los sistemas y canales inalámbricos, es virtualmente imposible determinar el comportamiento exacto y la capacidad de una red WiMAX. Sin embargo, en ocasiones se utilizan métodos analíticos para determinar la capacidad de un canal. Por otro lado, las simulaciones en computadora pueden representar modelos más complejos para un canal e incorporar imperfecciones en la implementación como degradaciones en el canal y errores por multitrayectorias o pérdidas de camino.

Para este proyecto se trabaja con el software Radio Mobile Deluxe<sup>14</sup> que permite simular una red WiMAX desde dos niveles distintos: por un lado se simula únicamente un enlace de radio mientras que por otro se simula un sistema de red WiMAX con varias estaciones móviles y base.

En la primera sección de este capítulo, se describe la metodología empleada para realizar simulaciones a nivel de enlace en un sistema inalámbrico de banda ancha. En la sección siguiente, se examina el comportamiento de un sistema WiMAX como tal.

### 6.1 Nivel de enlace

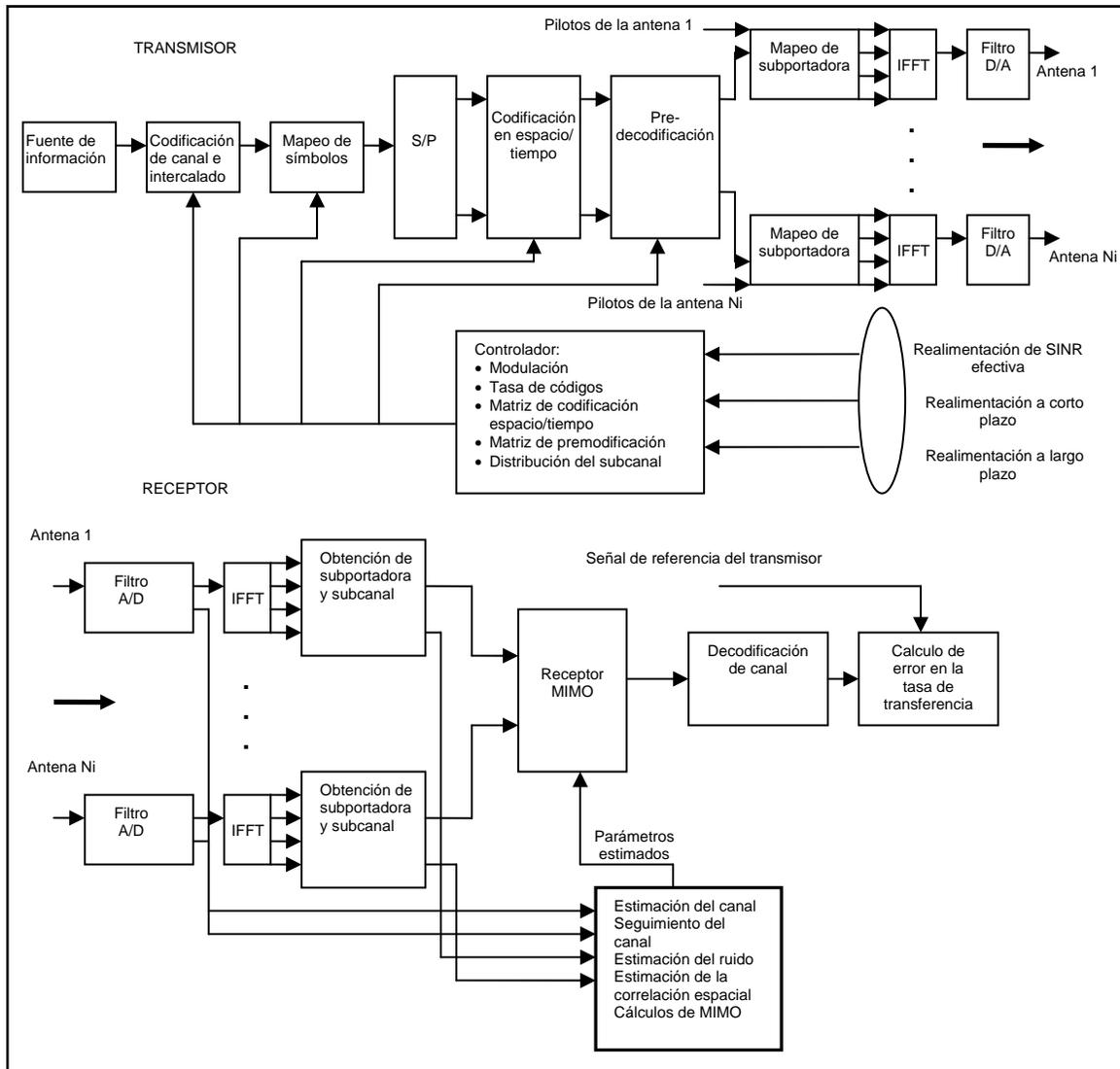
Las simulaciones a nivel de enlace se emplean para estudiar el comportamiento de un enlace de comunicación sencillo funcionando bajo distintas condiciones de canal. A través de los resultados que arrojen las simulaciones se podrán sacar conclusiones importantes en cuanto a las ventajas del diseño de la capa físicas y capa MAC.

Los resultados de las simulaciones en este apartado serán expresados en términos de la tasa de error en los bits (BER) y la tasa de error en los bloques

---

<sup>14</sup> <http://www.cplus.org/rmw/english1.html>

(BLER). A continuación, en la figura 6.1, se muestra el simulador empleado para el nivel de enlace que consta de un transmisor y receptor.



**Figura 6.1** Simulador de la red WiMAX a nivel de enlace

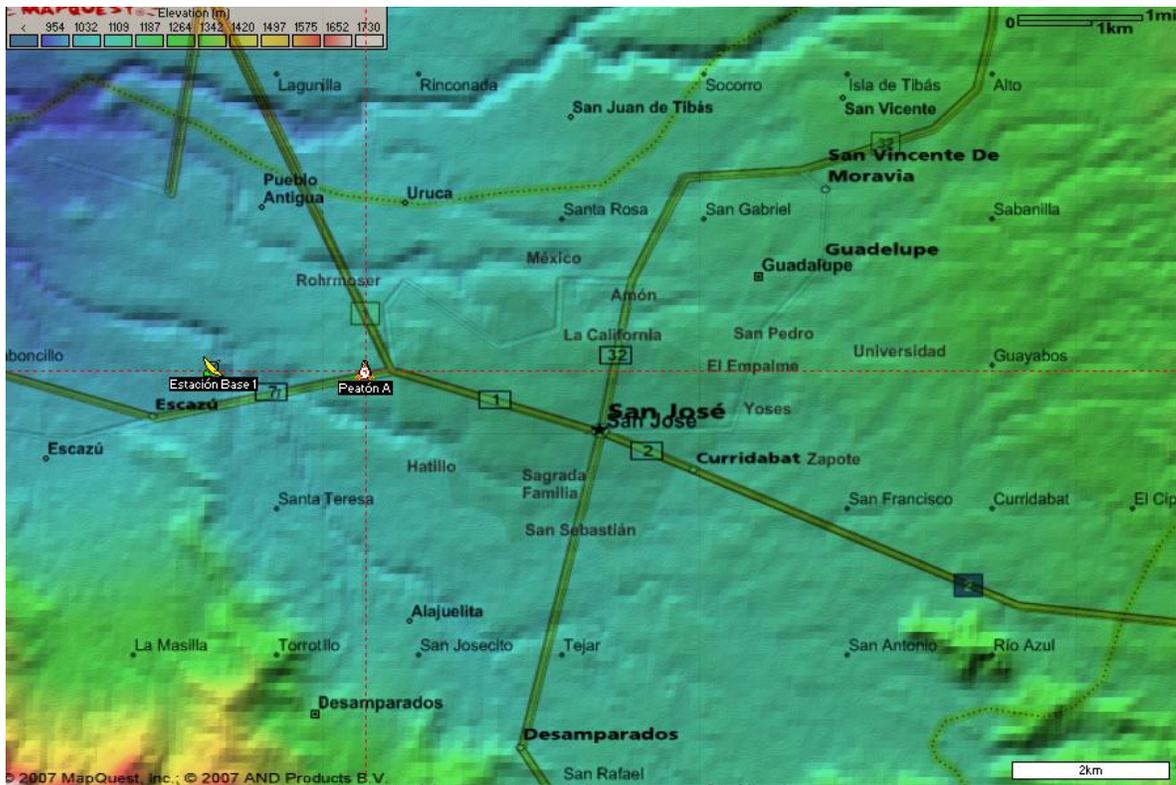
En la tabla 6.1, a continuación, se detallan los parámetros de diseño establecidos para la simulación a nivel de enlace.

