



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

---

POSGRADO EN CIENCIA E INGENIERÍA DE LA COMPUTACIÓN

**“ANÁLISIS DE TÉCNICAS DE CONTROL DE POTENCIA PARA  
REDES MÓVILES IEEE 802.16e ”**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:**

**MAESTRA EN INGENIERÍA  
(COMPUTACIÓN)**

**P R E S E N T A:**

**MARGARITA MUÑOZ GONCEN**

**DIRECTOR DE TESIS: DR. VICTOR RANGEL LICEA**

**México, D.F.**

**2009.**

## Agradecimientos

A la Universidad Nacional Autónoma de México, y al Posgrado de Ciencia e Ingeniería de la Computación, por darme la oportunidad de cursar los estudios de Maestría.

A la DGAPA-UNAM por el apoyo otorgado al proyecto de investigación PAPIIT No. IN-104907-3 “Desarrollo de técnicas de mejoramiento de la capacidad de transmisión en redes inalámbricas de banda ancha tipo MESH basado en el protocolo IEEE 802.16-2004”; y al proyecto PAPIME PE103807 “Integración de nuevas tecnologías y elaboración de material didáctico para un laboratorio multidisciplinario de redes de la Facultad de Ingeniería”.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo económico en mis estudios de posgrado.

Al Dr. Víctor Rancel Licea por darme la oportunidad de participar en un proyecto tan interesante, y por su apoyo para concluir con éxito este trabajo de investigación.

Al Dr. Boris Escalante Ramírez, que como coordinador del Posgrado de Ciencia e Ingeniería de la Computación, me brindó gran apoyo en la parte final de mis estudios.

## Dedicatorias

A Dios, por darme la fuerza, la capacidad y la voluntad para lograr alcanzar mis metas.

A mis padres y a mi hermano, por todo su amor y confianza incondicionales, los cuales siempre me han dado la fuerza para continuar superándome.

A mí, por no perder la esperanza en tiempos difíciles y esforzarme para obtener éxito.

# Contenido

<b>Lista de Figuras .....</b>	<b>V</b>
<b>Lista de Tablas.....</b>	<b>VII</b>
<b>Capítulo 1 .....</b>	<b>1</b>
<b>Introducción.....</b>	<b>1</b>
1.1    Antecedentes.....	1
1.2    Definición del problema .....	2
1.3    Objetivo .....	3
1.4    Metodología.....	3
1.5    Contribución y relevancia .....	4
1.6    Estructura de la tesis .....	5
<b>Capítulo 2 .....</b>	<b>6</b>
<b>Conceptos básicos de redes inalámbricas de banda ancha .....</b>	<b>6</b>
2.1    Introducción .....	6
2.1.1    Estado del arte.....	7
2.2    Acceso inalámbrico de banda ancha (Broadband Wireless Access – BWA) .....	12
2.2.1    Estándares de Acceso Inalámbrico de Banda Ancha (IEEE 802.16) .....	13
2.3    Modelos de propagación .....	14
2.3.1    Fluctuaciones lentas .....	15
2.3.2    Fluctuaciones rápidas.....	15
2.3.3    Variaciones en las fluctuaciones debidas a la velocidad.....	15
2.3.4    Multitrayecto (Multipath) .....	15
2.4    Tipos de multiplexación .....	17
2.4.1    TDD (Time Division Duplex).....	17
2.4.2    FDD (Frequency Division Duplex).....	18
2.5    Técnicas de acceso al medio .....	19
2.5.1    FDMA (Frequency Division Multiple Access) .....	19
2.5.2    TDMA (Time Division Multiple access).....	19
2.5.3    FDMA/TDMA .....	20
2.5.4    CDMA (Code Division Multiple Access) .....	20
2.5.5    OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) .....	20
2.5.6    OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access).....	21
2.6    Modulación y codificación .....	21
2.6.1    Modulación en amplitud - ASK (Amplitude Shift Keying).....	22
2.6.2    Modulación en frecuencia - FSK (Frequency Shift Keying).....	22
2.6.3    Modulación en fase - PSK (Phase Shift Keying) .....	22

2.6.4	Modulación QAM (Quadrature Amplitude Modulation).....	23
2.7	Protocolos (TCP, IP, UDP).....	25
2.7.2	IP (Internet Protocol).....	26
2.7.3	UDP (User Data Protocol).....	27
2.8	Tráfico de información.....	28
2.8.1	Voz.....	28
2.8.2	Video.....	28
<b>Capítulo 3</b>	.....	<b>30</b>
<b>Descripción del Estándar IEEE 802.16e</b>	.....	<b>30</b>
3.1	Antecedentes.....	30
3.2	Capa MAC.....	32
3.2.1	MAC subcapa de parte común (Common Part Sublayer – CPS).....	32
3.2.1.1	Paquete CS.....	33
3.2.1.2	Punto MultiPunto (PMP).....	33
3.2.1.3	MAC PDU.....	34
Encabezados MAC genérico (Generic MAC Header – GMH).....	35	
Encabezado MAC sin payload.....	36	
Encabezado de señalización MAC tipo I.....	36	
Encabezado de Solicitud de ancho de banda.....	38	
Encabezado de señalización MAC tipo II.....	39	
Encabezado de retroalimentación.....	39	
3.2.1.4	Servicios de programación (scheduling).....	39
3.2.1.4.1	Programación solicitud/concesión para UL.....	40
UGS.....	41	
rtPS extendido.....	41	
rtPS.....	41	
nrtPS.....	41	
BE.....	41	
3.2.1.5	Ancho de banda.....	42
3.2.1.5.1	Mecanismos de solicitud y asignación de ancho de banda.....	42
Solicitudes.....	42	
Concesiones (Grants).....	43	
Poleo.....	43	
Solicitudes para WMAN OFDM basadas en contención.....	44	
Solicitudes para WMAN OFDMA basadas en contención.....	44	
3.2.1.6	Soporte MAC de PHY (capa física).....	44
3.3	Capa Física.....	44
3.3.1	SOFDMA - OFDMA Escalable (Scalable OFDMA).....	45
3.3.2	Descripción del dominio del tiempo (símbolo OFDMA).....	46
3.3.3	Descripción del dominio de frecuencia.....	47
3.3.3.1	Ubicaciones de las subportadoras OFDMA.....	48
FUSC (Fully Used Subchannelization).....	48	
PUSC (Partially Used Sub-carrier).....	48	
3.3.4	Estructura de trama (frame).....	49
3.3.5	Mecanismos de control.....	50
3.3.5.1	Sincronización.....	50

3.3.5.2	Ranging (proceso de variar, alinear).....	50
3.3.5.3	Control de potencia.....	51
3.3.6	Modulación .....	51
	Modulación Adaptiva y Codificación (AMC) .....	51
<b>Capítulo 4</b>	.....	<b>53</b>
<b>Modelos teóricos y algoritmos</b>	.....	<b>53</b>
3.2	Modelos de propagación .....	53
4.1.1	Path Loss (Pérdida por trayectoria) .....	55
4.1.1.1	Path Loss peatonal .....	55
4.1.1.2	Path Loss vehicular.....	56
4.1.2	La razón de la señal a ruido (SNR) .....	56
4.1.2.1	Cálculo de SNR .....	56
4.2.1.2	SNR efectiva .....	57
4.3	Medición de la calidad del canal .....	59
4.3.1	RSSI .....	59
4.3.2	CINR.....	59
4.4	Funcionamiento de la AMC .....	59
4.4.1	CQI SNR.....	60
4.4.2	Eficiencia espectral.....	61
<b>Capítulo 5</b>	.....	<b>62</b>
<b>Análisis de resultados</b>	.....	<b>62</b>
5.1	Especificaciones.....	63
5.2	Simulaciones y resultados.....	65
5.2.1	Escenario 1 - Modelo con una estación móvil y una estación base .....	68
5.2.1.1	Análisis del canal UL y la ganancia en la antena de la MS .....	74
5.2.1.2	Funcionamiento de la AMC.....	77
Escenario 1 con tráfico de video con modelo vehicular sin shadow fading.....	77	
Escenario 1 con tráfico de video con modelo vehicular con shadow fading.....	84	
Escenario 1 con tráfico de voz modelo vehicular sin shadow fading.....	86	
5.2.1.3	Resumen del Escenario 1 .....	87
5.2.2	Escenario 2 - Modelo con una estación base y un número variable de estaciones móviles .....	88
5.2.2.1	Escenario 2 con tráfico de voz con modelo vehicular sin shadow fading .....	89
5.2.2.2	Escenario 2 con tráfico de voz con modelo vehicular con shadow fading.....	94
5.2.2.3	Resumen del Escenario 2.....	97
5.2.3	Planeación y operación de redes inalámbricas móviles WiMAX .....	98
5.3	Detalles técnicos para implementar mejoras.....	99
<b>Capítulo 6</b>	.....	<b>100</b>
<b>Conclusiones generales</b>	.....	<b>100</b>
6.1	Conclusiones finales.....	100
6.2	Contribuciones.....	100

**Glosario..... 102**  
**Abreviaturas..... 105**  
**Apéndice A..... 109**  
**Referencias Bibliográficas..... 112**  
**Páginas Web ..... 114**

## Lista de Figuras

Figura 2.1 a) Respuesta en frecuencia deseada de un canal.....	16
Figura 2.1 b) Respuesta en frecuencia de un canal con desvanecimiento selectivo de frecuencia.....	16
Figura 2.2 Respuesta en frecuencia de un canal con desvanecimiento selectivo de frecuencia que transmite OFDM.....	17
Figura 2.3 Asignación de canales con TDD.....	18
Figura 2.4 Asignación de canales con FDD.....	18
Figura 2.5 Descripción de frecuencia OFDM.....	21
Figura 2.6 Modulación digital.....	22
Figura 2.7 Constelaciones de modulaciones PSK.....	23
Figura 2.8 Formato de encabezado TCP.....	25
Figura 2.9 Formato de encabezado IP.....	26
Figura 2.10 Formato de encabezado UDP.....	27
Figura 3.1 Formato de MAC PDU.....	34
Figura 3.2 Formato de encabezado MAC genérico.....	35
Figura 3.3 Encabezado de señalización MAC Tipo I.....	36
Figura 3.4 Formato de encabezado de solicitud de ancho de banda.....	38
Figura 3.5 Encabezado de señalización MAC Tipo II.....	39
Figura 3.6 a) Portadoras en OFDM.....	45
Figura 3.6 b) Portadoras en OFDMA.....	45
Figura 3.7 Estructura de tiempo de símbolo OFDMA.....	46
Figura 3.8 Descripción de frecuencia OFDMA (ejemplo de 3 canales).....	48
Figura 3.9 Ejemplo de un frame de OFDMA (solamente con zonas obligatorias) en modo TDD.....	49
Figura 4.1 Terreno tipo A.....	54
Figura 4.2 Terreno tipo B.....	54
Figura 4.3 Terreno tipo C.....	55
Figura 4.4 Relación de umbrales de SNR y modulación/codificación.....	61
Figura 5.1 Modelo de red - Escenario 1.....	68
Figura 5.2 Path Loss y Razón señal a ruido (Escenario 1 sin shadow fading).....	74
Figura 5.3 Razón señal a ruido para los canales DL y UL (Escenario 1).....	75
Figura 5.4 Escenario para estudio de ganancia y potencia de la MS.....	75

Figura 5.5 Potencia de transmisión vs. distancia máxima .....	76
Figura 5.6 Bits de información por símbolo para los canales DL y UL.....	81
Figura 5.7 Cambios en la Modulación y codificación (Escenario 1 tráfico de video) .....	81
Figura 5.8 Efecto de la AMC en la Carga y Throughput (tráfico de video).....	82
Figura 5.9 Efecto de la AMC en el retardo end-to-end (tráfico de video).....	83
Figura 5.10 PL y SNR en modelo vehicular con shadow fading .....	84
Figura 5.11 Efecto de la AMC en la Carga y Throughput – Canal DL (tráfico de video).....	84
Figura 5.12 Efecto de la AMC en la Carga y Throughput – Canal UL (tráfico de video).....	85
Figura 5.13 Efecto de la AMC en el retardo end-to-end (tráfico de video).....	85
Figura 5.14 Efecto de la AMC en la Carga y Throughput (tráfico de voz).....	86
Figura 5.15 Efecto de la AMC en el retardo end-to-end (tráfico de voz).....	87
Figura 5.16 Modelo de red - Escenario 2 .....	88
Figura 5.17 Comportamiento del Escenario 2 utilizando AMC (sin shadow fading) .....	90
Figura 5.18 Comportamiento del Escenario 2 utilizando QPSK $\frac{1}{2}$ (sin shadow fading) .....	91
Figura 5.19 Comportamiento del Escenario 2 utilizando 64QAM $\frac{3}{4}$ (sin shadow fading) .....	92
Figura 5.20 Comparación de Throughput y Retardo end-to-end por modulación/codificación (Escenario 2 sin shadow fading) .....	93
Figura 5.21 Comportamiento del Escenario 2 utilizando AMC (con shadow fading) .....	94
Figura 5.22 Comportamiento del Escenario 2 utilizando QPSK $\frac{1}{2}$ (con shadow fading) .....	95
Figura 5.23 Comportamiento del Escenario 2 utilizando 64 QAM $\frac{3}{4}$ (con shadow fading).....	96
Figura 5.24 Comparación de Throughput y Retardo end-to-end por modulación/codificación (Escenario 2 con shadow fading).....	97

## Lista de Tablas

Tabla 1.1	Términos utilizados en presentación de resultados .....	5
Tabla 2.1	Formatos de video conferencia .....	29
Tabla 3.1	Tabla comparativa WiMAX .....	32
Tabla 3.2	Campos del GMH .....	35
Tabla 3.3	Codificaciones de Tipo .....	36
Tabla 3.4	Codificaciones para el campo Tipo del encabezado de señalización MAC Tipo I....	37
Tabla 3.5	Tipos de encabezado de señalización MAC Tipo I .....	37
Tabla 3.6	Campos del encabezado de solicitud de ancho de banda .....	38
Tabla 3.7	Codificación del campo Tipo del encabezado de señalización MAC Tipo II .....	39
Tabla 3.8	Tipos de programación de servicios .....	40
Tabla 4.1	Rangos de movilidad para simulaciones .....	55
Tabla 4.2	Valores de shadow fading por tipo de terreno .....	56
Tabla 4.3	Umbrales de decisión (AMC) .....	60
Tabla 5.1	Especificaciones para SOFDMA .....	63
Tabla 5.2	Tasas de transmisión calculadas para un canal de 10 MHz .....	64
Tabla 5.3	Valores de parámetros de MS y BS (Modelo con 1 MS) .....	65
Tabla 5.4	Valores de trayectoria de MS1 (Escenario 1).....	69
Tabla 5.5	Valores de distancias durante la simulación (Escenario 1).....	70
Tabla 5.6	Resultados calculados para PL, SNR (Escenario 1).....	71
Tabla 5.7	Corrida de la consola del Debugger PL y SNR (Escenario 1).....	72
Tabla 5.8	Tabla comparativa en la obtención de PL y SNR (Escenario 1).....	73
Tabla 5.9	Potencia de la MS y distancia máxima.....	77
Tabla 5.10	Cambios de modulación/codificación (consola del debugger) .....	79
Tabla 5.11	Ejemplos de mediciones para realizar el cambio de perfil de ráfaga .....	80
Tabla 5.12	Bits de información por símbolo por tipo de modulación/codificación .....	80

# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1 Antecedentes

La tecnología WiMAX, “Interoperabilidad Mundial para Acceso por Microondas (del inglés Worldwide Interoperability for Microwave Access) es el nombre comercial que se le da al Estándar IEEE 802.16 (Institute of Electrical and Electronic Engineers) para transmisión inalámbrica de datos.

Es una solución diseñada para prestar servicios a nivel comercial en Redes de Área Metropolitana (Metropolitan Area Network - MAN) con capacidad de cobertura en interiores y exteriores, en áreas urbanas y rurales donde no es necesario que se tenga visión directa con las estaciones base. Se trata de un acceso inalámbrico de banda ancha.

En junio del 2001 se creó el Foro WiMAX, una organización creada y dirigida por la industria de las comunicaciones (fabricantes como Intel, Nokia y Fujitsu entre otros), y sin fines de lucro, cuya función es promover y certificar la compatibilidad e interoperabilidad de los productos inalámbricos de banda ancha, basados en el estándar IEEE 802.16/ETSI HiperMAN (European Telecommunications Standards Institute).

La IEEE ha ido mejorando los estándares hasta llegar a basar la tecnología WiMAX en solamente dos modalidades del estándar que son:

- IEEE 802.16-2004 (Fijo)
- IEEE 802.16e (Móvil)

El estándar IEEE 802.16e incluye, entre otras características, la Modulación Adaptiva y Codificación (Adaptive Modulation and Coding - AMC), la cual es un elemento básico para el concepto de movilidad de los usuarios de redes WiMAX.

**Nota importante:**

Aunque el título de la tesis hace referencia a “control de potencia”, el proyecto que finalmente se desarrolló para presentarse en esta tesis, se encuentra enfocado únicamente al análisis de la Modulación Adaptiva y Codificación (Adaptive Modulation and Coding - AMC).

La razón de esto es, que el tiempo que se asigna (por la UNAM) para desarrollar y presentar el proyecto de tesis, no fue suficiente para realizar una investigación tan extensa como lo es el control de potencia propuesto; y ya que el análisis de la AMC se llevó todo el tiempo por sí sola, los resultados del análisis son lo suficientemente completos y relevantes para presentar esta tesis.

Asimismo, el trabajo que se presenta del análisis de la AMC, realiza una valiosa contribución a investigaciones relacionadas con el tema de la AMC, así como con el control de potencia en proyectos del estándar IEEE 802.16e.

**1.2 Definición del problema**

Actualmente, en la mayoría de las redes móviles, para conservar las tasas de transmisión entre la estación base (Base Station - BS) y la estación suscriptor (Suscriptor Station – SS), se hacen incrementos en la potencia de transmisión y/o recepción para lograrlo.

El problema que se genera con esta medida es que, al incrementar la potencia de recepción y/o transmisión se puede generar interferencia a las estaciones suscriptoras vecinas, ya sea que se encuentren conectadas a la misma estación base, o interfiera con estaciones suscriptoras que se encuentran conectadas a una estación base diferente.

Otra forma de abordar el problema es mediante asignaciones pre-definidas de modulación y codificación, basándose en la distancia entre las estaciones móviles y la estación base, y también tomando en cuenta la relación de señal a ruido detectado en la estación móvil, utilizando tablas que determinan cual modulación y codificación asignar de acuerdo a esos valores.

Una forma de evitar este problema, es utilizar una característica propia del estándar IEEE 802.16e: la Modulación Adaptiva y Codificación (AMC).

Por medio de esta técnica, se pretende mejorar el rendimiento del sistema al ir adecuando la modulación y codificación de manera automática, y de esta forma, la tasa de transmisión entre las estaciones móviles y la estación base siempre será la máxima posible, de acuerdo a las condiciones de la conexión entre cierta estación móvil y la estación base.

Con la AMC se asegura que la tasa de transmisión de información entre la estación base y las estaciones móviles, será la máxima ya que la AMC incrementa o disminuye dinámicamente las tasas de transmisión entre la estación base y sus estaciones móviles.

La AMC logra mantener un bajo promedio de paquetes perdidos durante la transmisión/recepción de información, debido a que está permitiendo transmitir más datos por unidad de tiempo cuando hay buena comunicación, debido a que la probabilidad de perder

datos es baja; y el caso contrario es transmitir pocos datos por unidad de tiempo cuando la probabilidad de perder datos es alta.

### 1.3 Objetivo

Analizar diferentes escenarios de redes móviles inalámbricas del estándar IEEE 802.16e, de manera que se puedan probar y comprobar los resultados de las simulaciones con los resultados de los modelos teóricos, de conceptos relacionados con la Modulación Adaptiva y Codificación.

### 1.4 Metodología

Se tendrán dos aproximaciones para el análisis de la modulación adaptiva y codificación, una se refiere al marco teórico que respalda los diferentes parámetros involucrados, y la otra será la simulación de diferentes escenarios para evaluar resultados.

La metodología se resume de la siguiente forma:

- a. Se analizarán las bases teóricas (estado del arte) más recientes del estándar IEEE 802.16e, así como del manejo de AMC en proyectos de investigación recientes
- b. Se buscarán y analizarán diferentes algoritmos y técnicas para aplicar la AMC, los cuales serán presentados en esta tesis
- c. Se realizará un análisis detallado de la técnica de AMC utilizada en OPNET modeler, el cual se ha elegido para este análisis debido a que cuenta con un modelo de red para el estándar 802.16e muy completo y, lo más importante, tiene implementado el algoritmo de AMC, a diferencia de otros productos que ni siquiera manejan movilidad
- d. En la parte del análisis, se realizarán simulaciones donde se muestren curvas comparativas entre AMC y algún tipo de modulación/codificación fijo, que permitirán hacer un estudio detallado del proceso que sigue la AMC para asignar cierta modulación/codificación
- e. Los resultados se presentarán con gráficas que se generarán en función de varios parámetros: throughput (rendimiento de la tasa de transmisión de datos) y la carga/volumen de datos de dicha transmisión, de los retardos de extremo a extremo de la transmisión, capacidad de los canales de transmisión, y la pérdida de datos a lo largo de las simulaciones realizadas con OPNET

Cabe mencionar que para la parte de la simulación, se tiene un análisis de los resultados obtenidos al utilizar el modelo WiMAX del consorcio “OPNET Academic Tier”, a través de la herramienta de software OPNET Modeler versión 14.5, con la cual se involucra el uso de diferentes licencias:

- Licencia de Modeler
- Licencia de Wireless
- Licencia de Modelo WiMAX

Estas licencias fueron adquiridas por el Posgrado de Ciencia e Ingeniería de la Computación y a través del proyecto PAPIIT IN 104907.

Referente a la herramienta de software elegida, cabe mencionar que se ha revisado la opción del simulador NS2 (Network Simulator), que ya incluye modelado de redes WiMAX, pero como se muestra en [15] solamente maneja la versión fija del estándar (IEEE 802.16-2004) y no cuenta con el soporte para redes móviles (IEEE 802.16e); aunque si incluye una priorización dinámica de niveles de servicio, y una función de Scheduling para los diferentes tipos de servicio que se manejan en el estándar.

Utilizar NS2 no es una opción viable, ya que se tendría que probar si se obtienen los mismos resultados del que ya se encuentra implementado en el modelo actual de WiMAX con OPNET Modeler, es decir, que maneje la calidad de servicio (Quality of Service – QoS) con la misma eficiencia y sobre todo, que se cuente con un soporte técnico como el que ofrece OPNET Technologies Inc. (cuestión muy complicada por tratarse de software libre); y claramente, estas actividades no son el objetivo de esta propuesta de proyecto.

## **1.5 Contribución y relevancia**

Al analizar los mecanismos del funcionamiento de la AMC, se probarán y revisarán los resultados obtenidos, y así, se podrá proporcionar una base teórica a partir de la cual se pueda mejorar el funcionamiento de la AMC, e incluso diseñar un mecanismo de control de potencia que complemente, o mejore algunas características importantes en las redes inalámbricas móviles utilizando el modelo WiMAX de OPNET Technologies.

Este trabajo contribuirá al campo de investigación de redes inalámbricas de banda ancha alrededor del mundo, no solamente para el estándar IEEE 802.16e, sino también ayudará a complementar mecanismos que trabajen bajo principios muy similares, lo cual es muy común en comunicaciones inalámbricas (por ejemplo: telefonía celular, servicios de Internet a dispositivos móviles, etc).

También contribuirá en el área de planeación de implementación de redes inalámbricas de banda ancha, proporcionando la información necesaria para controlar el desempeño de cierta configuración de red, esta información puede ayudar a: determinar ubicaciones de BS, distancias de cobertura, determinar la velocidad de los nodos móviles que puede soportar la red, las tasas de transmisión que se pueden manejar, cantidad de usuarios a los que se les dará acceso, principalmente.

La relevancia que puede tener el proporcionar un estudio detallado del rendimiento de redes inalámbricas móviles orientado hacia el control de la modulación y codificación, tomando en cuenta lo que ya existe, es que puede aportar nuevos datos o hallazgos que no se incluían en los mecanismos estudiados, de esta forma se evita hacer un trabajo redundante para que los resultados obtenidos sean reconocidos, en la comunidad científica mundial, como algo útil para la investigación de redes inalámbricas de banda ancha, principalmente del estándar IEEE 802.16e.

Además, en el campo comercial puede ayudar a las empresas proveedoras de servicios de telecomunicaciones, ya que puede proporcionar información del rendimiento de redes

inalámbricas móviles en diferentes escenarios; y de esta forma ayudarles con la toma de decisiones para establecer los costos y los tipos de servicio que pueden ofrecer al público.

## Presentación de resultados

Para la conveniencia del lector, se incluye la tabla 1.1 de notaciones utilizadas en los capítulos que describen los resultados de esta tesis, donde la mayoría son términos en inglés debido al uso de software que se encuentra en dicho idioma, y genera los resultados con esa terminología; por lo tanto, se decidió seguir manejando esta terminología a lo largo de toda la tesis para conservar la consistencia en los resultados presentados.

Término en inglés	Traducción al español
AMC	Modulación Adaptiva y Codificación
Path Loss (PL)	Pérdida por trayectoria
SNR	Relación señal a ruido
Uplink (UL)	Canal de subida
Down Link (DL)	Canal de bajada
Mobile Station (MS)	Estación móvil
Base Station (BS)	Estación base
Shadow fading	Desvanecimiento de sombra
Throughput	Rendimiento
Load	Carga
Delay	Retardo
End-to-end	Extremo a extremo

Tabla 1.1 Términos utilizados en presentación de resultados

## 1.6 Estructura de la tesis

El **capítulo 2** muestra una introducción a los conceptos básicos de las redes inalámbricas de banda ancha, dando un panorama muy general de la teoría involucrada con el tema.

En el **capítulo 3**, se presenta la descripción del estándar IEEE 802.16e que es la versión móvil, presentando conceptos generales y algunos particulares que se relacionan muy de cerca con modulación y codificación.

El **capítulo 4** incluye modelos teóricos que se relacionan directamente con la parte del análisis del proyecto, esto es, incluyendo las ecuaciones de los modelos teóricos.

En el **capítulo 5**, mediante simulaciones en dos diferentes escenarios de redes móviles, se presentan los resultados y su análisis con respecto a los modelos teóricos y algoritmos; así como una interpretación de esos resultados para cada escenario, describiendo sus características y su posible aplicación en escenarios de redes móviles reales.

El **capítulo 6** presenta las conclusiones generales del proyecto de tesis, describiendo los objetivos alcanzados mediante el análisis de los escenarios propuestos en la presente tesis.

# Capítulo 2

## Conceptos básicos de redes inalámbricas de banda ancha

Debido a que el fenómeno de Internet está produciendo una revolución en la forma de comunicarse de la sociedad, el concepto de redes inalámbricas de banda ancha cada vez está siendo más utilizado; y por esta causa, este capítulo presenta una descripción de los conceptos relacionados con el funcionamiento de las redes inalámbricas de banda ancha.

Después de la descripción general de los temas a tratar en esta tesis, en este capítulo se presentan las principales características de las redes inalámbricas de banda ancha, ya que muchas de ellas se seguirán mencionando a lo largo de los capítulos consecuentes.

### 2.1 Introducción

El concepto inicial de Redes de Banda Ancha se introduce formalmente en Agosto de 1989 en la Asamblea Plenaria de CCITT (actualmente denominado Unión Internacional de Telecomunicaciones - UIT) celebrada en Brasilia, donde se definieron las nuevas redes públicas de servicios integrados.

El aspecto más notable es el de las velocidades superiores a los 155 Mbps. La definición oficial de la UIT es menos ambiciosa, dice que un servicio es de banda ancha cuando requiere canales de transmisión con capacidad mayor que un acceso primario (2048 Mbps). A partir de ese concepto inicial, el mercado ha pasado a utilizar la frase “banda ancha” para referirse a tecnologías que permiten velocidades de acceso del orden de Mbps.

Aunque ya se empieza a cuestionar este concepto y se habla de escenarios que sobrepasen velocidades de 10 Mbps.

Existen muchas tecnologías que han sido consideradas de banda ancha, que actualmente se emplean para ofrecer servicios comerciales y algunas que constituyen la base para futuras redes de acceso, por ejemplo se tienen las siguientes:

Tecnologías cableadas:

- Redes de fibra óptica y cable
- Fibra óptica
- Ethernet first mile

Tecnologías inalámbricas

- redes satelitales
- redes locales inalámbricas
- comunicaciones de teléfonos celulares de 3ª generación
- televisión digital terrestre

### 2.1.1 Estado del arte

WiMAX es una solución diseñada para prestar servicios a nivel comercial en Redes de Área Metropolitana (Metropolitan Area Network - MAN) con capacidad de cobertura en interiores y exteriores, en áreas urbanas y rurales donde no es necesario que se tenga visión directa con las estaciones base. Se trata de un acceso inalámbrico de banda ancha.

Pensando en la célula típica con un radio de 3 a 10 Km, WiMAX puede ofrecer capacidades de transmisión, para usuarios fijos, de más de 40 Mbps (Mega bits por segundo) por canal, por esto, tiene la capacidad de proveer al mismo tiempo cientos de enlaces tipo T1 (tasa de transmisión de 1,544 Mbps) para empresas y miles de enlaces de alta velocidad tipo DSL (Digital Subscriber Line) para uso residencial; y para usuarios móviles puede ofrecer más de 15Mbps en un radio de al menos 3 Km.

El Foro WiMAX integra hoy en día a más de 522 miembros entre operadores y fabricantes de componentes y equipos en el mundo de las comunicaciones.

Una meta del Foro WiMAX es acelerar la introducción de estos sistemas en el mercado; los productos certificados por el Foro son completamente inter operables y soportan servicios de banda ancha fijos, portátiles y móviles. El Foro trabaja muy de cerca con los proveedores y reguladores para asegurarse que los sistemas certificados por el Foro WiMAX cumplen con los requisitos del cliente y el gobierno.

Cabe mencionar que los estándares de la IEEE describen la capa Física y la de Control de Acceso al Medio (Media Access Control – MAC), pero con esto no se asegura la interoperabilidad, las restricciones de radio frecuencia o los niveles mínimos de rendimiento. Y como se dijo en el párrafo anterior, estas funciones son asumidas por el Foro WiMAX.

Como ya se mencionó en el capítulo 1, la IEEE ha llegado al punto de basar la tecnología WiMAX en solamente dos modalidades del estándar que son:

- IEEE 802.16-2004 (Fijo)
- IEEE 802.16e (Móvil)

### *IEEE 802.16-2004 (Fijo)*

En [1][8] se describe que el estándar IEEE 802.16-2004 es una revisión y nueva versión de los estándares 802.16a y 802.16d; está diseñado para las redes inalámbricas con nodos fijos ya sea en interiores o exteriores. Se utiliza una antena que generalmente va en los techos de casas o edificios como se hace con antenas de televisión satelital, teniendo comunicación con la estación base con o sin línea de vista.

Las bandas en las que funciona son: 2.5, 3.5 y 5.8 GHz.

El control de Acceso a Medios es optimizado para enlaces de gran distancia ya que está diseñado para tolerar retardos más largos y variaciones de retardo. El estándar utiliza Multiplexación por División de Frecuencias Ortogonales (OFDM), la señal OFDM está dividida en 256 canales en lugar de los 64 del estándar IEEE 802.11

### *IEEE 802.16e (Móvil)*

En diciembre del 2005, la IEEE aprobó el estándar del WiMAX Móvil, utilizar las comunicaciones inalámbricas del estándar IEEE802.16 con receptores en movimiento; y ahora que ya se cuenta con las especificaciones técnicas del hardware para WiMAX móvil, muchos fabricantes de hardware se han interesado ya que el mercado de redes inalámbricas es más atractivo para ellos hoy en día.

En [1][8][21] se describe como este estándar utiliza el Acceso Múltiple por División Ortogonal de Frecuencia (OFDMA), similar a OFDM con la característica adicional que agrupa múltiples subportadoras en subcanales; una sola estación suscriptora podría utilizar todos los subcanales en un periodo de transmisión, o múltiples estaciones suscriptoras podrían transmitir simultáneamente utilizando una porción del total de subcanales.

En la definición del problema del capítulo 1, se menciona que se cuenta con la nueva característica propia del estándar IEEE 802.16e: la Modulación Adaptiva y Codificación.

De acuerdo a [10], la AMC tiene varias etapas de codificación y modulación de la información a transmitir; y también permite la permutación de subcanales (bloques de subportadoras continuas) y así, la AMC permite diversidad multiusuario por medio de la selección del subcanal con la mejor respuesta en frecuencia.

El marco teórico de la tesis incluirá conceptos de:

- Definición de funcionamiento y componentes de las capas MAC y Física (PHY) del estándar IEEE 802.16e, y especialmente los involucrados con modulación y codificación conceptos definidos en [1][2][3][4][5][7][8][11][12][13]
- Conceptos básicos de las diferentes modulaciones (BPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM) que se incluyen en el modelo del consorcio "OPNET Academic Tier". Encontrados en [7][8][11][13]
- La modulación adaptiva y codificación debe contemplar los diferentes modelos de propagación, el vehicular y el peatonal, como se menciona en [1][2][8][13]

- El manejo de conceptos relacionados con el control de modulación y codificación de los nodos móviles [5][6][7][11], como Eb/No (o SNR – Signal to Noise Ratio - Razón señal a ruido), tasa de rendimiento (Throughput), utilización de los canales, retardos, principalmente

Además, en [1][2][7] se menciona que para WiMAX móvil las principales modulaciones para el canal de bajada (Down Link - DL) son QPSK (Quaternary Phase Shift Keying), 16-QAM (Quadrature Amplitude Modulation) y 64-QAM mientras que en el UL la modulación 64-QAM es opcional, además soporta codificaciones de códigos convolucionales y turbo-códigos.

Cabe mencionar que también como parte importante del análisis teórico, se tienen dos conceptos importantes que se mencionarán a lo largo del desarrollo de la tesis:

- *RSSI (Receive Signal Strength Indication)*

En [9] se define como la predicción del nivel de intensidad de la señal recibida, la potencia de emisión de la BS menos las pérdidas por propagación.