**Tabla 6.1** Parámetros de simulación a nivel de enlace para la red WiMAX

<b>Parámetro simulado</b>	<b>Valor Simulado</b>
Ancho de banda del canal	10MHz
Número de subportadoras	1024
Esquema de permutación de subportadora	PUSC y AMC
Tamaño de la trama	5 ms
Esquema de codificación	Convolutional y turbo
Esquema de decodificación	SOVA para códigos convolutionales
Arquitectura Híbrida	Tipo I y tipo II
Número máximo de transmisiones para la arquitectura híbrida	4
Frecuencia portadora	2300MHz
Estaciones móviles	Peatón A, peatón B y Vehículo A
Velocidad de MS's	3km/h para peatón A y B, 30km/h y 120km/h para vehículo A
Correlación en la antena de transmisión	0.5
Correlación en la antena de recepción	0.5
Número de bloques FEC simulados	15000

Fuente: Andrews, J. Ghosh, A. Muhamed, R. Fundamentals of WiMAX. Prentice Hall. Primera Edición 2007.

Como primer simulación se considera oportuno evaluar el comportamiento de un enlace BS-MS en un ambiente WiMAX definiendo los parámetros de la tabla 6.1. Se considera una estación base localizada en Escazú y una estación móvil estática a 2 kilómetros de distancia (ver figura 6.2).



**Figura 6.2** Escenario de simulación Wimax a nivel de enlace

A continuación, en las tablas 6.2 a la 6.5, se muestran los resultados experimentales de relación señal a ruido versus velocidad de conexión obtenida para cada tipo de modulación. En la figura 6.3 se muestran gráficamente los datos obtenidos.

**Tabla 6.2** Comportamiento del enlace en función de SNR para modulación QPSK R1/2

Comportamiento normalizado (bps/Hz)	SNR (dB)
0	0
0.1	0.5
0.25	1
0.75	1.5
0.9	2
0.96	2.5
0.98	3
0.99	3.5
1	4

**Tabla 6.3** Comportamiento del enlace en función de SNR para modulación QPSK R3/4

Comportamiento normalizado (bps/Hz)	SNR (dB)
0	2
0	2.5
0	3
0.1	3.5
0.45	4
1	4.5
1.5	5
1.6	5.5
1.62	6
1.65	6.5
1.67	7

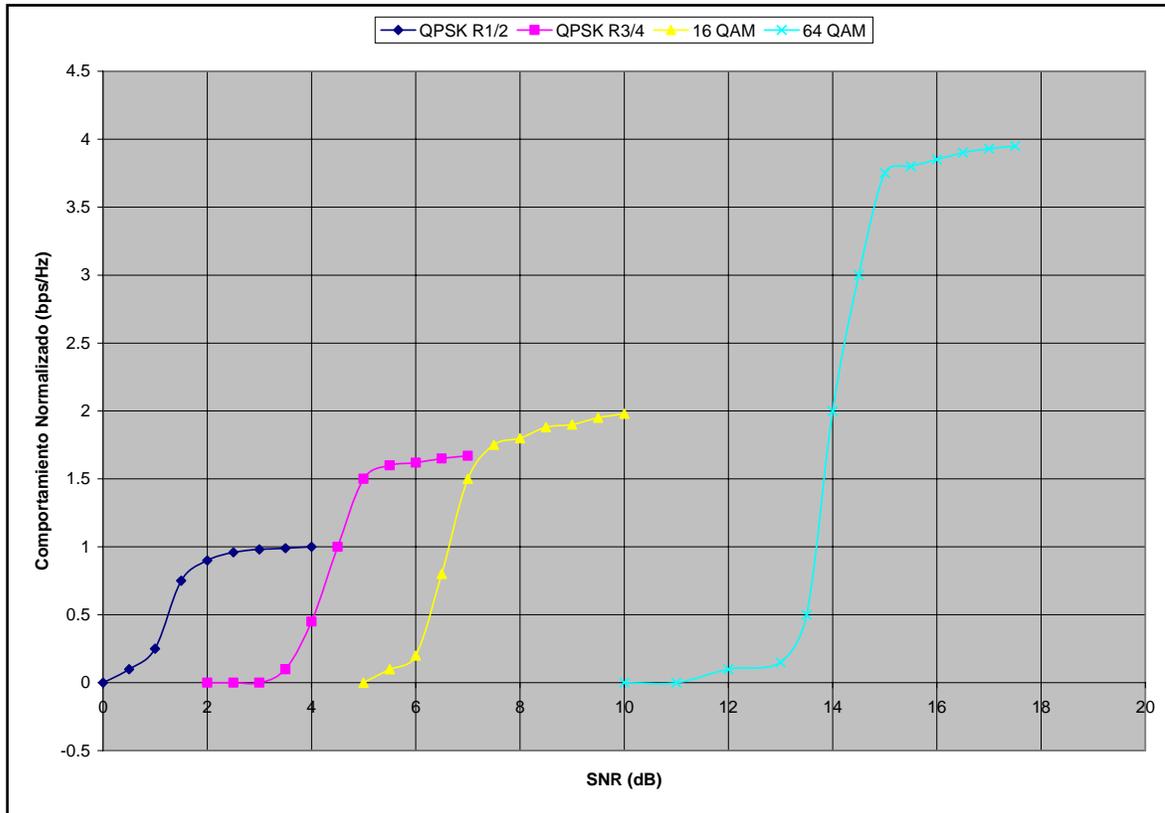
**Tabla 6.4** Comportamiento del **enlace** en función de SNR para modulación 16 QAM

Comportamiento normalizado (bps/Hz)	SNR (dB)
0	5
0.1	5.5
0.2	6
0.8	6.5
1.5	7
1.75	7.5
1.8	8
1.88	8.5
1.9	9
1.95	9.5
1.98	10

**Tabla 6.5** Comportamiento del enlace en función de SNR para modulación 64 QAM

Comportamiento normalizado (bps/Hz)	SNR (dB)
0	10
0	11
0.1	12
0.15	13
0.5	13.5
2	14
3	14.5
3.75	15
3.8	15.5
3.85	16
3.9	16.5
3.93	17
3.95	17.5
3.98	18

En la figura 6.3 se muestra que la modulación que presenta menor relación de señal a ruido corresponde a QPSK sin embargo, para el caso de éste proyecto se considera que una modulación QPSK cumple con los objetivos. Se planea tener una conexión de 1Mbps y aunque la SNR sea baja, se considera que se puede tener un buen comportamiento de calidad de servicio en el sistema.