El proceso por el cual las mediciones de RSSI son tomadas no requiere necesariamente un candado de demodulación del receptor; por esta razón las mediciones de ofrecen un buen nivel de confiabilidad en los cálculos del canal, incluso en niveles bajos de señal. Por otro lado, aunque las mediciones CINR requieren un candado del receptor, proporcionan información de la condición actual de operación del receptor, incluyendo niveles de interferencia y ruido, y fuerza de la señal.

- *CINR (Carrier to Interference plus Noise Ratio)*

En [10] se menciona que al igual que con RSSI, cuando la BS solicita las mediciones de CINR, una SS debe obtener dichas mediciones. Desde una sucesión de estas mediciones, la SS derivará y actualizará los estimados de la media y la desviación estándar de la CINR, y los reportará por medio de mensajes específicos. Estas estadísticas debe reportarse en unidades de dB.

Las mediciones de calidad de la señal RSSI y CINR y las estadísticas asociadas pueden ayudar en ciertos procesos como la selección/asignación de BS y selección de perfil adaptivo de ráfaga. Como un comportamiento del canal es el tiempo-variante, tanto la media como la desviación estándar se definen. Es obligatorio tener las estadísticas de RSSI y CINR y sus reportes.

Finalmente, se presentan los resúmenes de algunos artículos de la IEEE, que muestran resultados de proyectos recientes, enfocados a analizar diferentes parámetros de rendimientos de redes inalámbricas móviles, donde se involucra el concepto de la modulación adaptiva:

- *Real-Time Video Multicast in WiMAX Networks*

De acuerdo a [23] WiMAX es una tecnología que promete ser una buena opción para redes de banda ancha, los servicios de video en tiempo real son un tipo de aplicación que es soportado.

Para enfrentar esto, se considera una combinación de multicast, video codificado por capas, y modulación adaptiva para las transmisiones. Así, se desarrollaron algoritmos que aseguran la entrega del video de manera eficiente, justa y exacta en WiMAX.

La aproximación mostrada en este artículo referente a video por capas, consiste en que el flujo de datos de video se divide en múltiples capas, y cada capa sucesiva mejora la calidad del video.

Lo que principalmente se muestra en este documento, son algoritmos (de baja complejidad y eficientes) que resuelven el problema de asignar localidades para soportar servicios de transmisión de video (en tiempo real) en multicast en redes WiMAX.

Se presenta una validación experimental, utilizando un escenario con una estación base y estaciones suscriptoras móviles y fijas, manteniendo un número constante de 100 usuarios con multicast.

Las principales contribuciones de este trabajo son: desarrollo de algoritmos MAC que combinan la modulación adaptiva con video por capas, para optimizar la percepción de la calidad del video, y ayuda a evaluar el desempeño de un sistema y el impacto de diferentes parámetros en las simulaciones. Se comenta que este trabajo puede utilizarse para sistemas reales ya que podrá convivir con otro tipo de aplicaciones (que toleren retardos).

- *Cross-layer adaptation for real-time broadband multimedia over IEEE 802.16e networks*

El mecanismo que se presenta en [24] se encarga de coordinar adaptaciones de la modulación, de la potencia de transmisión y de la tasa de codificación de medios, utilizando la información que proporcionan las capas MAC y PHY.

Por medio de simulaciones se demuestra que al utilizar el mecanismo propuesto, se incrementa la capacidad del sistema, se reduce la pérdida de paquetes y se mejora el consumo de energía, incluso en situaciones de gran congestión y movilidad de usuarios.

Los principales parámetros de calidad de servicio, en los que se basa este mecanismo para la toma de decisión de adaptación son, la tasa de pérdida de paquetes y el retardo promedio.

El algoritmo de decisión se inicia cada vez que una conexión enfrenta una pérdida de paquetes inaceptable; y se describen posibles acciones a tomar dependiendo de la razón de estas pérdidas.

Y para tener un desempeño eficiente, el algoritmo también toma decisiones de adaptación cuando la situación de la conexión mejora.

En cuanto al modelo de simulación y resultados, comprende una evaluación mediante la comparación de otros mecanismos predecesores con el propuesto. Para finalmente,

llegar a la conclusión de que sí se mejora la capacidad del sistema con tráficos de información pesados (respecto a los otros mecanismos).

- *A latency and modulation aware bandwidth allocation algorithm for WiMAX base stations*

Debido al problema de interferencia y retardos en comunicaciones de larga distancia, las aplicaciones en tiempo real se afectan mucho, por esta razón, en [25] se presenta un algoritmo de asignación llamado Highest Urgency First (HUF), la urgencia más alta primero; el cual considera los esquemas de modulación y codificación, junto con el nivel de urgencia de las solicitudes.

Los resultados de la simulación comprueban que realmente se toman en cuenta las modulaciones, ya que se alcanzan los objetivos de establecer las subtramas para los canales de bajada y subida, al reservar el ancho de banda para las solicitudes más urgentes.

El algoritmo parte de tres principios/objetivos a cumplir:

1. Tener un esquema de asignación tipo GPSS (grant per subscriber station)
2. Los tipos de modulación y codificación deben ser adaptivos de acuerdo a distancia e interferencia
3. Por encima de otros parámetros de calidad de servicio, la latencia máxima es la más crítica a considerar

Las premisas a cumplir se pueden listar como sigue:

- Considerar la modulación/codificación adaptiva en capa física, y el traducir la solicitud de ancho de banda en número de ranuras de tiempo (slots) apropiado
- Las clases de servicio deben satisfacerse de acuerdo a los parámetros de calidad de servicio, por ejemplo: máxima latencia
- Justicia: evitar que los servicios que tienen baja prioridad, se queden sin asignación de ranuras de tiempo

En la presentación de resultados, y de escenarios de evaluación, solamente se usa rtPS y BE (ya que UGS y ertPS tienen asignación de ancho de banda fijo), se usó transmisión de videoconferencia, y los resultados presentados son comparaciones con otros algoritmos similares, a los cuales superó.

- *Performance evaluation of mobile WiMAX with AMC y MIMO tradeoffs*

El estudio presentado en [26], es acerca del desempeño de redes WiMAX desde la perspectiva de MIMO (múltiples entradas, múltiples salidas) y AMC, estudia el impacto de las técnicas MIMO, junto con la AMC en el desempeño de redes móviles WiMAX.

WiMAX soporta también MIMO dinámico, además de SD (Spatial Diversity) y SM (Spatial Multiplexing).

Todo se enfoca a maximizar la eficiencia espectral sin reducir el área de cobertura. Se hicieron simulaciones utilizando la herramienta AIRCOM International's Network Tool (ASSET).

Se tienen dos matrices para los tipos de MIMO, matriz A y B.

La matriz A, para SD, que corresponde a la diversidad espacial, es una técnica que captura la ganancia de diversidad al transmitir un simple flujo de datos hacia múltiples antenas.

La matriz B para MS, que es multiplexación espacial, mejora la capacidad del sistema al transmitir flujos de información separados en cada antena en el canal de bajada, la ganancia de capacidad de esta matriz es linealmente dependiente del número de antenas de transmisión y recepción.

Se presenta un análisis por matriz (A y B), para llegar a la conclusión de que para incrementar la capacidad y cobertura de la red, se puede lograr eligiendo de manera adaptiva el tipo de MIMO, así como el de Modulación/codificación.

- *Simulation based comparison of different modulation schemes for mobile WiMAX using TCP and its variants*

En [27] el concepto clave es la modulación adaptiva y codificación, vista como la técnica que habilita un sistema WiMAX para optimizar el rendimiento basado en condiciones de propagación.

Se presenta un resumen sobre AMC, y de las variantes del protocolo TCP utilizados en el trabajo presentado en este artículo (TCP, TCP Reno, TCP Vegas, TCP New Reno, TCP Sack1, TCP Fack).

Los resultados presentados muestran que la evaluación se hizo variando el tráfico, y que utiliza estaciones móviles en una topología punto a punto con tráfico FTP; y se revisaron diferentes escenarios para cada tipo de TCP, asimismo, se asignó una modulación/codificación diferente para cada escenario.

Se compararon el rendimiento por cada tipo de TCP para una modulación/codificación seleccionada. Finalmente, se obtuvo que TCP Reno fue el mejor para todas las técnicas de modulación digital utilizadas por la AMC en WiMAX.

## **2.2 Acceso inalámbrico de banda ancha (Broadband Wireless Access – BWA)**

Acceso inalámbrico de banda ancha, así se le conoce a los sistemas que utilizan estaciones base para proveer en banda ancha, voz, datos y video para negocios u hogares. Ofrece una alternativa para enlaces de acceso por cable de tecnología de punta. Una red de banda ancha debe permitir la transmisión de audio y video, tanto en tiempo real como sobre demanda.

**Generalidades:**

- Soporta varios sistemas y varias bandas de frecuencia
- Tiene una configuración similar a la celular
- El receptor es fijo (típicamente utilizando una antena direccional en un techo)
- Compite con los servicios cableados establecidos, tales como teléfono, televisión por cable, y servicios cableados de Internet tales como cable módem, DSL y fibra óptica
- Se pueden utilizar para servicios de rápido despliegue, para grandes poblaciones (en países donde los servicios de teléfono o televisión por cable no existen a lo largo de todo su territorio)
- Utilizan bandas de micro o mili ondas entre 2 y 45 GHz
  - o Un ancho de banda de frecuencia ancha ubicada desde la posición de cientos de MHz hasta poco más de 1 GHz
  - o Tiene comunicaciones bidireccionales
  - o Se puede utilizar para la transmisión de voz, datos y video (video conferencias, video on demand, pago por evento, etc.)

**2.2.1 Estándares de Acceso Inalámbrico de Banda Ancha (IEEE 802.16)**

El IEEE 802.16 es un estándar para redes de área metropolitana inalámbricas (Wireless Metropolitan Area Network - WMAN), publicado en abril del 2002.

El estándar IEEE 802.16 también hace referencia a un sistema BWA con una alta tasa de transmisión de datos y largo alcance (hasta de 50-60 km), escalable, y que permite trabajar en bandas del espectro licenciado y no licenciado.

El servicio tanto móvil como fijo, se proporciona utilizando antenas sectoriales tradicionales o bien antenas que se adapten con modulaciones flexibles que permitan intercambiar ancho de banda por alcance.

El grupo de trabajo IEEE 802.16 está trabajando para establecer estándares para sistemas BWA, con la finalidad de hacer que los equipos de diferentes fabricantes sean compatibles, y de reducir los costos de los equipos para que crezca su introducción al mercado.

Algunos de los estándares de Redes de Área Metropolitana inalámbricas que han formado parte del grupo de IEEE 802.16 son:

- 802.16.1 – Interfaz aérea (capas física y MAC) para sistemas BWA fijos, para bandas de frecuencia de 10 a 66 GHz, requería línea de vista entre la estación base y el usuario
- 802.16.2 – Buscaba la coexistencia de sistemas BWA para la banda 10-60 GHz
- 802.16.3 u 802.16a – Interfaz aérea para sistemas BWA en bandas licenciadas para las bandas de 2 a 11 GHz
- Un proyecto propuesto: Humano inalámbrico – MAN inalámbrica sin licencia de alta velocidad, interfaz aérea para bandas no licenciadas desde 2 a 11 GHz haciendo énfasis en la banda de 5 GHz

A continuación se da una breve introducción de los estándares más notables, para el área de estudio de esta tesis, del grupo IEEE 802.16:

- *IEEE 802.16a*

El IEEE 802.16a es un estándar para WMAN, publicado en abril del 2003. para las bandas entre 2 y 11 GHz, no necesita de línea de vista directa. Configuración Mesh (todos a todos, posible comunicación sin estación base)

Puede tener una cobertura de hasta 50 km desde la estación base, alcanzar una velocidad de 70 Mbps con canales de 20 MHz. La estación base puede ofrecer acceso a Internet de banda ancha corporativo hasta 60 empresas (a 2 Mbps) y cientos de clientes residenciales (a 256 kbps) en forma simultánea.

- *IEEE 802.16-2004*

[1] es el estándar aprobado en junio del 2004, brinda acceso inalámbrico fijo, por lo tanto, se presenta como la tecnología que sustituye a DSL o que competirá con tecnologías cableadas. Ofrece la ventaja de dar acceso de voz y banda ancha en áreas rurales donde no exista ninguna otra tecnología cableada, y tratar de instalar una red cableada resultaría muy costoso.

También es una solución viable para mejorar el acceso de WiFi convirtiéndose en el Backhaul inalámbrico para sus puntos de acceso, y potencialmente para redes celulares, dependiendo del espectro utilizado.

- *IEEE 802.16-2005 (802.16e)*

Con la finalidad de unificar el mundo de la telefonía móvil y las redes de datos, en diciembre del 2005 fue creado el Grupo de trabajo IEEE 802.16e, y se publicó el estándar [17], para mejorar y optimizar el soporte que combinara las capacidades de comunicación en escenarios móviles y fijos, en frecuencias menores a los 6 GHz.

Finalmente, cabe mencionar que existen los grupos de trabajo IEEE 802.16f (2005) e IEEE 802.16g (2007), los cuales se encargan de las interfaces que administrarán la operación fija y móvil. También existen más versiones que se salen del alcance de esta introducción, tales como h, i, j, k, y algunos todavía se encuentran en desarrollo.

## **2.3 Modelos de propagación**

Existe el modelado del canal de radio, que es la parte más difícil del diseño del canal de radio; el cual se ha hecho en forma estadística basándose en medidas tomadas específicamente para sistemas de comunicación o propuestos o para asignación de espectro.

Se basa en predecir la intensidad de la señal a cierta distancia del transmisor y toma en cuenta también, la variabilidad de la intensidad de la señal en las cercanías de ubicaciones específicas.

El modelado del canal incluye los modelos de propagación, donde se calculan las pérdidas en la potencia de la señal recibida en el receptor (calculando una potencia promedio) debidas a diferentes variables que forman parte del medio donde se realiza la comunicación.

La potencia promedio recibida se ha modelado utilizando modelos teóricos y modelos empíricos, donde los modelos teóricos son más generales y los empíricos se hacen muy particulares.

Dependiendo el tipo de configuración de red que se tenga, será el modelo de propagación que se utilice.

Entre las características del fenómeno de propagación en redes inalámbricas tenemos:

- Atenuación promedio - se da conforme el usuario móvil se aleja de la estación base (antena)
- Fluctuaciones lentas (llamadas también shadow fading y log-normal fading)
- Fluctuaciones rápidas (llamadas también fast fading y Rayleigh/Ricean fading)
- Variaciones en las fluctuaciones debidas a la velocidad (llamadas también efecto doppler)

### **2.3.1 Fluctuaciones lentas**

Son interferencias en la señal transmitida por la aparición de obstáculos, tales como un árbol o una pared entre el usuario y la estación base.

La potencia recibida varía aleatoriamente alrededor de la potencia promedio. Una buena aproximación es asumir que la potencia (medida en dB) sigue una *distribución Gaussiana* o normal, centrada en su valor promedio con desviación estándar que varía entre los 6 y 10 dB. A esta distribución de probabilidad de potencia se le denomina *distribución log-normal*, y este fenómeno es lo que se conoce como shadow fading.

### **2.3.2 Fluctuaciones rápidas**

Se dan debido a los rebotes en la señal transmitida. Mientras menores sean las distancias (en términos de longitud de onda) mayor será la variación de la señal. Si el receptor se mueve una mínima parte de longitud de onda, la señal puede variar varios dB.

### **2.3.3 Variaciones en las fluctuaciones debidas a la velocidad**

Son variaciones que se dan por el movimiento, y se basan en el tiempo y puede haber variación sobre variaciones. La velocidad del usuario móvil con respecto a la señal, introduce una frecuencia doppler. La frecuencia es positiva conforme se acerca a la estación base (antena), y es negativa conforme al alejarse de la estación base.

### **2.3.4 Multitrayecto (Multipath)**

Un problema que enfrentan las comunicaciones inalámbricas es la presencia del efecto multitrayecto (Multipath) durante la transmisión (se genera en el canal de transmisión).

Si se tiene un ambiente multirrayecto, el camino entre el transmisor y el receptor tiene múltiples reflexiones u obstrucciones que provocan que la señal transmitida se refleje por una gran cantidad de objetos

Al darse esta condición, la señal alcanza al receptor por diferentes caminos, cada camino es una señal que es copia de la original, y cada una tiene un retardo y una ganancia ligeramente diferentes. Esos retardos causan cambios de fase en la componente principal de la señal produciendo una degradación en la señal.

En el multirrayecto, las señales que se reflejan vienen con cierto retraso y se suman a la señal principal, y de esta forma causan ganancias en la amplitud de la señal o grandes atenuaciones, esto significa que la señal casi se destruye o el nivel de la señal queda tan bajo que el receptor no puede distinguirla.

En la figura 2.1 a) se muestra el espectro de una señal, la línea oscura muestra la respuesta que es deseable para el canal.

La respuesta de un canal que tiene un debilitamiento por multirrayecto se muestra en la figura 2.1 b) se puede observar como en algunas frecuencias de la banda no se puede transmitir información, estas frecuencias son las llamadas frecuencias con desvanecimiento profundo (deep fading), esta forma del canal es llamado canal con desvanecimiento selectivo de frecuencia (frequency selective fading), porque no ocurre de manera uniforme, si no, que ocurre solamente en algunas frecuencias específicas que dependerán del entorno.

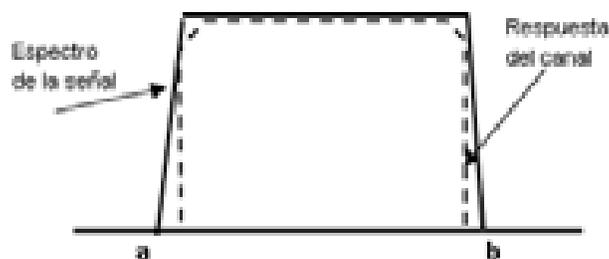


Figura 2.1 a) Respuesta en frecuencia deseada de un canal

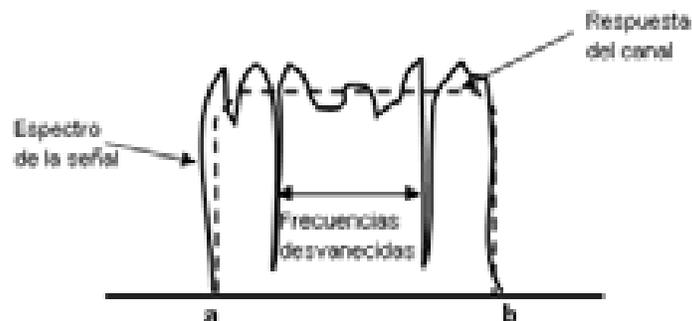


Figura 2.1 b) Respuesta en frecuencia de un canal con desvanecimiento selectivo de frecuencia

Con una señal OFDM se tiene la ventaja de que cuando se transmite en un canal donde hay desvanecimiento selectivo de frecuencia, el espectro de la señal OFDM solamente se afecta en las subportadoras que utilicen frecuencias con desvanecimiento profundo. De esta forma, si un símbolo se destruye por esta razón, solamente pierde una pequeña parte de bits, que pueden recuperarse mediante códigos de corrección de errores. Esto se muestra en la figura 2.2, en donde el sólo dos subportadoras son afectadas por el desvanecimiento selectivo.

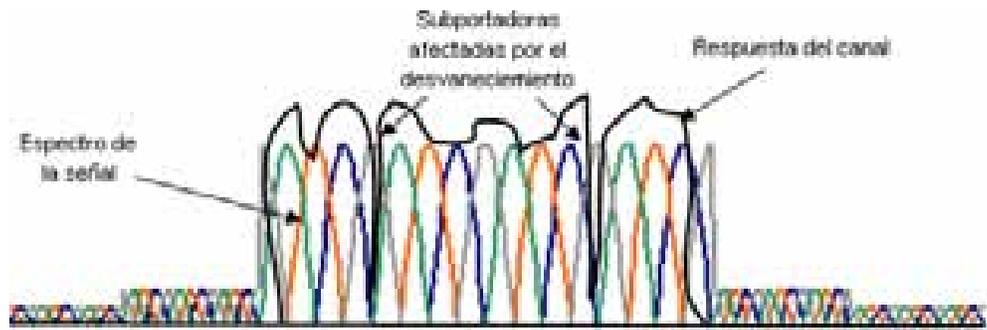


Figura 2.2 Respuesta en frecuencia de un canal con desvanecimiento selectivo de frecuencia que transmite OFDM

Otros parámetros que se relacionan con el fenómeno de propagación son:

- La dispersión de retardo: interferencia intersímbolo, y para tratar de que esa dispersión disminuya, se alarga el tiempo de transmisión de cada símbolo y así no interfiera con el siguiente a recibirse
- Los desvanecimientos profundos: se experimentan grandes variaciones de amplitud y de fase en distancias cortas
- La interferencia destructiva del desvanecimiento profundo puede causar grandes cambios en la señal recibida
- Los desvanecimientos profundos son importantes datos estadísticos ya que son de gran ayuda para diseñar códigos de control de errores en comunicaciones móviles

## 2.4 Tipos de multiplexación

### 2.4.1 TDD (Time Division Duplex)

En este método, un solo canal en frecuencia es asignado para transmitir y para recibir. El tráfico UL como DL utilizan la misma frecuencia pero en diferentes tiempos.

TDD divide el flujo de datos en frames (tramas, segmentos), y en cada frame, asigna diferentes ranuras (slots) de tiempo para las transmisiones que van y vienen. Esto permite a ambos tipos de transmisión, compartir el mismo medio de transmisión (por ejemplo la misma frecuencia), y solamente se está utilizando el ancho de banda requerido para cada tipo de tráfico.



Figura 2.3 Asignación de canales con TDD

Características principales:

- Como TDD puede asignar dinámicamente el tamaño de los slots de tiempo asignados para transmitir y recibir, un operador puede definir el porcentaje de los canales UL y DL
- No se requiere de una banda de guarda para separar los canales UL y DL porque ambos utilizan la misma frecuencia, sin embargo, si se requiere de un periodo de guarda para la sincronización y los tiempos entre cambios de canal UL y DL
- Como la asignación de UL/DL es dinámica, existe muy poco desperdicio de espectro por las operaciones asimétricas, por ejemplo en las aplicaciones con tecnología de punta, el tráfico UL es comúnmente una parte del tráfico DL

### 2.4.2 FDD (Frequency Division Duplex)

Al utilizar este método, se asigna un canal de frecuencia al transmisor y otro de diferente frecuencia al receptor, para obtener comunicación en dos direcciones en un mismo instante de tiempo.

La estación base puede recibir tráfico de UL y simultáneamente transmitir en el canal DL. FDD se utiliza normalmente con aplicaciones que requieren un mismo ancho de banda para UL y para DL.

Debido a los altos costos de los diseño de FDD, en las estaciones suscriptoras a veces se utiliza un método dúplex híbrido llamado HFDD (half-duplex FDD); se parece mucho a TDD, ya que el dispositivo transmite y recibe en diferentes tiempos, pero también utiliza diferentes frecuencias para transmitir y recibir con una estación base FDD, así que solamente se puede tener una capacidad de transmisión de la mitad de un sistema completo FDD (FDD para la estación base y la estación suscriptor).



Figura 2.4 Asignación de canales con FDD

Características principales:

- Por su naturaleza simétrica de los canales de transmisión FDD es un buen método para aplicaciones de voz
- Se requiere separar los canales UL y DL con bandas de guarda que tienen un tamaño del doble de uno de los canales (UL o DL)
- Una vez que se asigna el ancho de banda del canal, la ubicación UL/DL ya no se puede cambiar, por esto las aplicaciones asimétricas dejan espectro sin usar

En resumen, ambos métodos pueden ofrecer muchas ventajas si se les utiliza correctamente:

- Para aplicaciones de tecnología de punta, como WiMAX que usa un rango de frecuencia de 2 a 11 GHz y permite conexiones sin línea de vista, utilizando transmisiones de baja longitud de onda y así evitan ser afectadas por obstáculos pero significa que tenemos un tráfico asimétrico y por lo tanto es mejor utilizar TDD
- Para aplicaciones de telefonía celular que requiere conexiones con línea de vista, se tiene una conexión más fuerte y estable y por lo tanto, es capaz de enviar mucho más información con menos errores; este tipo de transmisiones se hace en frecuencias más altas, con rangos que pueden alcanzar los 66 GHz; en frecuencias más altas existe menos interferencia y mucho más ancho de banda. FDD es mejor para este tipo de aplicaciones porque se trata de un tráfico simétrico

## **2.5 Técnicas de acceso al medio**

### **2.5.1 FDMA (Frequency Division Multiple Access)**

El Acceso Múltiple por División de Frecuencia divide el espectro disponible en canales de diferentes rangos de frecuencia, para asignar diferentes canales (frecuencias) a los usuarios.

Se utiliza en comunicaciones analógicas y digitales, principalmente de radio frecuencia, entre ellos telefonía celular GSM (Global System for Mobile Communication).

### **2.5.2 TDMA (Time Division Multiple access)**

Al Acceso Múltiple por División de Tiempo se le considera un sistema de circuitos, similar al de un sistema telefónico. Las señales digitales son enviadas sobre canales en ranuras de tiempo (slots) específicas, esto es, se pueden asignar canales en una misma frecuencia pero en diferentes periodos de tiempo.

Utilizado para telefonía celular, pero en general varios estándares digitales hacen uso de esta técnica.

### 2.5.3 FDMA/TDMA

Esta modalidad combina ambas técnicas para obtener una asignación por slots y en cierta frecuencia, es decir, la asignación incluye el tiempo y la frecuencia como si fuera un tablero de  $m$ -slots x  $n$ -frecuencias,  $m \times n$  canales en el sistema.

### 2.5.4 CDMA (Code Division Multiple Access)

El Acceso Múltiple por División de Código es una técnica que se basa en códigos, un canal CDMA tiene asignado cierto código, y así, muchos usuarios pueden transmitir simultáneamente, si a cada uno se le asigna un código diferente.

Estos códigos son seleccionados para ser ortogonales entre ellos, es decir, un receptor con cierto código puede decodificar la señal usando la operación del producto punto (que debe ser igual a cero) sobre la señal recibida, debido a la ortogonalidad todos los demás códigos serán rechazados (su producto punto con la señal recibida no es igual a cero).

Esta técnica es muy utilizada en telefonía celular, ya que ofrece la ventaja de poder reutilizar códigos en células vecinas

### 2.5.5 OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing)

En la Multiplexación por División de Frecuencias Ortogonales, el espectro disponible se divide en múltiples subcanales que a su vez son asignados a subportadoras (una subportadora para cada subcanal).

Las subportadoras (subcarriers) son ortogonales entre sí en el dominio de la frecuencia. Ortogonalidad significa que el pico de cada señal coincide con el inicio de unas señales y con el fin de otras, las subportadoras están separadas por  $1/T_s$  (duración de un símbolo).

En la figura 2.5 se observa que existen varios tipos de subportadoras, a continuación se describen:

- Subportadoras de datos – para la transmisión de datos
- Subportadoras piloto – para diferentes propósitos de estimación
- Subportadoras de guarda – son subportadoras nulas que no transmiten nada
- Subportadora nula DC – usualmente se localiza en el centro (dependiendo del fabricante) y como las de guarda, no transmite nada

Esta modulación también se conoce por el nombre de modulación por multitono discreto (Discrete Multitone Modulation – DMT), y la información que llevan las subportadoras se modula con modulación en fase o de amplitud en cuadratura (PSK, QAM, y se describen en la siguiente sección).

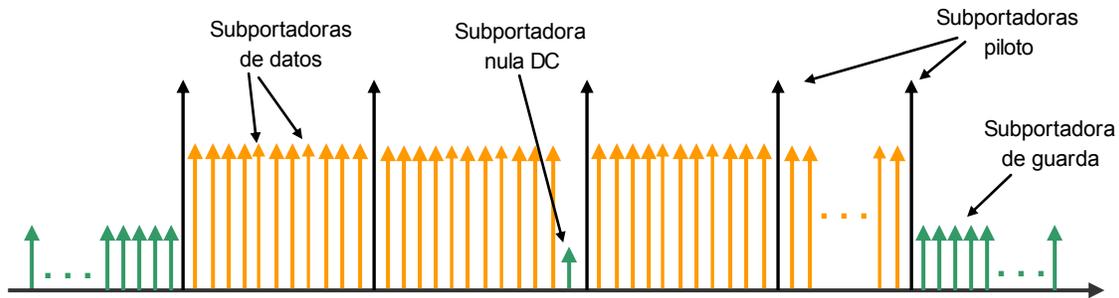


Figura 2.5 Descripción de frecuencia OFDM

Entre las ventajas que podemos encontrar al usar OFDM son:

- Brinda Eficiencia espectral - las subportadoras no interfieren entre sí
- Es robusto frente a interferencia de banda angosta, esta interferencia afectará máximo a un par de subcanales; la información de estos canales afectados puede borrarse y recuperarse vía los códigos FEC (forward error correction)
- Cuenta con una excelente robustez en ambientes multitraectoria (multipath):
- El prefijo cíclico permite al receptor capturar la energía multipath más eficientemente
- El prefijo cíclico preserva la ortogonalidad entre subportadoras
- Proporciona la facilidad de acoplarse a regulaciones a nivel mundial (las bandas y tonos pueden activarse o desactivarse dinámicamente para acoplarse a las cambiantes regulaciones)
- Ofrece buena coexistencia con sistemas actuales y futuros. (por la misma razón que el punto anterior)

### 2.5.6 OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access)

El acceso múltiple por división de frecuencias ortogonales, está basado en la modulación OFDM, y está diseñado para operar en modo NLOS en las bandas de frecuencia debajo de los 11 GHz.

En el capítulo 3, en la sección 3.3 de capa Física, se describe el concepto con más detalle.

## 2.6 Modulación y codificación

Modulación es el proceso con el cual cierto parámetro de alguna señal se hace variar de acuerdo a otra señal, es decir, se monta una señal sobre otra que se transmite mejor, para poderla transportar a larga distancia sobre un medio determinado. Este medio físico puede ser cable coaxial, fibra óptica, aire, entre otros.

Cuando se tiene una señal modulada que se envía, en el lado receptor debe remodularse dicha señal para obtener la señal original que se envió.

La modulación también permite enviar varias señales simultáneamente.

Existen modulaciones de señales analógicas como la Amplitud Modulada (radio AM) y la Frecuencia Modulada (radio FM), y modulaciones de señales digitales.

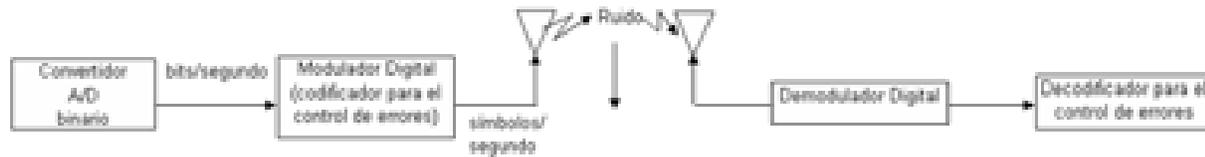


Figura 2.6 Modulación digital

Existen varios tipos de modulaciones digitales:

- Modulación en amplitud
- Modulación en frecuencia
- Modulación en fase

### 2.6.1 Modulación en amplitud - ASK (Amplitude Shift Keying)

Se traduce como conmutación por movimiento en amplitud, tiene un espacio vectorial unidimensional.

Se vuelve más vulnerable al ruido al aumentar el número de vectores, pero se ahorra ancho de banda. Se puede representar con una función base (unidimensional con vectores en un eje).

La relación bit-símbolo no es arbitraria, se usa *código Gray* para que solamente cambie un bit entre vecinos.

### 2.6.2 Modulación en frecuencia - FSK (Frequency Shift Keying)

Se usa con modulación ortogonal, es M-ario (M-frecuencias ortogonales) M-dimensional.

El ruido, sin importar el tamaño del alfabeto (M), necesita la misma potencia para convertir la señal de salida (recibida), si crece M se consume más ancho de banda. Es robusta respecto al ruido.

### 2.6.3 Modulación en fase - PSK (Phase Shift Keying)

Es con señalización coherente, se requiere una señal de referencia para medir, comparar, saber la fase de la señal recibida, y determinar si es un 0 o un 1.

La modulación de fase es bidimensional. Tiene vectores desfasados, M-vectores en un círculo (bidimensional) con dos funciones base (x, y). Al aumentar M, el ruido aumenta, es decir, al aumentar el número de bits a transmitir (tasa transmisión), mayor será la sensibilidad al ruido debido a que disminuye el margen de amplitud entre los posibles estados; aunque ahorra ancho de banda.

En general, en la modulación digital tenemos que con un modulador de más bits: 2 bits por símbolo, obtenemos sistema cuaternario QASK, QPSK, QFSK. Baja la velocidad de la modulación con respecto a la entrada.

En el caso 8-ario 8ASK, 8PSK y 8PSK (el registro es de 3 bits) son 3 bits/símbolo, ahora el ritmo de cambio a la salida es el triple del cambio de entrada; y así generalizando se habla de un modulador M-ario donde:

$$M = 2^m \quad \text{y se tiene que } T = m \cdot T_b \quad \text{donde } T_b \text{ – duración de 1 bit}$$

$$\text{Entonces } R_s = R / m \quad R_s = 1 / T \quad R = 1 / T_b$$

En la modulación en fase, existen dos conceptos que se refieren al estado de la señal transmitida, se dice que una señal está en fase cuando su ángulo de fase es de 0 (eje Y); y una señal en cuadratura es cuando una señal está desfasada 90° respecto a la señal en fase (eje x).

Para poder tener una visualización clara del ambiente de modulación digital que se utiliza, se maneja una representación de señales a partir de su constelación. Una constelación es una representación geométrica de señales en un espacio de n-dimensiones, donde se pueden visualizar todos los símbolos posibles de salida, que puede generar cierto modulador.

La figura 2.7 muestra un ejemplo de cómo se pueden visualizar algunas constelaciones con modulación en fase.