**Figura 6.3** Eficiencia espectral de la red WiMAX utilizando distintas modulaciones

En la siguiente simulación se busca comparar el comportamiento que tienen los códigos convolucionales y los turbo códigos en la modulación QPSK. Los resultados se muestran a continuación en las tablas 6.6 a la 6.8. La figura 6.4 grafica los resultados. Importante notar que se realizan simulaciones con códigos largos y cortos, 432 y 48 bits respectivamente.

**Tabla 6.6** Tasa de error de bits en función de SNR utilizando códigos turbo convolucionales de 48 bits y modulación QPSK

Tasa de error de bits	SNR (dB)
0.025	1.5
0.002	2
0.000025	2.5

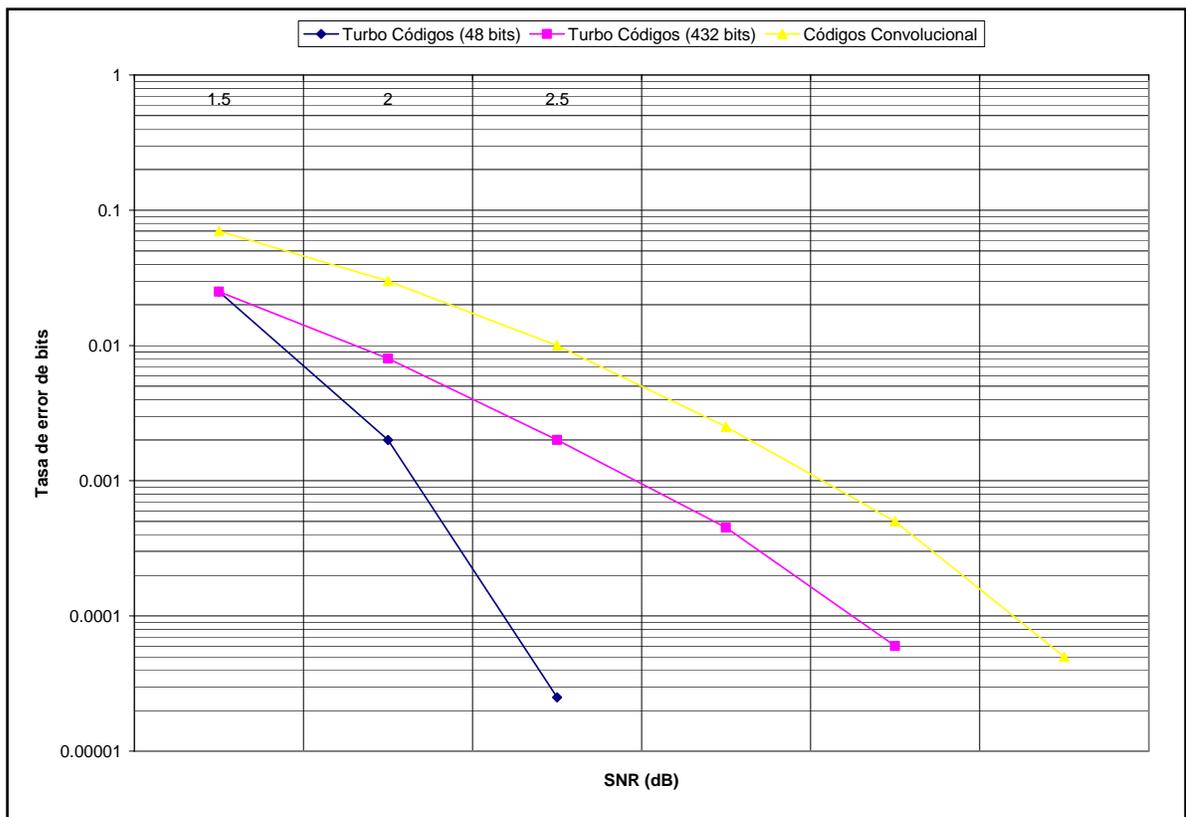
**Tabla 6.7** Tasa de error de bits en función de SNR utilizando códigos turbo convolucionales de 432 bits y modulación QPSK

Tasa de error de bits	SNR (dB)
0.025	1.5
0.008	2
0.002	2.5
0.00045	3
0.00006	3.5

**Tabla 6.8** Tasa de error de bits en función de SNR utilizando códigos convolucionales de 432 bits y modulación QPSK

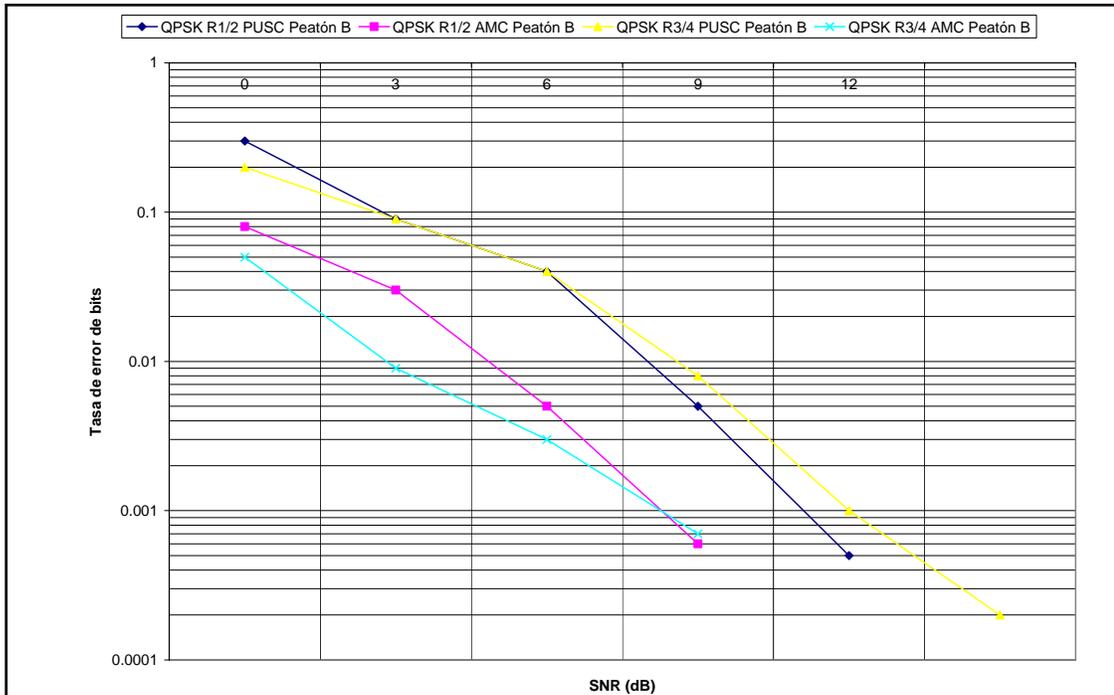
Tasa de error de bits	SNR (dB)
0.07	1.5
0.03	2
0.01	2.5
0.0025	3
0.0005	3.5
0.00005	4

En la figura 6.4 se muestra que utilizando turbo códigos en una trama larga se obtiene un comportamiento similar que sin utilizarlos con una trama corta. Por otro lado se muestra que la no utilización de turbo códigos en una trama larga genera relaciones SNR menores en el sistema. A través de esta simulación se demuestra la necesidad de implementar códigos turbo binarios ya que generan menor tasa de error en los bits a mayores SNR.