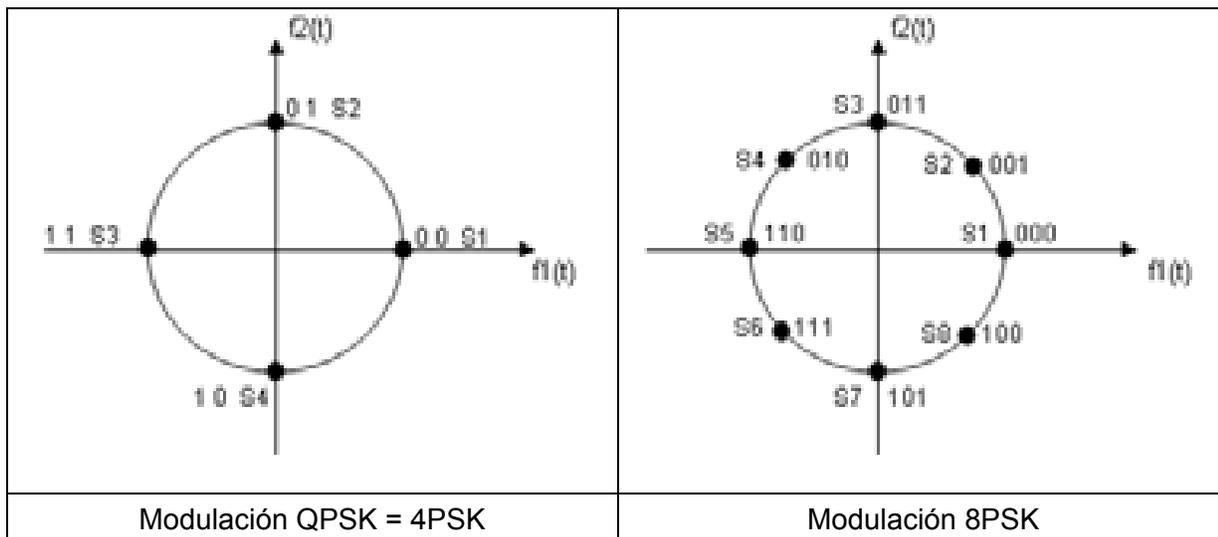


Figura 2.7 Constelaciones de modulaciones PSK

### 2.6.4 Modulación QAM (Quadrature Amplitude Modulation)

Esta modulación de amplitud en cuadratura es una modulación que se basa en vectores y se basa en modulación de fase pero actúa sobre la amplitud también.

Puede manejar niveles (distintas amplitudes de la señal) que permiten conseguir una tasa de transferencia mayor a la modulación de fase QPSK.

La desventaja principal que tiene esta modulación es que conforme aumenta la tasa de transferencia, también aumenta la sensibilidad al ruido, ya que disminuye la amplitud entre los posibles estados; por ejemplo, si hay interferencia de tal magnitud que un estado transmitido se recibe con valor de otro estado válido en la constelación no se considera error de transmisión y el valor se recibe como correcto.

Los dos tipos de modulación QAM que se manejan en las redes WiMAX son el 16QAM (con estados de 4 bits, con un total de  $2^4=16$  estados) y el 64QAM (con estados de 6 bits, con un total de  $2^6=64$  estados).

*Cálculo de la data rate (tasa de transmisión)*

$$D_R \equiv \frac{\beta \cdot \delta}{1 + \gamma} \quad (2.1)$$

donde :

$D_R$  – data rate en bits por segundo  
 $\beta$  - bits por símbolo  
 $\delta$  – ancho de banda del canal  
 $\gamma$  – roll-off factor<sup>1</sup>

El factor de redondeo (roll-off factor) de la ecuación 2.1, es un valor asociado al filtro que se utiliza antes de modular la señal, para evitar la interferencia entre símbolos, por ejemplo cuando se utiliza modulación QAM el factor es de 0.15.

Un concepto importante en la modulación y codificación es el cálculo del ancho de banda, ya que de acuerdo al tipo de modulación y codificación que se esté utilizando, el ancho de banda que se tendrá para transmitir cambiará también.

El Teorema de Nyquist establece que una señal analógica limitada en banda, debería ser muestreada como mínimo con una frecuencia que duplique el ancho de banda de la señal, para ser convertida en una representación adecuada en forma digital y para evitar interferencia entre símbolos (Inter Symbol Interference - ISI); de esta forma, la expresión para este teorema se define así, sea un sistema de transmisión  $R_s$  (símbolos/segundo) donde cada símbolo dura  $T_s$  (segundos), el ancho de banda mínimo  $W_0$  está dado por:

$$W_0 = \frac{1}{2} R_s \quad (\text{valor óptimo}) \text{ donde } R_s = \text{Data Rate}$$

Si por ejemplo, entra una señal binaria al codificador de pulsos multinivel (maneja registros de 2 bits), los símbolos con pulsos de 2 bits (salida  $R_s$ ), con los 2 bits se tienen 4 posibles tamaños de pulsos.

Por lo tanto el ancho de banda ya bajó; si el registro crece mucho, aumentan los pulsos multinivel y los detectores tienen más difícil el saber que dato es, porque el rango dinámico no se mueve y se generan errores. Si el rango dinámico se va a cambiar, se requiere mayor potencia.

<sup>1</sup> valor que determina el exceso de ancho de banda del filtro

## 2.7 Protocolos (TCP, IP, UDP)

### 2.7.1 TCP (Transmission Control Protocol)

En [16] se define como el protocolo diseñado para proporcionar un flujo confiable de bytes end-to-end (desde origen hasta destino) sobre una red interna no confiable.

Cada máquina que soporta TCP tiene una entidad de transporte TCP, ya sea un proceso usuario o parte del kernel la que administre streams (flujos de datos) e interfaces TCP hacia la capa IP. Una entidad TCP acepta streams de datos de usuario desde procesos locales, los divide en pedazos que no excedan los 64kB (en la práctica, usualmente cerca de 1500 bytes), y envía cada pedazo como un datagrama IP separado. Cuando llegan a una máquina los datagramas IP que contienen datos TCP, son entregados a la entidad TCP, la cual los reconstruye a los streams de bytes.

La capa IP (Internet Protocol) no garantiza que los datagramas serán entregados propiamente, así que TCP se encarga de parar la transmisión y retransmitirlos cuando sea necesario. Los datagramas que llegan pueden hacerlo en desorden; también es tarea de TCP reensamblarlos en un mensaje en la secuencia correcta. En pocas palabras, TCP debe armar la confiabilidad que la mayoría de usuarios quieren y que IP no proporciona.

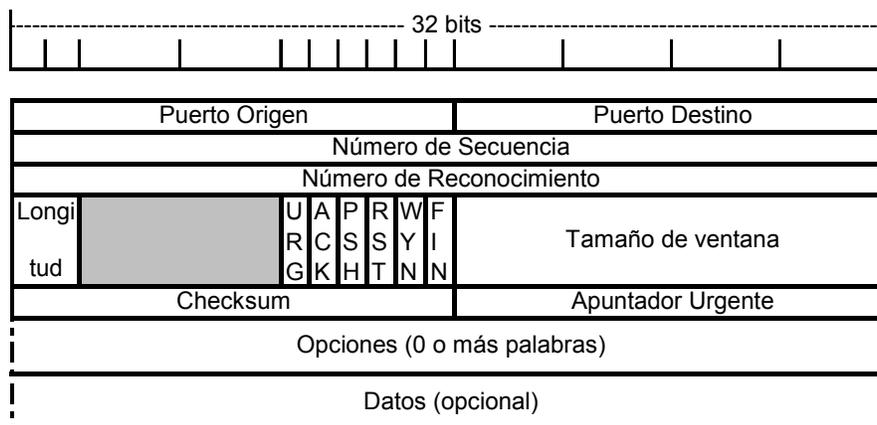


Figura 2.8 Formato de encabezado TCP

La zona gris son 6 bits que nunca se utilizan

**Puerto Origen, Puerto Destino** – Identifican los puntos finales locales de la conexión.

**Num Secuencia / Num Reconocimiento (acknowledge)** – número de stream de datos, para acknowledge se indica el número del siguiente byte que se espera (no el último recibido correctamente).

**Long. encab. TCP** – indica cuantas palabras de 32 bits contiene el encabezado TCP.

**URG** – cuando vale 1 está en uso el apuntador urgente.

**ACK** – está en 1 para indicar que el número de reconocimiento es válido, 0 hace que se ignore dicho campo.

**PSH** – indica datos extraídos (PUSHed). Se le pide al receptor entregar los datos a la aplicación cuando llegan.

*RST* – se utiliza para reiniciar una conexión que se ha vuelto confusa.

*SYN* – establecer conexiones. Solicitud de Conexión SYN=1 ACK=0, y conexión aceptada SYN=1 y ACK=1.

*FIN* – liberar una conexión. Especifica que el transmisor no tiene más datos para transmitir.

*Tamaño ventana* – Indica cuantos bytes pueden ser enviados comenzando en el byte de ACK.

*Checksum* – palabra de 16 bits que sirve para realizar el proceso de checksum del encabezado y datos.

*Apuntador urgente* – indica un desplazamiento (offset) que va desde el número de secuencia actual hasta donde se encuentran los datos urgentes a encontrar.

*Opciones* – proporciona una manera de añadir facilidades extra que no se cubren en el encabezado.

### 2.7.2 IP (Internet Protocol)

Ubicado en la capa de red, se encuentra el protocolo que mantiene unida a la Internet, el protocolo de Internet IP. De acuerdo a [16], se encarga de proporcionar una forma de transportar datagramas, con el mejor esfuerzo, desde un origen o fuente hasta un destino, sin tomar en cuenta si las máquinas involucradas se encuentran en la misma red o no, o incluso si existen redes entre ellas.

La comunicación de Internet se realiza a partir de que la capa de transporte toma flujos de datos y los divide en datagramas (como se mencionó en la sección anterior de TCP); cuando todos los pedazos finalmente llegan a su máquina destino, son reensamblados por la capa de red en su datagrama original. Este datagrama se le pasa a la capa de transporte, la cual lo inserta en el proceso de recepción de flujos de entrada. Es un protocolo para transferencia de datos.

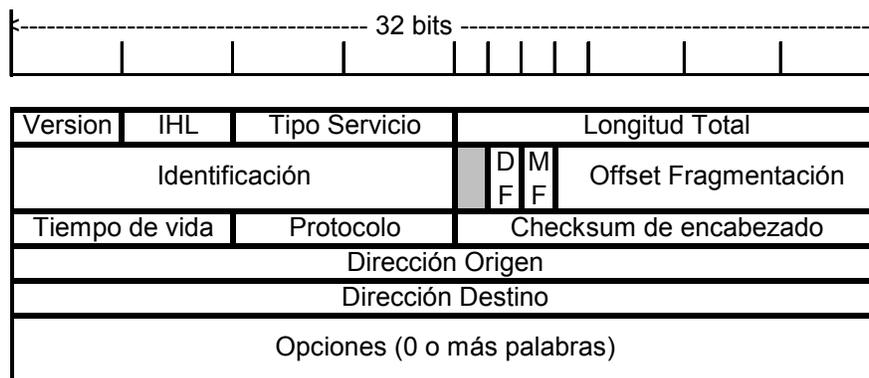


Figura 2.9 Formato de encabezado IP

*Version* – versión del protocolo al que pertenece el datagrama.

*IHL* – que tan largo es el encabezado, en palabras de 32 bits. El valor mínimo es 5 y el mayor 15.

*Tipo Servicio* – permite al host (nodo/equipo anfitrión) decirle a la subred que tipo de servicio quiere. Tiene un campo de 3 bits al principio (Delay, Throughput, Reliability) y así el host indica que le importa más de esas características.

*Longitud Total* – incluye todo en el datagrama, el máximo es 65,535 bytes.

*Identificación* – permite saber a que datagrama pertenece el fragmento que llega.  
*DF* – indica al receptor que el datagrama llegara en una pieza.  
*MF* – indica que hay más fragmentos, todos los fragmentos lo encienden excepto el último.  
*Offset Fragmentación* – indica en que parte del datagrama actual se ubica el fragmento.  
*Tiempo de vida* – contador que se utiliza para limitar el tiempo de vida de los paquetes (se mide en saltos no segundos). Con un máximo de 255.  
*Protocolo* – indica a que proceso de transporte se entregará el datagrama (TCP, UDP, etc).  
*Checksum de header* – solamente verifica el encabezado.  
*Dirección origen /destino* – indican el número de red y el número de host. (dirección IP)  
*Opciones* – para incluir información que no está en el diseño original, permitir experimentar nuevas ideas, longitud variable, pero se arma en múltiplos de 4 bytes. Actualmente existen 5 opciones que no todos los ruteadores soportan:

- Seguridad* – especifica que tan secreto es el datagrama
- Ruteo estricto de origen* – da la ruta completa a seguir
- Ruteo de extravió de origen* – da una lista de ruteadores que no deben omitirse
- Registro de ruta* – hace que cada ruteador registre su dirección IP
- Timestamp* – hace que cada ruteador registre su dirección y timestamp

### 2.7.3 UDP (User Data Protocol)

La suite de IP soporta también un protocolo de transporte sin conexión, el UDP (protocolo de datos de usuario). Según [16] UDP proporciona a las aplicaciones una forma de envío de datagramas IP encapsulados y de enviarlos sin tener que establecer una conexión. Muchas aplicaciones cliente-servidor que tiene una petición y una respuesta, utilizan UDP en lugar de meterse en el problema de establecer y luego liberar una conexión.

Un segmento UDP consiste de un encabezado de 8 bytes seguido de los datos, el encabezado se muestra a continuación en la figura 2.10:

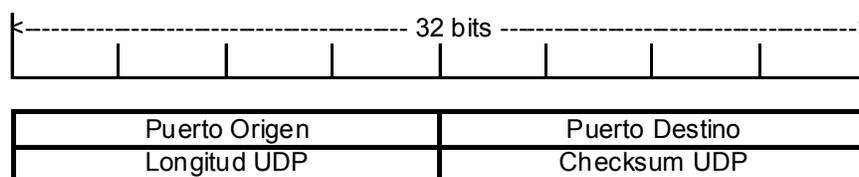


Figura 2.10 Formato de encabezado UDP

Los dos puertos tienen la misma función que en TCP: identificar los puntos finales entre las máquinas origen y destino.

El campo *longitud UDP*, incluye el encabezado de 8 bytes y los datos.

*Checksum UDP* incluye el mismo formato de pseudos-encabezado que TCP utiliza para su checksum.

El encabezado UDP y los datos UDP se arman en números pares de bytes de ser necesario.

## 2.8 Tráfico de información

La información que se utiliza como tráfico en el análisis que se realiza con esta tesis, es voz y video, a continuación se presenta una descripción de sus características:

### 2.8.1 Voz

El tráfico de voz que se utiliza en este análisis corresponde al estándar G.729 que es utilizado principalmente en aplicaciones con voz sobre IP (VoIP)

#### G.729

Es un algoritmo para compresión de audio para voz que comprime la voz en pedazos de 10 ms. Este estándar se utiliza mayormente en aplicaciones VoIP debido a su bajo requerimiento de ancho de banda, ya que opera a 8 kbps, aunque existen variantes que pueden proporcionar también 6.4 y 11.8 kbps, que dan peor y mejor calidad de conversación, respectivamente.

Otra variante común es el G.729a, la cual es compatible con el G.729, pero requiere de menos cálculos, aunque esto implica empeorar la calidad de conversación.

El anexo B de G.729 es un esquema con compresión de silencio, el cual contiene un módulo que detecta la actividad de voz, conversación o sin conversación; de esta forma ofrece una forma de manejar los parámetros de silencios y ruidos de fondo para mejorar la comunicación.

Ya que el G.729 tiene patente de varias compañías y licencia de Sipro, en muchos países el uso del G.729 requiere de pagar una licencia o regalía.

### 2.8.2 Video

El tráfico de video que se utiliza en las simulaciones es del tipo “streaming”, lo cual se refiere a que no se realiza una descarga completa del archivo para poderlo reproducir en el receptor, sino que el receptor ve y escucha el archivo directamente, como se hace en video conferencias.

Con el protocolo UDP se hace la entrega de paquetes de datos desde el servidor que reproduce el archivo, se tiene un flujo continuo de paquetes de datos. Si ocurre algún error de transmisión, al contrario de otros protocolos como TCP que intentan volver a transmitir los paquetes perdidos hasta que consigan la confirmación que todos los paquetes llegaron correctamente, el UDP continúa mandando los paquetes de datos sin tomar en cuenta esas interrupciones, ya que como se trata de una aplicación de multimedios, las pérdidas de algunos paquetes de datos son casi imperceptibles.

Existe un formato llamado CIF (Common Intermediate Format) [20], que también se conoce como FCIF (Full Common Intermediate Format), el cual se utiliza para estandarizar las resoluciones del vertical y horizontal (en pixeles) de las señales de video, más comúnmente utilizadas en sistemas de video conferencias.

Este formato fue propuesto inicialmente por el estándar H.261 de la ITU. El CIF fue diseñado para hacer conversiones entre los formatos PAL y NTSC.

El CIF maneja una resolución de 352x288 píxeles para PAL y 352x240 píxeles para NTSC, con 30 frames por segundo.

Existe el formato QCIF (Quarter Common Intermediate Format), que se utiliza también para las videoconferencias, el cual maneja 30 frames por segundo, con frames de 144x176 píxeles para formato PAL (Phase Alternating Line), y de 176x120 píxeles para NTSC<sup>2</sup> (National Television System Committee).

Asimismo, existen otras versiones como el SQCIF (Sub Quarter CIF), el 4CIF (4xCIF) y 16CIF (16xCIF); las cuales manejan múltiplos o proporciones de la resolución del CIF, para diferentes tipos de resoluciones de video.

La tabla 2.1 muestra algunos de los formatos más utilizados de video conferencia, los cuales son variantes del formato CIF.

Formato	Resolución de video	
	NTSC	PAL
SQCIF	128X80	128X96
QCIF	176X120	176X144
CIF	352X240	352X288
4CIF	704X480	704X576
16CIF	1408X960	1408X1152

Tabla 2.1 Formatos de video conferencia

<sup>2</sup> Formato de televisión utilizado en América del Norte y Japón, principalmente.

# Capítulo 3

## Descripción del Estándar IEEE 802.16e

**W**iMAX, como se ha comentado en capítulos anteriores, es una tecnología inalámbrica que se desarrolló para ofrecer lo último que se tiene en comunicaciones de banda ancha, y se ha pensado como una alternativa a las tecnologías cableadas como lo son Internet por cable coaxial y DSL.

En este capítulo se presenta un panorama general de lo que es el estándar IEEE 802.16e, el que corresponde al WiMAX móvil, describiendo las características de la capa MAC y la capa Física que se relacionan con el análisis realizado en esta tesis.

### 3.1 Antecedentes

La tecnología WiMAX ofrece acceso a equipos fijos como a equipos móviles, sin tener la necesidad de buscar la línea de vista entre el usuario y la estación base (transmisora).

WiMAX se encuentra basado en la familia de estándares IEEE 802.16<sup>3</sup>.

El 7 de diciembre del 2005 se aprobó el IEEE 802.16e-2005, este nuevo estándar ofrece la característica de movilidad que no poseía el estándar 802.16-2004; y por lo mismo, esta nueva versión del estándar requiere una nueva solución de hardware y software que no es compatible con la versión fija.

---

<sup>3</sup> Dicho estándar se encuentra descrito con más detalle en el capítulo 2, sección 2.1 Introducción.

La principal razón por la que no son compatibles las versiones fija y móvil del estándar 802.16 es que, la versión móvil utiliza SOFDMA (OFDMA escalable) en los canales de subida y bajada (UL y DL respectivamente). SOFDMA aumenta el número de subportadoras (subcarriers) OFDM escalando de 128 hasta 2048 subportadoras (con un esquema de 128, 256, 512, 1024 y 2048), dependiendo de la frecuencia de la señal recibida por el usuario, los requerimientos del usuario y el ancho de banda del canal que se esté utilizando.

Las bandas de frecuencia también son diferentes, y las que se manejan en la versión móvil son: 2.3, 2.5 y 3.5 GHz.

También se tiene otra importante diferencia entre ambas versiones, en la capa de acceso al medio (MAC) se agregó un encabezado con información de control para soportar la movilidad.

Y además ofrece un soporte mejorado de las tecnologías múltiples entradas y múltiples salidas (Multiple Input Multiple Output - MIMO) y los sistemas de antenas adaptivas (Adaptive Antenna Systems - AAS); así como mejoras en optimizar el consumo de energía para los dispositivos móviles y extensas características de seguridad.

Entre las modificaciones que WiMAX móvil introduce con respecto al modelo fijo, además del SOFDMA, inicialmente sólo soporta TDD, y se han añadido características avanzadas que mejoran el comportamiento (hablando de movilidad) tales como: Modulación Adaptiva y Codificación (AMC), Petición de Repetición Automática Híbrida (Hybrid Automatic Repeat Request - HARQ) y el canal de información de la calidad del canal (Channel Quality Information Channel – CQICH); tales conceptos se describen más adelante.

Las modificaciones de la versión fija para tener movilidad se pueden agrupar de la siguiente manera:

- En la capa Física: OFDM a SOFDMA
- En la capa MAC: seguridad, hand off, roaming, gestión de recursos (potencia, ancho de banda, calidad de servicio)

Como ya se mencionó en el capítulo 2, el Foro WiMAX se encarga de establecer perfiles de certificación donde se definen las bandas de frecuencia, el ancho de los canales y la técnica de acceso al medio (TDD o FDD), principalmente.

Estos perfiles de certificación se elaboran tomando en cuenta:

- La demanda del mercado
- La disponibilidad del espectro
- Las leyes reguladoras del espectro
- Los servicios que se quieran ofrecer
- Y por supuesto, intereses propios de los fabricantes, integrantes del Foro WiMAX

A continuación se muestra una tabla comparativa de servicios y tipos de acceso (tabla 3.1), así como su relación con las versiones fija y móvil de WiMAX:

Definición	Dispositivos	Ubicaciones/velocidad	Handoff (HO)	802.16-2004	802.16e
<b>Acceso fijo</b>	módems interiores y exteriores	Individual/estacionario	No	Si	Si
<b>Acceso nómada</b>	módem interior y tarjeta PCMCIA	Múltiple/estacionario	No	Si	Si
<b>Portabilidad</b>	Laptop tarjetas PCMCIA o mini-tarjetas	Múltiple/velocidad caminando	Hard HO	No	Si
<b>Movilidad simple</b>	Laptop tarjetas PCMCIA o mini-tarjetas, PDA smartphone	Múltiple/baja velocidad vehicular	Hard HO	No	Si
<b>Movilidad completa</b>	Laptop tarjetas PCMCIA o mini-tarjetas, PDA smartphone	Múltiple/alta velocidad vehicular	Soft HO	No	Si

Tabla 3.1 Tabla comparativa WiMAX

## 3.2 Capa MAC

El protocolo MAC, en general, se encarga de definir:

- el conjunto de reglas para el acceso ordenado a un canal inalámbrico compartido por múltiples dispositivos móviles
- el conjunto de servicios que soportan voz y video en tiempo real, y también la entrega de datos confiable
- la forma en que se comparte, de forma eficiente y justa, el escaso ancho de banda inalámbrico

En el estándar 802.16e el protocolo MAC también tiene gestión de la movilidad, controlando la potencia de alimentación de los equipos, e incluyendo el soporte obligatorio de handoff.

### 3.2.1 MAC subcapa de parte común (Common Part Sublayer – CPS)

En la cima de la MAC CPS reside la subcapa de convergencia (Convergence Sublayer - CS), y utiliza, via el punto de acceso de servicio MAC (Service Access Point – SAP), los servicios que proporciona la MAC CPS; la CS tiene las siguientes funciones:

- Aceptar unidades de datos de protocolo (Protocol Data Units – PDU) de una capa superior desde la capa superior
- Realizar la clasificación de PDUs de capa superior
- Procesar (si así se requiere), las PDUs de capa superior basadas en la clasificación
- Entregar CS PDUs apropiado
- Recibir CS PDUs desde la entidad puerto

La CS tiene dos especificaciones CS: CS de modo de transferencia asíncrono (Asynchronous transfer mode – ATM) y el CS de paquetes.

Para el caso de BWA se utiliza el CS de paquetes.

### 3.2.1.1 Paquete CS

El paquete CS está ubicado en la cima del MAC CPS. Utilizando los servicios de la MAC, realiza sus funciones:

- Clasificación del protocolo PDU de capa superior en la conexión apropiada
- Supresión de la información del encabezado de la carga útil (payload) que es opcional
- Entrega del CS PDU resultante a la MAC SAP asociada con el flujo de servicio para transportarlo al puerto MAC SAP
- Recibir el CS PDU desde el puerto MAC SAP
- Reconstruir desde cualquier información del encabezado de la payload eliminada (opcional)

El CS que envía, es responsable de entregar la Unidad de Servicio de Datos (Service Data Unit – SDU) MAC. MAC es responsable de entregar la MAC SDU al puerto MAC SAP de acuerdo con la calidad de servicio, fragmentación, concatenación y otras funciones de transporte asociadas con las características propias de alguna conexión de un flujo de servicio. El CS receptor es responsable de aceptar la MAC SDU desde el puerto MAC SAP y entregarlo a una entidad de capa superior.

Los PDUs de capa superior que ya están clasificados y asociados con una conexión MAC específica, deberán encapsularse bajo el formato MAC SDU.

### 3.2.1.2 Punto MultiPunto (PMP)

En las redes que utilizan medios compartidos deberán proporcionar mecanismos eficientes para compartirlos. La topología de Punto – MultiPunto (PMP) de redes inalámbricas es un ejemplo de medio inalámbrico compartido donde el espacio donde se propagan las ondas de radio es el medio a compartir.

El estándar 802.16 opera con una estación base (BS) con una antena sectorial que es capaz de manejar varios sectores independientes al mismo tiempo; y de esta forma, utilizando cierto canal de frecuencia y un sector de la antena, las estaciones suscriptoras (SS) reciben la misma información. La BS es el único transmisor operando en cierta dirección y, por lo tanto, no tiene que coordinarse con otros transmisores, excepto por el tipo de acceso al medio (TDD) que puede dividir el tiempo en periodos de transmisión de subida (UL) o de bajada (DL). Si el mapa del canal DL no indica lo contrario, la transmisión DL será tipo broadcast (a todas las SSs), pero habrá casos en los que el mapa del canal DL indique que una porción del subframe del DL es para cierto SS, aunque todas las SS que sean capaces de escuchar esa porción de subframe, cada SS revisará el identificador de conexión (Connection Identifier - CID) en los paquetes PDU recibidos, y solamente conservará los PDUs que le correspondan.

La transmisión UL está sujeta a demanda, es decir, todas las SSs comparten el canal UL con la BS y dependiendo la clase de servicio que utilice cierta SS, su turno para transmitir será inmediato (sin solicitarlo) o autorizado posteriormente por la BS (previa solicitud de la SS).

En cada sector, los usuarios se apegan a un protocolo de transmisión que controla la contención entre usuarios, y habilita el servicio para adaptarlo a las necesidades de retardo y ancho de banda de la aplicación de cada usuario. Y se logra gracias a diferentes tipos de transmisión UL que utilizan mecanismos de programación, esto se logra utilizando asignación no solicitada de ancho de banda, poleo y procedimientos de contención. Dichos mecanismos se encuentran definidos en el protocolo para permitir a los proveedores optimizar el desempeño de sus sistemas al utilizar diferentes combinaciones de esos mecanismos, realizando asignaciones de ancho de banda que permita mantener cierto nivel de operación deseado.

Al utilizar el poleo se simplifica el acceso y garantiza que las aplicaciones obtengan el servicio, de acuerdo a ciertas bases, ya que no todas las aplicaciones pueden tolerar retardos como las de datos, o aplicaciones de tiempo real que requieran un servicio constante e uniforme.

Una vez que la SS se registra, las conexiones de transporte son asociadas con los flujos de servicio (una conexión por flujo de servicio), para contar con una referencia contra la solicitud de ancho de banda. El flujo de servicio define los parámetros de calidad de servicio para los PDUs que se están intercambiando en la conexión.

El concepto de flujo de servicio en una conexión de transporte es la parte central de la operación del protocolo MAC. Los flujos de servicio proporcionan los mecanismos para administrar la calidad de servicio en las transmisiones UL y DL, y son una parte integral del proceso de asignación de ancho de banda. Las peticiones de ancho de banda para UL de la SS se hacen mediante la conexión (el flujo de servicio se identifica implícitamente); la BS otorga el ancho de banda a una SS dentro de un conjunto de asignaciones.

Las conexiones de transporte también requieren de mantenimiento activo, el cual varía de acuerdo al tipo de servicio conectado.

### 3.2.1.3 MAC PDU

El formato de una MAC PDU se muestra a continuación en la figura 3.1:

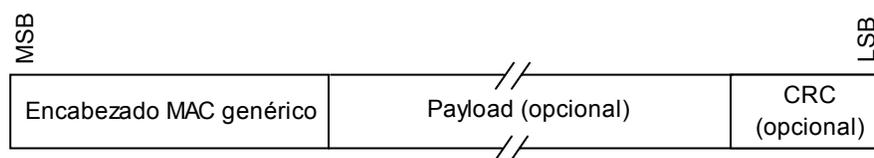


Figura 3.1 Formato de MAC PDU

Todas las PDUs deben empezar con un encabezado MAC genérico, este encabezado puede tener a continuación una payload (carga útil) de la MAC PDU. Si existe la Payload, deberá consistir de cero o más subencabezados y cero o más MAC SDUs y/o sus fragmentos. Ya que la información de la payload puede variar en longitud, la MAC PDU puede representar un número variable de bytes. Permittedole a la MAC hacer un túnel con varios tipos de tráfico de capa superior sin tener conocimiento de los formatos o patrones de bits de esos mensajes.

Todos los campos reservados tendrán que ponerse a cero durante la transmisión e ignorados durante la recepción.

### Encabezados MAC genérico (Generic MAC Header – GMH)

Existe un encabezado DL MAC definido, que es un encabezado MAC genérico, el cual encabeza todos los MAC PDU que contienen mensajes MAC administrativos o de datos CS. Y existen dos formatos de encabezado UL MAC; el primero es el encabezado MAC genérico, que, al igual que el encabezado de DL MAC, precede los MAC PDU (administrativos o CS), donde HT vale 0. El segundo tipo, es el encabezado sin payload donde HT vale 1, en este formato, el encabezado MAC no es seguido por ningún payload de MAC PDU ni CRC.

A continuación se muestra el formato de encabezado MAC genérico:

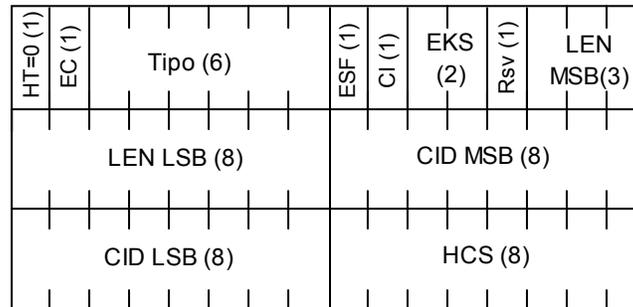


Figura 3.2 Formato de encabezado MAC genérico

Los campos del encabezado MAC genérico se describen en la siguiente tabla:

Campo	Longitud (bits)	Descripción
CI	1	Indicador de CRC. 1 - se incluye CRC, agregándolo la payload después de la codificación, si la hay 0 - si no se incluye CRC
CID	16	Identificador de la conexión.
EC	1	Control de Codificación. 0 - la payload no está codificada 1 - la payload está codificada
EKS	2	Secuencia de llave de codificación. El índice de la llave de codificación del tráfico y el vector de inicialización utilizados para codificar la payload. Este campo solamente es útil si el campo EC=1.
HCS	8	Secuencia de verificación de encabezado. Es un campo de 8 bits que se utiliza para detectar errores en el encabezado.
HT	1	Tipo de encabezado. Debe valer cero.
LEN	11	Longitud. Es la longitud en bytes de la MAC PDU, incluyendo el encabezado MAC y el CRC si existe.
Tipo	6	Indica los subencabezados y tipos de payload especiales, que están en el mensaje payload.
ESF	1	Campo extendido de subencabezado. Aplica en UL y DL. Todos los subencabezados no están codificados. 0 no hay existe. 1 entonces existe y va enseguida del GMH, y antes de otros subencabezados

Tabla 3.2 Campos del GMH

La definición del campo Tipo de la tabla 3.2 se muestra en la siguiente tabla:

bit Tipo	Valor
# 5 bit más significativo (Most Significant Bit - MSB)	Subencabezado de Malla (Mesh). 1 - existe 0 - no existe
# 4	Payload de retroalimentación ARQ. 1- existe 0 - no existe
# 3	Tipo Extendido. Indica si el encabezado que existe, de empaquetamiento o fragmentación es extendido. 1 - extendido 0 - no extendido. Aplica en conexiones donde ARQ está deshabilitado.
# 2	Subencabezado de Fragmentación. 1 - existe 0- no existe
# 1	Subencabezado de empaquetamiento 1 - existe 0 - no existe
# 0 bit menos significativo (Less Significant Bit - LSB)	DL: subencabezado de asignación de retroalimentación rápida (fast-feedback) UL: subencabezado de Administración de asignaciones. 1- existe 0 - no existe

Tabla 3.3 Codificaciones de Tipo

### Encabezado MAC sin payload

Este formato de encabezado aplica solamente a UL. El encabezado no es seguido por ningún payload de MAC PDU ni CRC. Existen dos tipos de encabezados de señalización MAC: el tipo I y el tipo II.