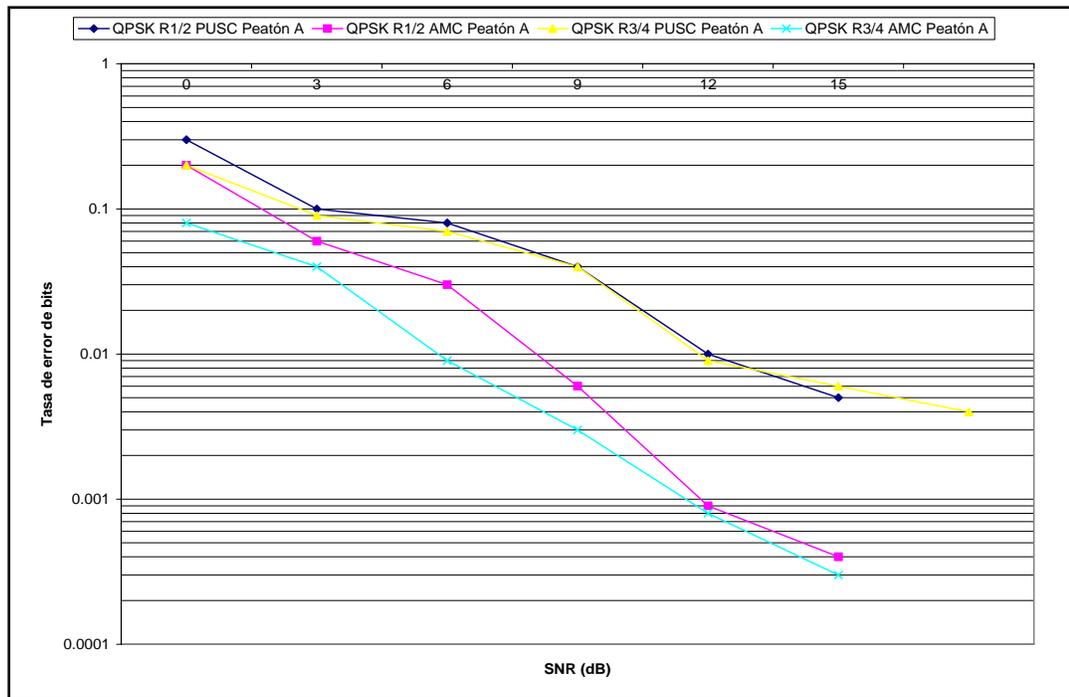
**Figura 6.4** Tasa de error de bits utilizando distintos códigos para la codificación y modulación QPSK R1/2

En la figura 6.5 se muestran los resultados experimentales en el peatón A utilizando un esquema de permutación de uso parcial de la subportadora. Se utiliza una modulación QPSK con códigos turbo binarios.



**Figura 6.5** Tasa de error de bits en función de la SNR utilizando distintos esquemas de permutación para la subportadora y modulación QPSK en el peatón B

En la figura 6.6 se muestran los resultados experimentales para el peatón A utilizando un esquema de permutación de uso parcial de la subportadora. Se utiliza una modulación QPSK con códigos turbo binarios.



**Figura 6.6** Tasa de error de bits en función de la SNR utilizando distintos esquemas de permutación para la subportadora y modulación QPSK en el peatón A

A través de las figuras 6.5 y 6.6 se puede comparar el comportamiento de los 2 peatones. Tanto el peatón A como el B caminan a 3km/hr, sin embargo, como se muestra en la figura 6.7, el peatón B se encuentra en un territorio con mayor densidad ambiental (distinta elevación) que el A. A pesar de esto, se muestran en las figuras anteriores que ambos comportamientos se pueden considerar similares.

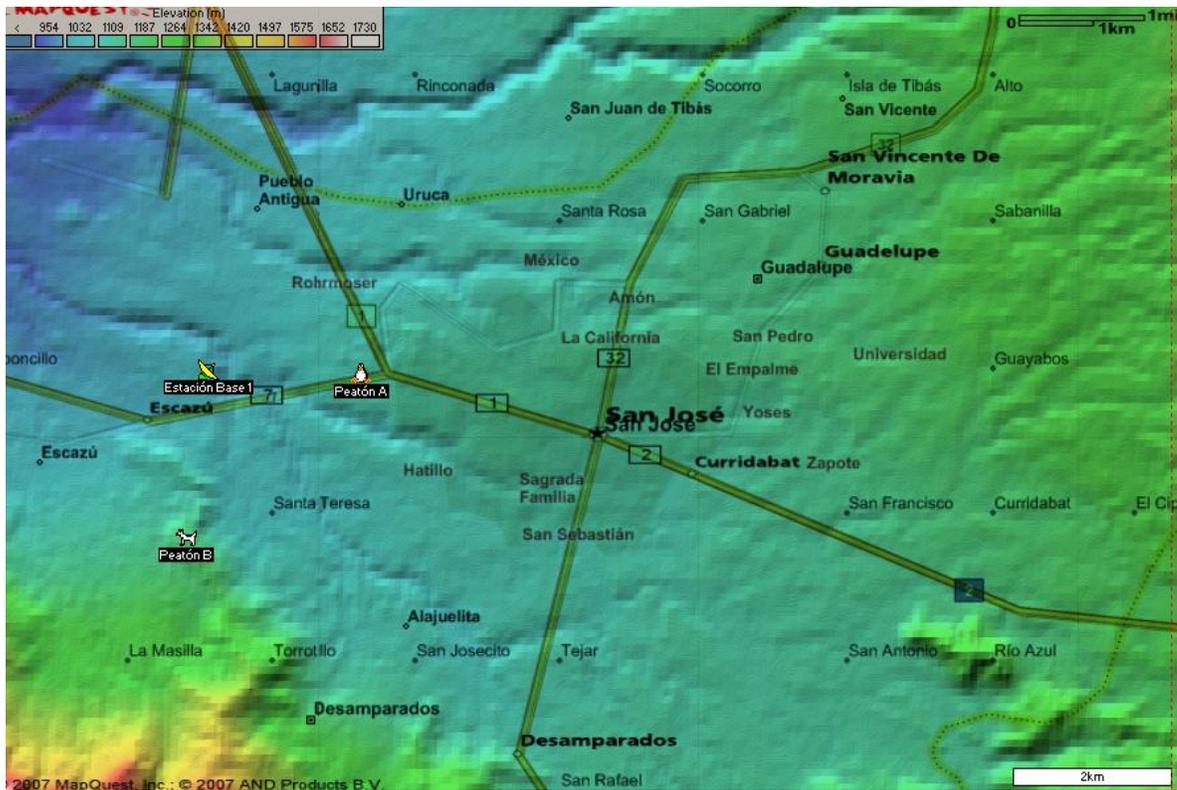
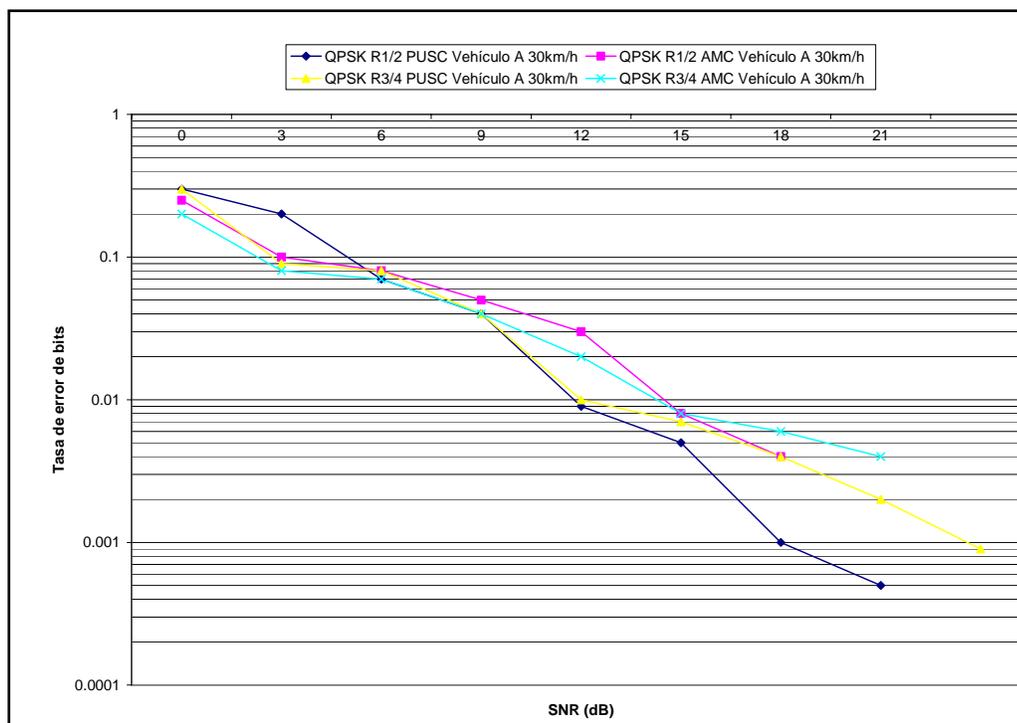
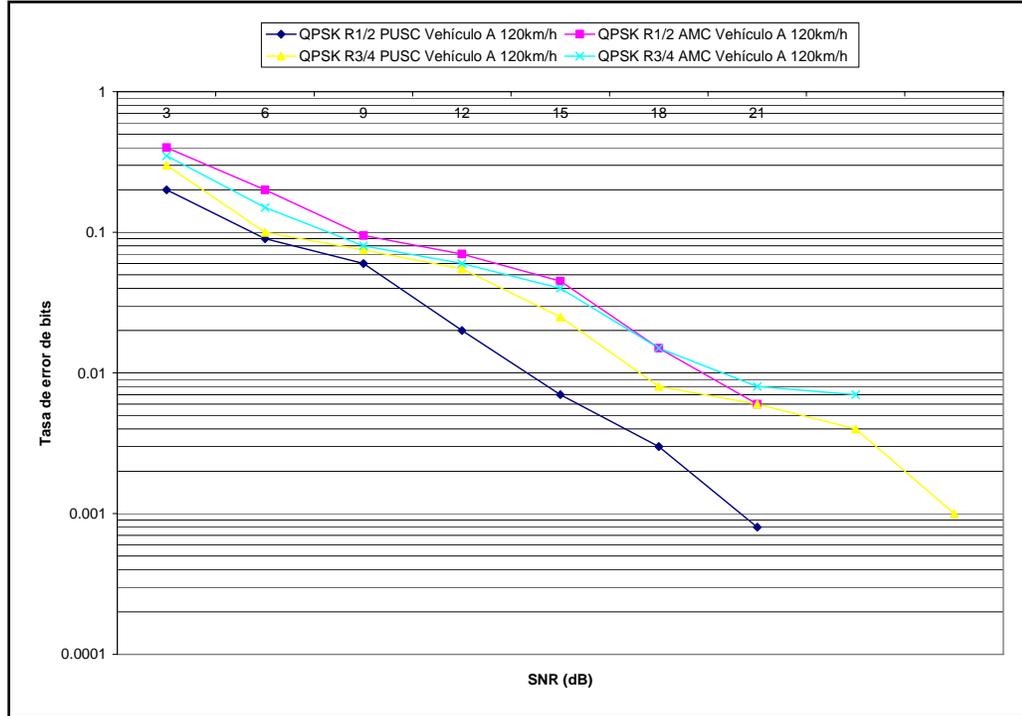


Figura 6.7 Escenario de simulación WiMAX a nivel de enlace con dos peatones

Como siguiente simulación se tiene el comportamiento analizado para los peatones pero en esta ocasión para un vehículo desplazándose a distintas velocidades. En la figura 6.8 se muestran los resultados del vehículo con una velocidad de 30 km/hr mientras que en la figura 6.9 para una velocidad de 120 km/hr.



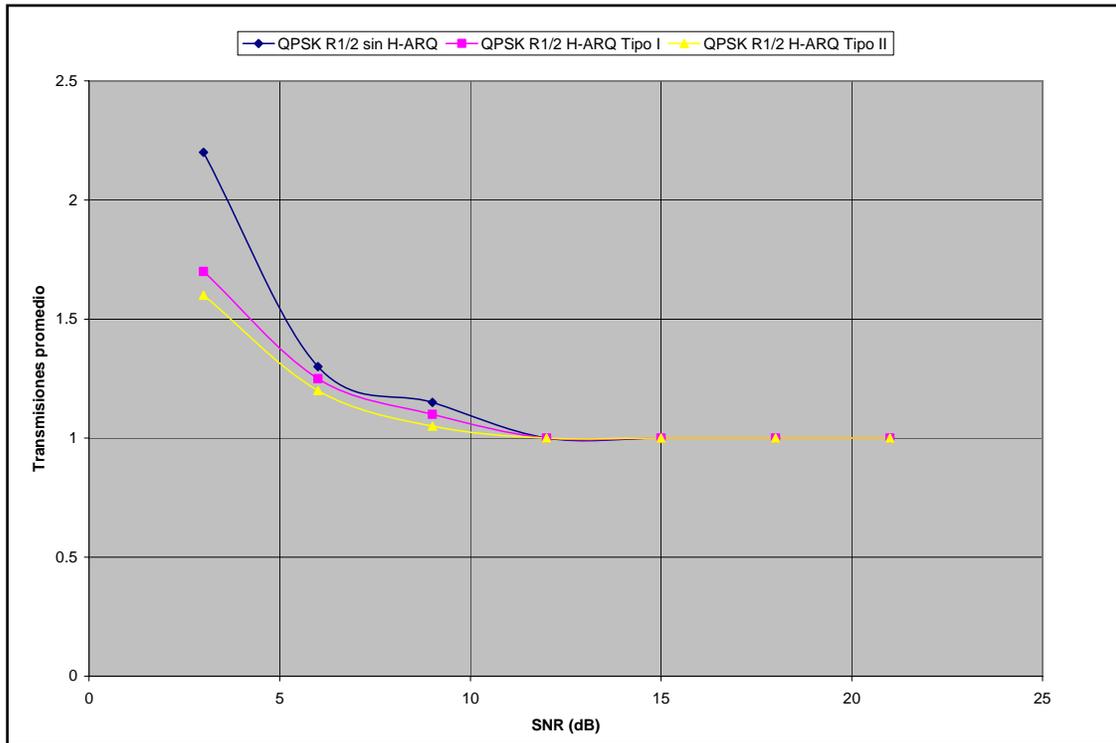
**Figura 6.8** Tasa de error de bits en función de la SNR para un vehículo desplazándose a 30km/h