### Encabezado de señalización MAC tipo I

En este tipo de encabezado no hay payload enseguida del encabezado MAC, su formato se muestra a continuación en la figura 3.3:

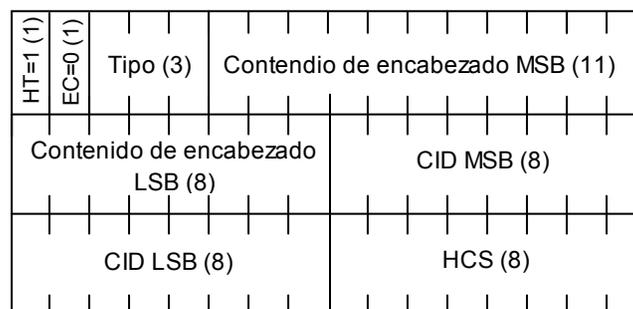


Figura 3.3 Encabezado de señalización MAC Tipo I

En la siguiente tabla se muestran la codificación del campo Tipo (de 3 bits):

campo Tipo (3 bits)	Tipo de encabezado MAC
000	BR incremental
001	BR aggregate
010	PHY channel report
011	BR with UL Tx Power Report
100	Bandwidth request and CINR report
101	BR with UL sleep control
110	SN Report
111	CQICH allocation request

Tabla 3.4 Codificaciones para el campo Tipo del encabezado de señalización MAC Tipo I

Como puede observarse en la tabla anterior (Tabla 3.4), existen varios encabezados de señalización MAC Tipo I, a continuación se da una breve descripción de ellos:

Encabezado	Descripción
Solicitud de ancho de banda	Se describe más detalladamente en el siguiente párrafo
Solicitud de ancho de banda y Reporte de Potencia de transmisión en UL	La solicitud de ancho de banda es de tipo incremental  En UL Tx Power se reporta el nivel en dBm de la potencia de transmisión UL de la ráfaga que lleva este encabezado
Solicitud de ancho de banda y Reporte de CINR	Solicita ancho de banda  CINR – indica el CINR medido por la MS desde la BS, en dB  DCD* = 1 si la cuenta de cambios DCD de la MS no coincide con la recibida en el mensaje DL-MAP, si coincide es =0
Solicitud de ubicación del CQICH	Se indica el tipo de retroalimentación a utilizar  Indica si la solicitud se hace durante el handover de cambio rápido de BS (FBSS)  El periodo preferido (dado en unidades de frame)
Reporte de canal Físico (PHY)	El soporte de este encabezado debe negociarse entre la BS y el MS  Contiene el nivel de la potencia de transmisión UL
Solicitud de ancho de banda y control "sleep" UL	Solicitar ancho de banda  Activar el modo para ahorrar energía
Reporte de Número de secuencia (Sequence Number - SN)	Es enviado por la MS para reportar el LSB del siguiente # de secuencia ARQ* o el número de secuencia del MAC SDU virtual de la conexión activa, con retroalimentación SN habilitada.

\*DCD – Descriptor del canal DL (DownLink Channel Descriptor)

ARQ – Solicitud de repetición automática (Automatic Repeat Request)

Tabla 3.5 Tipos de encabezado de señalización MAC Tipo I

### Encabezado de Solicitud de ancho de banda

El PDU para solicitar ancho de banda sólo consiste de la solicitud y no debe contener payload. Si una estación móvil (MS) recibe un encabezado de solicitud de ancho de banda en DL, debe descartar ese PDU.

El encabezado de la solicitud de ancho de banda debe tener las siguientes características:

- Es un encabezado de tipo señalización MAC
- El CID debe indicar la conexión UL para la que se solicita ancho de banda
- El campo BR debe indicar el tamaño en bytes del ancho de banda solicitado
- Los tipos permitidos para solicitud de ancho de banda se encuentran definidos en la Tabla 3.4

A continuación se muestra el formato del encabezado de solicitud de ancho de banda:

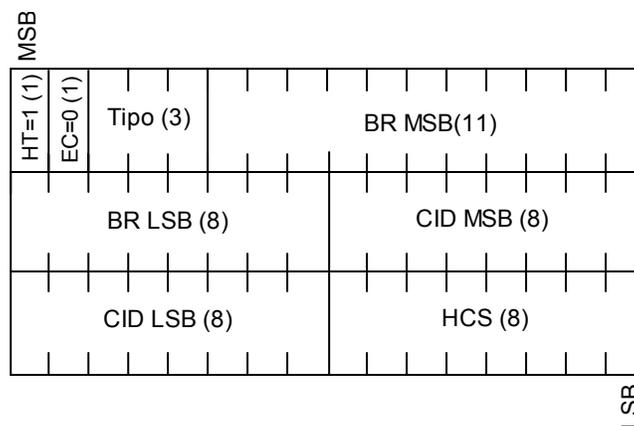


Figura 3.4 Formato de encabezado de solicitud de ancho de banda

A continuación se describen los campos de la figura 3.4:

Campo	Longitud (bits)	Descripción
BR	19	Solicitud de ancho de banda. Número de bytes de ancho de banda UL solicitado por la SS. El ancho de banda solicitado es para el CID. Esta solicitud no debe incluir ningún overhead de PHY
CID	16	Identificador de la conexión
EC	1	Siempre con valor 0
HCS	8	Secuencia de verificación de encabezado. Mismo uso que en la tabla 3.
HT	1	Tipo de encabezado = 1
Tipo	3	Indica el tipo de encabezado de solicitud de ancho de banda

Tabla 3.6 Campos del encabezado de solicitud de ancho de banda

### Encabezado de señalización MAC tipo II

En este tipo de encabezado es específico para UL, y no hay payload enseguida del encabezado MAC, su formato se muestra a continuación en la figura 3.5:

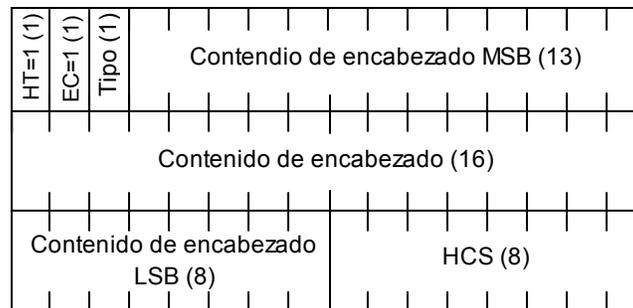


Figura 3.5 Encabezado de señalización MAC Tipo II

En la siguiente tabla se muestran la codificación del campo Tipo (de 1 bit):

Encabezado	Tipo encabezado MAC (con HT/EC=0b11)
0	Encabezado de retroalimentación, que incluye otro campo tipo de 4 bits para definir sus codificaciones
1	Reservado

Tabla 3.7 Codificación del campo Tipo del encabezado de señalización MAC Tipo II

Como puede observarse en la tabla anterior (Tabla 3.7), existen un sólo tipo de encabezado de señalización MAC Tipo II, el de Retroalimentación, que a su vez tiene varios formatos.

### Encabezado de retroalimentación

El encabezado de retroalimentación es enviado por la MS ya sea como respuesta de Poleo de retroalimentación o al subencabezado de la solicitud de retroalimentación o como una retroalimentación no solicitada. El PDU de retroalimentación debe consistir solamente del encabezado de retroalimentación y no contener payload.

El encabezado de retroalimentación existe con el campo CID y sin el campo CID. También existe el encabezado de retroalimentación para Canal MIMO, se puede utilizar para proporcionar una retroalimentación de canal simple o compuesto. Este encabezado también tiene los formatos con CID y sin CID.

#### 3.2.1.4 Servicios de programación (scheduling)

Estos servicios representan a los mecanismos de manejo de datos que soporta el programador MAC para transportar los datos en una conexión. Cada conexión está asociada con un solo servicio de programación, un servicio de programación se determina por un conjunto de parámetros de calidad de servicio (QoS) que cuantifican aspectos de su comportamiento tales como prioridad de tráfico, máxima tasa de tráfico sostenida, máximo retardo, entre otros.

Entre los campos que definen los parámetros asociados con la programación de UL/DL para un flujo de servicio se tiene el código de Tipo 11 - Programación de concesión UL.

El valor del parámetro especifica el tipo Programación de Concesión UL que se habilitará para el flujo de servicio asociado a UL, si se omite este parámetro, se asume el valor de Mejor Esfuerzo. A continuación se listan los valores de los tipos de Programación de Concesión UL:

- 0 – Reservado
- 1 – Indefinido (depende de la implementación de la BS)
- 2 – Mejor Esfuerzo (Best Effort – BE) – *valor por defecto*
- 3 – Servicio de Poleo No-Tiempo Real (Non-real-time Polling Service – nrtPS)
- 4 - Servicio de Poleo en Tiempo Real (Real-time Polling Service – rtPS)
- 5 – Servicio de Poleo Extendido en Tiempo Real (Extended Real-time Polling Service – ertPS)
- 6 - Servicio de Concesiones sin Solicitud (Unsolicited Grant Service – UGS)
- 7 – 255 - Reservado

### 3.2.1.4.1 Programación solicitud/concesión para UL

Esta programación la realiza la BS con la finalidad de proporcionar a cada MS un ancho de banda para transmisiones UL o darle la oportunidad de solicitar ancho de banda. Especificando el tipo de programación y sus parámetros de calidad de servicio asociados, el programador de la BS puede conocer de antemano los valores del rendimiento de la transmisión (throughput) y latencia que necesita para el tráfico UL y así proporcionar los poleos y/o concesiones en los tiempos correctos.

Servicio	Siglas	Descripción	Aplicaciones
Servicio de Concesiones sin Solicitud (Unsolicited Grant Service)	UGS	Paquetes de datos de tamaño fijo que son transmitidos en intervalos periódicos, en flujos de datos en tiempo real	Tráfico de T1/E1 y voz en IP sin supresión de silencio
Servicio de Poleo Extendido en Tiempo Real (Extended Real-time Polling Service)	ertPS	Flujos de servicio de tiempo real que transportan periódicamente paquetes de datos con un tamaño que puede cambiar dinámicamente	Voz en IP con supresión de silencio
Servicio de Poleo en Tiempo Real (Real-time Polling Service)	rtPS	Flujos de servicio en UL de tiempo real que transportan paquetes de datos de tamaño variable que son transmitidos en intervalos periódicos	Video MPEG
Servicio de Poleo No-Tiempo Real (Non-real-time Polling Service)	nrtPS	Flujos de servicio que pueden tolerar retardos, incluyen paquetes de datos de tamaño variable para los cuales se requiere una mínima tasa de transferencia	FTP (transferencia de archivos) con tasa de transferencia mínima garantizada
Mejor Esfuerzo (Best Effort)	BE	Flujos de servicio para los cuales no se requiere un mínimo nivel de servicio y por lo tanto, pueden manejarse por disponibilidad de espacio	HTTP (Internet)

Tabla 3.8 Tipos de programación de servicios

## **UGS**

El servicio ofrece concesiones de tamaño fijo por periodos en tiempo real, lo cual elimina la latencia y el overhead de las solicitudes de la MS y asegura que las concesiones se encuentren disponibles para satisfacer las necesidades del flujo en tiempo real.

### **rtPS extendido**

Es un mecanismo de programación que se basa en la eficiencia del UGS y el rtPS, la BS deberá proporcionar concesiones unicast de una forma no solicitada como se hace con UGS, ahorrándose así, la latencia de una solicitud de ancho de banda. Sin embargo, mientras que las asignaciones UGS son de tamaño fijo, las de ertPS son dinámicas. La BS puede proporcionar asignaciones UL periódicas que pueden usarse para solicitar ancho de banda y también para transferencia de datos. La MS puede solicitar cambiar el tamaño de la asignación UL, ya sea utilizando un campo de solicitud extendida Piggyback o utilizando el campo BR de los encabezados de señalización MAC, o enviando una palabra de código sobre CQICH. La BS no deberá cambiar el tamaño de la asignación UL a menos que reciba otra solicitud unicast de cambio de ancho de banda de la MS.

Si no existen oportunidades de solicitud de ancho de banda unicast, la MS puede usar las oportunidades de solicitud de contención para esa conexión. Tiene menor overhead para solicitudes/concesiones que rtPS

### **rtPS**

El servicio ofrece oportunidades de solicitud unicast, periódica y en tiempo real, que satisfacen las necesidades en tiempo real del flujo, y permite a la MS especificar el tamaño de la concesión deseada. Este servicio requiere más overhead de solicitud que UGS, pero soporta tamaños de concesiones variables para una eficiencia óptima de transporte de datos. La BS deberá proporcionar oportunidades periódicas de solicitudes unicast, incluso si existen solicitudes previas que no han sido cubiertas.

### **nrtPS**

Ofrece poleo unicast de manera regular, el cual asegura que el flujo de servicio de UL recibe oportunidades de solicitud, incluso durante congestión de red. La BS típicamente hace poleo a los CIDs nrtPS en un intervalo del orden un segundo o menos.

La BS deberá proporcionar oportunidades de solicitud unicast por ciertos tiempos. La MS debe tener posibilidad de usar oportunidades de solicitud por contención, así que tiene ambos tipos de oportunidad para solicitudes y transmisión de datos.

## **BE**

La intención del tipo de programación BE es proporcionar servicio eficiente para el tráfico de mejor esfuerzo en el UL. Para lograr que este servicio trabaje correctamente, debe permitirse que la MS utilice oportunidades de solicitud por contención, esto da como resultado que tenga,

tanto oportunidades de solicitud por contención y solicitudes unicast como oportunidades de transmisión de datos.

Todos estos tipos de programación pueden configurarse de manera muy detallada, gracias a que se pueden manipular los parámetros de QoS, y así modificarse y ajustarse de acuerdo a las características de la red y sus necesidades.

En resumen, los servicios de programación constituyen una parte muy importante en el manejo de QoS, ya que dentro de estos servicios se puede manejar una configuración de los parámetros asociados a la programación de Concesión para UL, que asegure que una aplicación de datos recibe el tratamiento de QoS apropiado para la misma.

### **3.2.1.5 Ancho de banda**

#### **3.2.1.5.1 Mecanismos de solicitud y asignación de ancho de banda**

Debido a que las conexiones entre MS y BS permiten manejar diferentes niveles de calidad de servicio, el incremento (incluso disminución) en el ancho de banda es necesario para todos los servicios (excepto el de conexiones de tasa de transmisión constante). Los servicios de Acceso Múltiple Asignado por Demanda (Demand Assigned Multiple Access – DAMA) son los recursos dados, basándose en asignaciones por demanda, conforme la necesidad aumenta.

Cuando una MS necesita pedir ancho de banda en una conexión con servicio de programación del mejor esfuerzo (BE), tiene que enviar un mensaje a la BS que contenga los requerimientos de la conexión DAMA.

Existen varios métodos por medio de los cuales la MS puede hacer llegar a la BS el mensaje de solicitud de ancho de banda, se listan a continuación:

- Solicitudes
- Concesiones (grants)
- Poleo
- Solicitudes para WMAN OFDM basadas en contención
- Solicitudes para WMAN OFDMA basadas en contención

### **Solicitudes**

Las solicitudes se refieren al mecanismo por medio del cual, la MS indica a la BS que necesita espacio de ancho de banda para UL. La solicitud puede ser como sólo un encabezado de solicitud de ancho de banda, o como una solicitud Piggyback (es opcional).

El Piggyback se maneja como un campo llamado PBR (PiggyBack Request) de 16 bits, dentro del subencabezado de Administración de Concesiones, en ese campo se indica el número de bytes que la MS solicita de ancho de banda UL. De esta forma puede solicitarse ancho de banda dentro de los encabezados de los paquetes enviados por las MSs.

Las solicitudes de ancho de banda pueden ser de tipo incremental o agregado. El tipo incremental se refiere a que se agregara la cantidad de ancho de banda solicitado, a la

percepción actual de ancho de banda que necesita la conexión. El agregado se refiere a que se sustituye la percepción actual de ancho de banda con la cantidad solicitada. Esto se indica en el campo Tipo del encabezado de solicitud de ancho de banda. Y en cuanto a las solicitudes por Piggyback, ya que no cuenta con un campo de tipo, como el mencionado, el tipo de solicitud siempre será incremental.

También existen otros mecanismos de solicitud de ancho de banda que incluyen solicitudes de ancho de banda concentrado y solicitudes CDMA, que quedan fuera del alcance de este documento.

Tener la capacidad incremental para las solicitudes de ancho de banda es opcional para la MS y obligatoria para la BS, y la capacidad de agregado es obligatoria para MS y BS.

### **Concesiones (Grants)**

Las solicitudes de ancho de banda hacen referencia a conexiones individuales (para la MS), pero las concesiones están dirigidas al CID básico de la MS no a CIDs individuales. Así que en el caso de que la MS reciba una oportunidad de transmisión menor a la esperada, la MS puede decidir si vuelve a hacer la solicitud o si descarta el paquete SDU.

También existen las solicitudes y concesiones que se manejan por asociación a elementos de información (Information Element – IE) y de esta forma la MS puede solicitar ancho de banda para cierta conexión.

### **Poleo**

Es el proceso por medio del cual la BS asigna oportunidades (ancho de banda específico) para que las MSs puedan realizar solicitudes de ancho de banda. Estas ubicaciones pueden ser para MS individuales o grupos de MSs, las ubicaciones para grupos de conexiones y/o MSs, definen un IE de contención de solicitud de ancho de banda. Las ubicaciones no se encuentran como un mensaje explícito, sino que se encuentran contenidas como una serie de IEs a lo largo del UL-MAP.

Existen diferentes modalidades de poleo que se describen a continuación:

Unicast – se le asigna una ubicación en el UL-MAP con ancho de banda suficiente para que conteste con una solicitud de ancho de banda si lo requiere.

Multicast y Broadcast – por medio de mensajes multicast o en broadcast, se puede dar la oportunidad, a las MSs de hacer solicitudes de ancho de banda en ciertas ubicaciones del UL-MAP.

PM bit – las MSs que cuenten con conexiones tipo UGS pueden utilizar el bit PM (dentro del subencabezado de Administración de concesiones) en un paquete MAC de la conexión UGS para indicarle a la BS que necesitan del poleo para solicitar ancho de banda para una conexión que no es tipo UGS. Cuando la BS detecta esta solicitud hace poleo de manera individual para atender la solicitud.