**Figura 6.9 Tasa de error de bits en función de la SNR para un vehículo desplazándose a 120km/h**

En ambos de los casos anteriores se obtienen resultados muy similares, sin embargo, es comprensible que cuando el vehículo se desplaza a una velocidad mayor se alcanzan tasas de error ligeramente mayores.

Desde el punto de vista de la capa física resta evaluar el comportamiento de la implementación de la arquitectura híbrida. A continuación, en la figura 6.10 se presenta la comparación de utilizar la arquitectura híbrida tipo I y II. Para esta simulación se analiza la relación de señal a ruido en base a la cantidad de retransmisiones que necesita el sistema para codificar un bloque FEC sin errores.



**Figura 6.10** Transmisiones promedio en función de la relación señal a ruido con distinta implementación para H-ARQ

En la figura anterior se muestra que a medida que la relación SNR aumenta, únicamente se necesita una retransmisión para codificar correctamente un bloque FEC. El peor de los casos se presenta cuando  $SNR = 3dB$ ; sin la utilización de arquitectura híbrida se necesitan más de 2 retransmisiones mientras que tanto para tipo I como para tipo II son necesarias aproximadamente 1.5 retransmisiones. La utilización de la arquitectura híbrida tipo II presenta una ventaja mínima en comparación del tipo I. Como se menciona en el capítulo 5, en el proyecto se contempla implementar la arquitectura híbrida tipo II.

## 6.2 Nivel de sistema

Las simulaciones a nivel de enlace que se realizaron en el apartado anterior describieron el funcionamiento de un enlace WiMAX, sin embargo, no ofrecen mayor

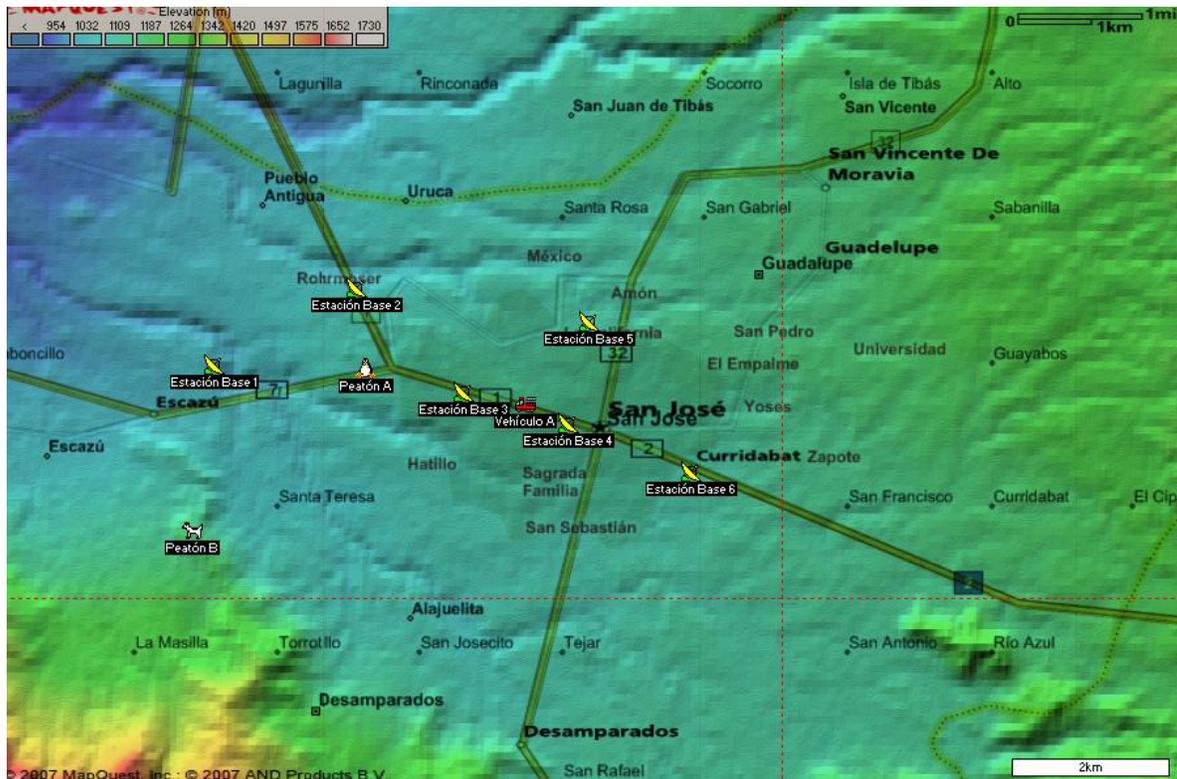
información en cuanto al funcionamiento de una red WiMAX como un todo. A continuación, en este apartado, se realizarán las simulaciones que ayudan a visualizar más claramente una posible implementación de la red WiMAX diseñada en el proyecto. Para esta sección también se recurre al software de simulación Radio Mobile Deluxe, en esta ocasión utilizando varias estaciones móviles y agrupando a las estaciones base con la arquitectura celular característica de la red WiMAX.

En la tabla 6.9, a continuación, se muestran los parámetros establecidos en la red para las simulaciones a nivel de sistema.

**Tabla 6.9** Parámetros de la red WiMAX determinados para la simulación a nivel de sistema

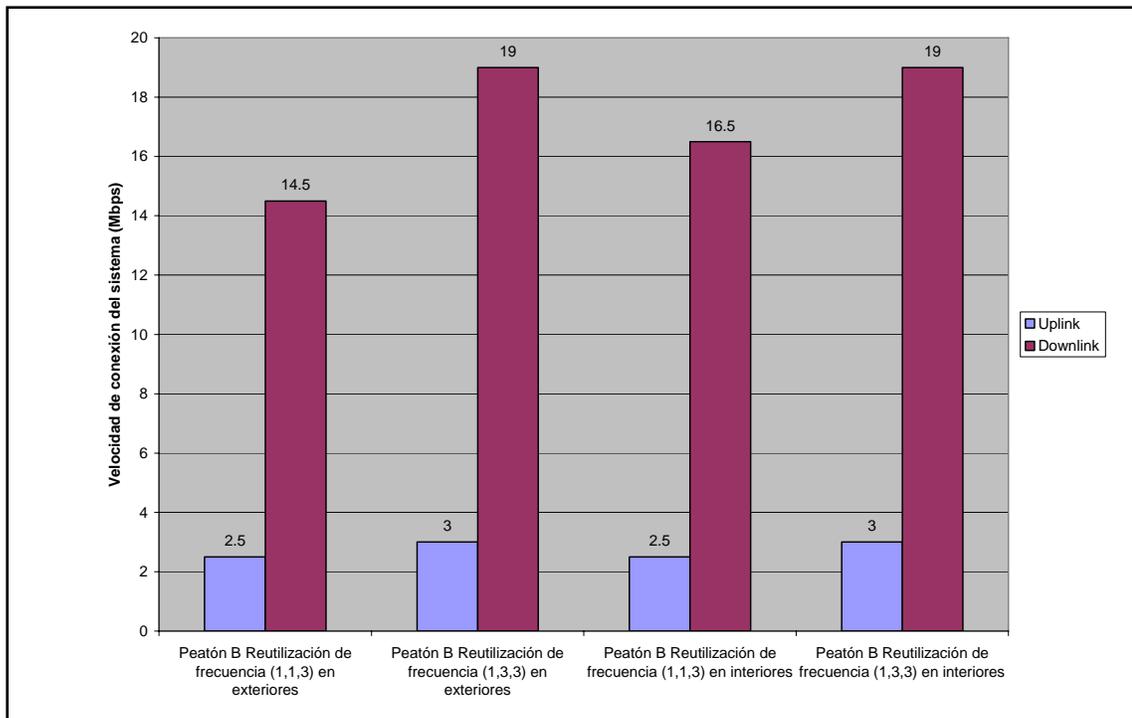
Parámetro simulado	Valor
Estaciones Base	6
Número de sectores por BS	3
Distancia BS-BS	2000 m
Reutilización de la frecuencia	(1,1,3) y (1,3,3)
Ancho de banda del canal	10MHz
Número de subportadoras	1024
Frecuencia portadora	2300MHz
Ganancia de la BS	18dBi
Alto de la BS	30m
Ruido de la BS	4dB
Pérdidas por cables en la BS	3dB
Potencia de transmisión de la BS	43dBm
Ganancia de la MS	0dBi para exteriores y 10dB para interiores
Alto de la MS	1m
Ruido de la MS	8dB
Pérdidas por cables en la MS	0dB
Potencia de transmisión de la MS	27dBm
Pérdidas por penetración de edificios	0dB para exteriores y 10dB para interiores
Desviación estándar de la atenuación de la señal	8dB
Modelo de pérdidas urbanas	Suburban COST 231 Hata Model
Número de usuarios por sector	12 usuarios simultaneos
Modelo de tráfico	La misma QoS para todos los usuarios

En base a los parámetros definidos para la red WiMAX en la tabla anterior, se simuló un escenario con 19 estaciones móviles y 4 estaciones base. El escenario se muestra en la figura 6.11.

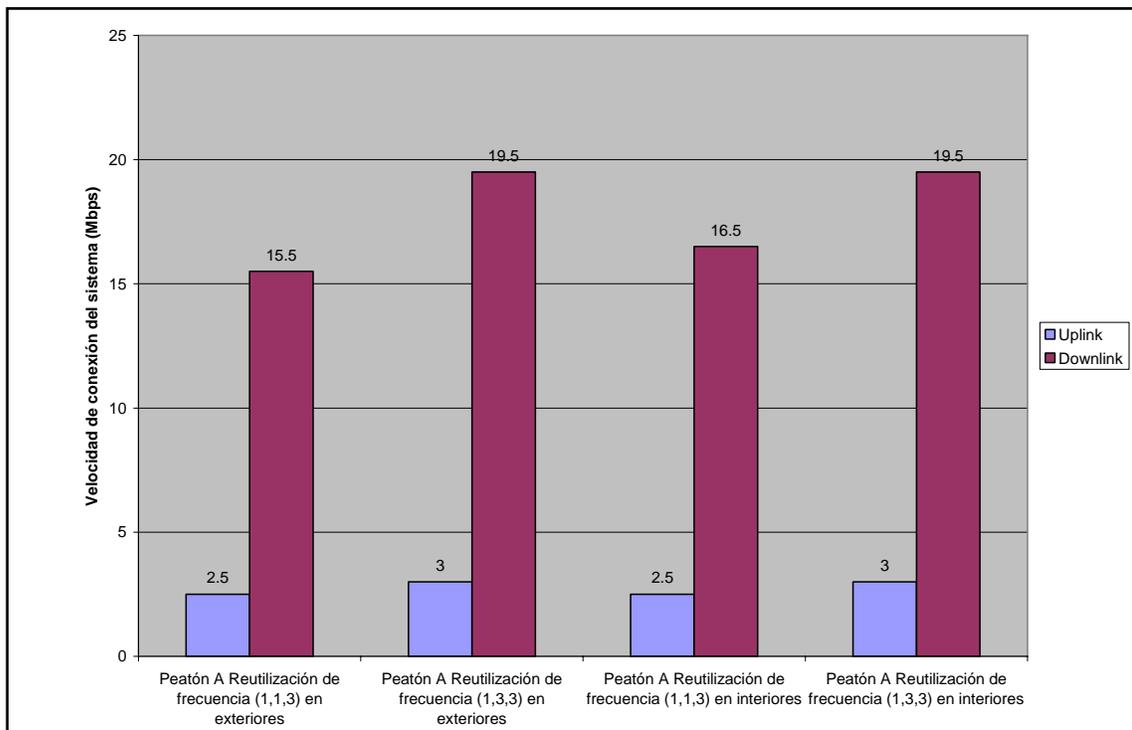


**Figura 6.11** Escenario de simulación WiMAX a nivel de sistema con dos peatones, un vehículo y 6 estaciones base

En las figuras 6.12 y 6.13 se muestra el comportamiento en Mbps para un canal de 10MHz y distintos esquemas para la reutilización de la frecuencia para el peatón A y B respectivamente. En la tabla 6.10 se resumen éstas características.



**Figura 6.12** Comportamiento en Mbps para el peatón B utilizando distintos modelos para la reutilización de frecuencia



**Figura 6.13** Comportamiento en Mbps para el peatón A utilizando distintos modelos para la reutilización de frecuencia

**Tabla 6.10** Velocidad promedio de conexión por estación base en distintos escenarios y reutilización de frecuencia

Escenario	Dispositivo de exterior		Dispositivo de interior	
	DL (Mbps)	UL (Mbps)	DL (Mbps)	UL (Mbps)
Peatón B con reutilización (1,1,3)	131.47	21.13	146.77	23.59
Peatón B con reutilización (1,3,3)	57.09	9.18	57.08	9.17
Peatón A con reutilización (1,1,3)	139.88	22.48	150.26	24.15
Peatón A con reutilización (1,3,3)	57.62	9.26	57.86	9.3

En las figuras anteriores se muestran resultados de una red funcionando a velocidades muy superiores a las comercialmente disponibles con mayor facilidad en este momento. Se torna importante entonces la gran ventaja que representa la utilización de la técnica de reutilización de frecuencia y lograr una eficiencia espectral que repercuta en mayores velocidades de conexión en radiofrecuencias. Es importante considerar que dichas condiciones de conexión se obtienen simuladas siempre y cuando la estación móvil se encuentre dentro del rango de cobertura de alguna de todas las estaciones base.

## Capítulo 7: Conclusiones y recomendaciones

### 7.1 Conclusiones

- El prototipo simulado de una red inalámbrica de alto alcance, basándose en el estándar IEEE 802.16e-2005, con servicios inalámbricos de alta calidad (video, voz, data) obtuvo una tasa de transferencia de 19Mbps y 15 kms de alcance.
- Un escenario de prueba de 15 kilómetros a la redonda del centro de San José ofrece la cobertura necesaria para las actividades del día a día de la empresa y sus empleados.
- La modulación OFDMA hace más fácil realizar mejorar la capacidad del sistema a través de la diversidad de frecuencia y usuarios múltiples.
- Las técnicas de multi acceso diseñadas permiten compartir los recursos eficientemente a través de los múltiples usuarios.
- La utilización de solicitudes de repeticiones híbridas (H-ARQ) y los códigos turbo duobinarios permiten ofrecer un alto grado de seguridad en una red WiMAX.
- Un apropiado diseño de la conmutación de celdas permite a la red WiMAX ofrecer conectividad de calidad a sus usuarios aún desplazándose a velocidades vehiculares.
- La implementación de protocolos IP ofrece convergencia con las tecnologías existentes y escalabilidad en una red WiMAX.
- El ahorro de energía en una red es de suma importancia para las tecnologías actuales.

## **7.2 Recomendaciones**

- Se recomienda implementar una red WiMAX para ofrecer servicios diferenciados inalámbricos a los empleados de la empresa.
- Para ampliar la cobertura de servicio en la red WiMAX se puede implementar una arquitectura de movilidad a nivel de CSN.
- Es necesario definir el balance apropiado entre la capacidad y la cobertura que permita una conexión de calidad y fiabilidad a un costo razonable.
- El análisis de costos debe de realizarse con un plazo de tiempo muy corto con el momento de su implementación ya que al ser WiMAX una tecnología muy nueva, sus costos se mantiene muy variables.

## Bibliografía

1. Andrews, J. Ghosh, A. Muhamed, R. Fundamentals of WiMAX. Prentice Hall. Primera Edición 2007.
2. ITU. [En línea] Telecommunications indicators update – 2004. [www.itu.int/ITU-D/ict/statistics/](http://www.itu.int/ITU-D/ict/statistics/). [Consulta: 10 agosto 2007]
3. Montes de Oca, Faustino. [En línea]. Modelo OSI. Instituto Tecnológico de Costa Rica. <http://www.ie.itcr.ac.cr/faustino/Redes/Clase1/1.1ModeloOSI.pdf>. [Consulta: 30 agosto 2007].
4. Berrou, C. Jezequel, M. [En línea] Non binary convolutional codes and turbo coding. Electronics Letters. Enero 1999. [www.ieee.com](http://www.ieee.com). [Consulta: 15 agosto 2007].
5. Ruiz, Jairo. [En línea] Universidad Distrital de Colombia. Colombia. <http://www.udistrital.edu.co/comunidad/profesores/jruiz/jairocd/texto/usm/cd/modulacion.doc>. [Consulta: 25 septiembre 2007].
6. Cimini. L. [En línea] Análisis and simulation of a digital mobile channel using orthogonal frequency division multiplexing. IEEE transactions on communications. Julio 1985. [www.ieee.com](http://www.ieee.com). [Consulta: 15 agosto 2007].
7. IEEE. Standard 802.16-2004. Parte 16: Air Interface for fixed and mobile broadband wireless access systems. Diciembre 2005.
8. Ordenadores y portátiles. [En línea] España. <http://www.ordenadores-y-portatiles.com/dhcp.html> [Consulta: 15 agosto 2007].

9. Communication Plus. [En línea] Francia.  
<http://www.cplus.org/rmw/english1.html> [Consulta: 25 agosto 2007]

## Apéndices

### A.1 Acrónimos

AAA	Autorización, autenticación y administración
AAS	Sistemas avanzados de antenas
AK	Clave de autenticación
AMC	Modulación y codificación adaptativa
AR	Router de acceso
ARQ	Solicitud de repetición automática
ASN	Red de acceso al servicio
ASN-GW	Puerta de acceso a la ASN
BER	Tasa de error de bits
BLER	Tasa de error de bloques
BPSK	Corrimiento de fase binaria
BS	Estación base
CC	Códigos convolucionales
CPE	Equipo proveído por consumidor
CRC	Corrección de redundancia cíclica
CS	Subcapa de convergencia
CSI	Información del estado del canal
CSN	Red de conectividad al servicio
CTC	Códigos turbo convolucionales
DAC	Convertidor de digital a analógico
DHCP	Protocolo de control al anfitrión dinámico
DL	Enlace de bajada
DNS	Sistema del nombre del dominio
DSL	Línea de suscriptor digital
EAP	Protocolo de autenticación extensible
EMSK	Clave de la sesión master mejorada

FEC	Corrección de error en adelanto
FFT	Rápida transformada de Fourier
FUSC	Uso total de subportadoras
GPRS	Servicio de paquetes de radio GSM
GSM	Sistema global para las comunicaciones móviles
HARQ	ARQ híbrida
IEEE	Instituto de Ingeniero Electrónicos y Eléctricos
IFFT	Inversa de la transformada rápida de Fourier
IP	Protocolo de Internet
IP-CS	Subcapa de convergencia IP
LAN	Red de área local
LOS	Línea de vista
LSB	Bit menos significativo
MAC	Control de acceso al medio
MAN	Red de área metropolitana
MIMO	Múltiples entradas múltiples salidas
MS	Estación móvil
MSB	Bit más significativo
MSK	Clave de sesión máster
NAP	Proveedor de acceso a la red
NAS	Servidor de acceso a la red
NLOS	No en línea de vista
NRM	Modelo de referencia de red
NSP	Proveedor de servicios de red
OFDM	Multiplexación por división de frecuencia ortogonal
OFDMA	Acceso a la multiplexación por división de frecuencia ortogonal
OSI	Interconexión de sistemas abiertos
PDA	Asistente personal de datos
PDU	Paquete de unidad de datos
PER	Tasa de error de paquetes

PHS	Supresión del encabezado del paquete
PHSF	Campo PHS
PHSI	Índice PHS
PHSM	Máscara PHS
PHSV	Verificación PHS
PKM	Administración de privacidad y clave
PPP	Protocolo punto a punto
PUSC	Uso parcial de subportadoras
QoS	Calidad de servicio
QAM	Modulación por cuadratura de amplitud
QPSK	Corrimiento de cuadratura de fase
RF	Radio frecuencia
RR	Recurso de radio
RRC	Controlador de recurso de radio
RRM	Administrador de recurso de radio
SH	Subencabezado
S/P	Serie a paralelo
SS	Estación subscriptora
TEK	Clave de encriptación del tráfico
UDP	Protocolo de datagrama del usuario
UL	Enlace de subida
VLAN	Red de área local virtual
VPN	Red privada virtual
WAN	Red de área extendida
Wi-Fi	Fidelidad inalámbrica
WiMAX	Interoperabilidad mundial para el acceso por microondas
WLAN	Red de área local inalámbrica