### **Solicitudes para WMAN OFDM basadas en contención**

Además del mecanismo de solicitud (descrito en la sección solicitudes), existe otro mecanismo que se basa en el concepto de contención, utiliza un código de contención modulado en un canal de contención que consta de 4 portadoras. La BS proporcionará, entre otros elementos, un CID de broadcast combinado con un IE enfocado a contención que especifique el canal y código de contención, así como la oportunidad de transmisión que usará la MS.

### **Solicitudes para WMAN OFDMA basadas en contención**

Es muy similar al anterior tipo (con OFDM) maneja dos mecanismos de solicitud de ancho de banda, el primero también es el de la sección solicitudes, y el segundo tiene un proceso muy parecido, pero en lugar de utilizar códigos y canales de contención, utiliza el subcanal de Ranging y el subconjunto de códigos de Ranging para poder hacer solicitudes de ancho de banda basados en contención.

#### **3.2.1.6 Soporte MAC de PHY (capa física)**

El protocolo MAC soporta varias técnicas de multiplexación. Elegir ciertas técnicas de duplexación puede afectar algunos parámetros de la capa física, así como tener un impacto importante en los elementos que soporta.

El estándar IEEE 802.16e soporta FDD y TDD como esquemas de acceso al medio, pero los perfiles de certificación no incluyen el uso de FDD.

El uso de TDD como esquema de transmisión bidireccional tiene las siguientes ventajas:

- Permite ajustar la relación entre los canales DL y UL para que puedan soportar, de manera eficiente, los tráficos asimétricos, ya que FDD maneja en ambos canales anchos de banda fijos y simétricos.
- Asegura la reciprocidad para dar mejor soporte de MIMO y otro tipo de tecnologías de antenas avanzadas.
- TDD requiere solamente un único canal para DL y UL, mientras que FDD requiere un par de canales para la transmisión; esto da una gran flexibilidad para adaptar una gran variedad de espectros globales
- El diseño de los transmisores para TDD es menos complejo y como consecuencia, se abaratan sus costos

## **3.3 Capa Física**

La capa física de WMAN OFDMA se basa en OFDM y como ya se explico en el capítulo 2, opera en bandas de frecuencia menores a los 11 GHz en modo NLOS.

Para bandas licenciadas, los anchos de banda que se permiten deben conservar la relación de dividir el ancho de banda regulado, entre potencias de 2 sin llegar a ser menor a 1 MHz.

El OFDMA tiene varias ventajas con respecto a OFDM, dentro de las más notables están:

- Técnica de multiplexación de frecuencias más compleja que OFDM
- Maneja una mejor asignación del ancho de banda para cada usuario
- El espacio de portadoras está subdividido en grupos, los cuales no tienen porque tener la misma amplitud, modulación ni codificación, estos parámetros están en función del estado del enlace y del ancho de banda requerido por el usuario

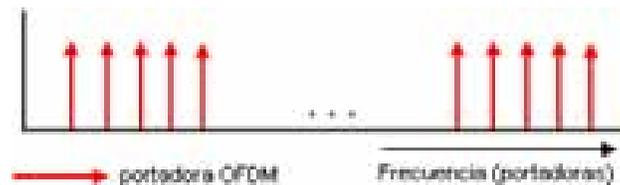


Figura 3.6 a) Portadoras en OFDM

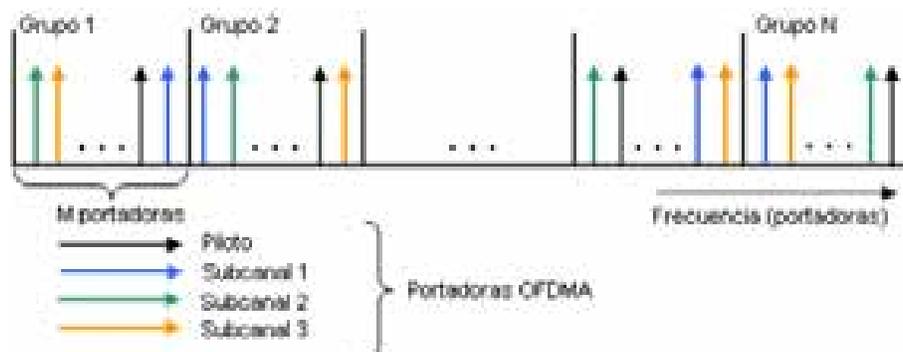


Figura 3.6 b) Portadoras en OFDMA

En OFDMA se soporta al menos uno de los posibles tamaños FFT (Fast Fourier Transform), ya sea 128, 256, 512, 1024 o 2048, facilitando el soporte de los varios canales de ancho de banda. Al realizar una entrada inicial a la red, la MS puede detectar la señal DL, mediante un mecanismo de escaneo y búsqueda; esto también puede incluir una detección automática del tamaño de FFT y el canal empleado por la BS.

### 3.3.1 SOFDMA - OFDMA Escalable (Scalable OFDMA)

Dado que el estándar IEEE 802.16 soporta anchos de banda variables (que van de los 1.25 a los 20 MHz), con escenarios NLOS, y se le suma la posibilidad de combinar el uso de modelo fijo y móvil, surge la necesidad de tener un diseño "escalable" para OFDMA. Esta escalabilidad es necesaria ya que OFDM no puede alcanzar el tipo de desempeño que requieren los usuarios móviles o ambientes multitrayecto; con la escalabilidad se puede garantizar tener un espacio fijo entre las subportadoras en las señales OFDM.

De esta forma el estándar IEEE 802.16e está basado en el concepto de OFDMA escalable (SOFDMA), porque soporta un amplio rango de anchos de banda que brindan flexibilidad al direccionamiento.

Gracias a que puede ajustarse el tamaño de FFT, se logra tener escalabilidad, fijando un espacio entre frecuencias de 10.94 kHz; este valor soporta la movilidad con una velocidad máxima de 125 km/hr (límite suficiente para incluir la mayoría de velocidades de los en las que se mueven los automóviles); y también para abarcar el retardo máximo de la señal en terrenos con colinas y densidad moderada de árboles.

Las principales características de SOFDMA son:

- Espacio entre subportadoras independiente del ancho de banda
- Número de subportadoras utilizadas con posibilidad de escalarse con el ancho de banda
- Número de subcanales escalables con el tamaño de FFT

Si se tiene un sistema que solamente soporta un canal de ancho de banda, tanto SOFDMA como OFDMA son lo mismo, sin diferencia alguna. Pero con la tecnología de IEEE 802.16 que pueden tener muchos canales de ancho de banda (desde 1.25 hasta 20MHz), son diferentes.

En OFDMA el tamaño de FFT es el mismo para todos los anchos de banda, y de esta forma mientras menor sea el ancho de banda, menor será el tamaño de tono (espacio de tono), y así tendrá más sensibilidad a interferencias generadas por la movilidad. Con OFDMA, el tamaño de FFT cambia junto con el canal de ancho de banda, y con esto el tamaño del tono es fijo para todos los anchos de banda. Por ejemplo, en las combinaciones de FFT con canal puede tenerse lo siguiente: FFT de 128 en canal 1.25MHz, 256 para 2.5MHz, 512 para 5 MHz, 1024 para 10 MHz, y 2048 para canal de 20 MHz; en este caso el tamaño de tono para todos estos canales es de 10kHz.

### 3.3.2 Descripción del dominio del tiempo (símbolo OFDMA)

El concepto tiempo de duración está relacionado con la forma de onda OFDMA creada por la transformada inversa de Fourier, y este tiempo se refiere al tiempo del símbolo útil  $T_b$ , el tiempo  $T_g$  es un tiempo de guarda que es utilizado para recolectar multitrayectorias, y así mantener la ortogonalidad de los tonos. La siguiente figura muestra esta estructura (donde  $T_s$  se refiere al tiempo de símbolo OFDMA):

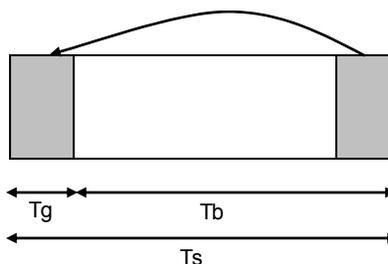


Figura 3.7 Estructura de tiempo de símbolo OFDMA

Si se incrementa la longitud de tiempo de guarda, la energía del transmisor se incrementa, y la energía del receptor permanece igual; y por eso existe una pérdida de tipo  $E_b/N_0$  (razón de señal a ruido en términos de energía) que se puede calcular (en dB) como se muestra en la ecuación 3.1:

$$\frac{10 \cdot \log \frac{1 - T_g}{T_b + T_g}}{\log 10} \quad (3.1)$$

donde:

$T_g$  - es un tiempo de guarda

$T_b$  - tiempo del símbolo útil

La ecuación 3.1 no utiliza extensión cíclica; pero utilizando extensión cíclica, las muestras que se utilicen para llevar a cabo la FFT en el receptor, pueden tomarse en cualquier punto de la longitud del símbolo extendido. Con esto se obtiene inmunidad al efecto multitrayecto, así como tolerancia para con los errores de sincronización del tiempo del símbolo.

Una MS debe buscar, durante la inicialización, los posibles valores del prefijo cíclico (Cyclic Prefix – CP), hasta que encuentre el que está siendo usado por la BS. De esta forma, la MS usará el mismo CP durante UL. Para operar en DL, la BS selecciona la duración del CP específico, y este valor lo debe cambiarse; si se cambiara el CP todas las MSs serían forzadas a resincronizarse con la BS.

### Proceso de Prefijo Cíclico - CP

Al extender cíclicamente el tiempo de guarda del símbolo OFDMA, se pretende eliminar la interferencia entre portadoras (Inter Carrier Interference – ICI), esto significa que el símbolo se desplaza para que inicie en la orilla del retardo, y durante el tiempo de guarda se copia el inicio del símbolo (copiar el final del símbolo y pegarlo en el frente).

El CP tiene el inconveniente de que introduce un encabezado, por lo cual se reduce la eficiencia del uso del ancho de banda por tener que transmitir más datos.

### 3.3.3 Descripción del dominio de frecuencia

La descripción del dominio de frecuencia se refiere a la estructura básica de un símbolo OFDMA, el cual se forma por subportadoras, cuyo número se determina con el tamaño de FFT utilizado. Existen diferentes tipos de subportadoras como ya se describió en el capítulo 2, en la sección 2. OFDM.

En OFDMA, las subportadoras activas se dividen en subconjuntos de subportadoras, donde cada conjunto es llamado subcanal. En DL un subcanal puede asociarse a diferentes (grupos de) receptores, mientras que en UL, un transmisor puede tener asignado uno o más subcanales, y así, varios transmisores pueden transmitir simultáneamente. Las subportadoras que conforman un subcanal pueden (aunque no necesitan) ser adyacentes. Esto se puede observar en la figura 3.8.

La división del símbolo en subcanales lógicos se realiza para poder soportar las capacidades de procesar: escalabilidad, acceso múltiple y arreglos de antenas avanzadas.

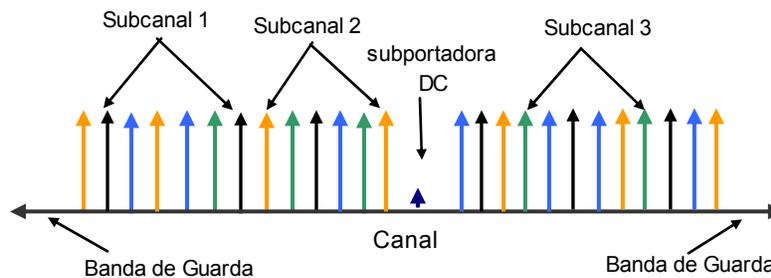


Figura 3.8 Descripción de frecuencia OFDMA (ejemplo de 3 canales)

### 3.3.3.1 Ubicaciones de las subportadoras OFDMA

En OFDMA se tiene lo que se conoce como subportadoras “utilizadas”, que son las subportadoras que quedan después de sustraer los tonos o bandas de guarda; ya sea para UL o DL, estas subportadoras utilizadas son acomodadas en subportadoras piloto y de datos. Pero existe una diferencia entre como se estructuran dichas zonas.

La capa física soporta tener subcanales en ambos canales UL y DL, la mínima unidad de tiempo/frecuencia de los subcanales es una ranura (slot) que es equivalente a 48 subportadoras.

Básicamente se tienen dos formas de hacer subcanales, los procesos FUSC y PUSC, en estos dos procesos la distribución de las subportadoras piloto es diferente para cada uno:

#### FUSC (Fully Used Subchannelization)

Es el modo de subcanalización de uso total. Para el DL, primero se ubican las subportadoras piloto y luego las restantes subportadoras se dividen en los subcanales de datos.

#### PUSC (Partially Used Sub-carrier)

Es el modo de subcanalización de uso parcial. Para DL el proceso es igual que FUSC; pero para el UL es diferente, el grupo de subportadoras utilizadas (de datos y pilotos), primero se divide en subcanales y luego las subportadoras piloto son ubicadas dentro de cada subcanal.

En FUSC existe un solo grupo de subportadoras comunes, y en PUSC de DL existe un grupo de subportadoras comunes en cada grupo mayor; pero en PUSC de UL, cada subcanal contiene su propio grupo de subportadoras piloto.

### 3.3.4 Estructura de trama (frame)

En las bandas de frecuencia licenciadas, el método de duplexación a usar debe ser FDD o TDD, aunque con FDD las MSs pueden trabajar como Half Duplex FDD (H-FDD); en las bandas exentas de licencias el método deberá ser el TDD.

#### Estructura de frame PMP

Al implementar un sistema TDD, la construcción de la estructura del frame se hace a partir de transmisiones que van de la BS a la MS. Cada frame, durante la transmisión DL, inicia con un preámbulo seguido por periodos de transmisión, primero DL y luego UL. En cada frame se insertarán una TTG ubicada entre DL y UL, y una RTG ubicada al final del frame; para que la BS pueda continuar con otra vuelta.

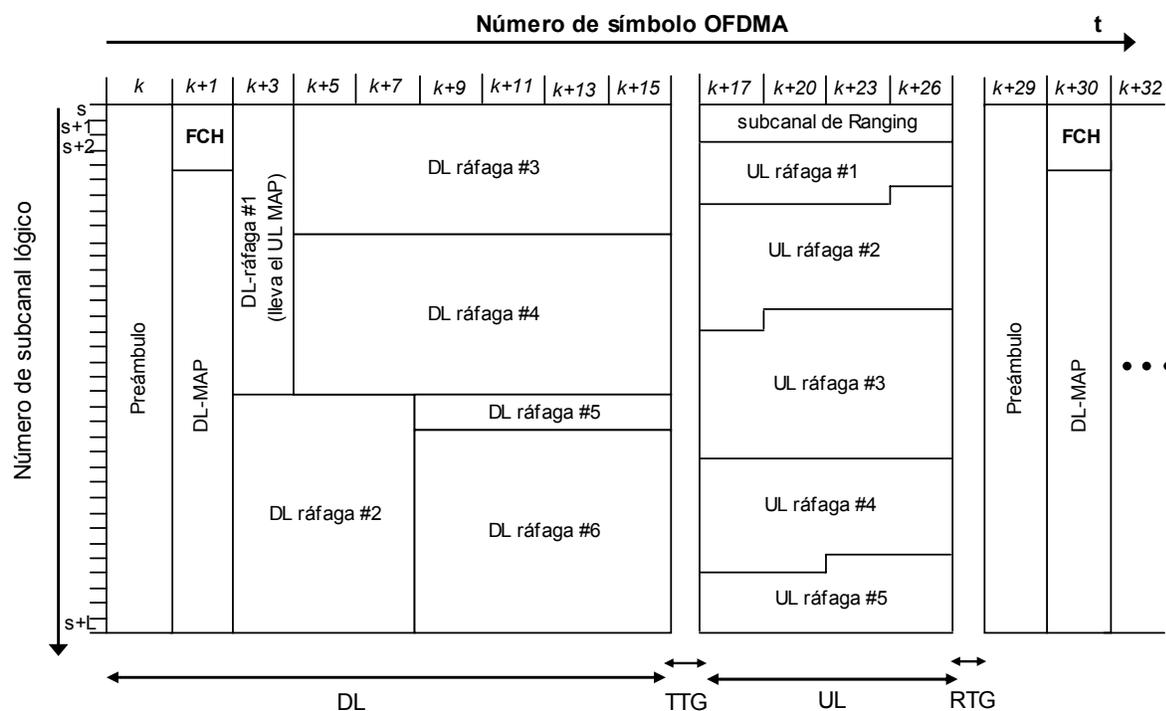


Figura 3.9 Ejemplo de un frame de OFDMA (solamente con zonas obligatorias) en modo TDD

De los elementos que se observan en la figura 3.9, a continuación se da una breve descripción de los más importantes:

- El preámbulo: se utiliza para sincronizar, es el primer símbolo OFDMA del frame (trama)
- El encabezado de control de frame (Frame Control Header - FCH): se encuentra enseguida del preámbulo, contiene la información de configuración, tal como el mapa (MAP), el tamaño y el esquema de codificación, y los subcanales que pueden utilizarse
- DL MAP y UL MAP: se refieren al protocolo de acceso al medio, y provee la ubicación de los subcanales e información de control

- Subcanal de Ranging: es un subcanal para ranging que se usa al iniciar una conexión, para que las estaciones móviles ajusten el tiempo de cierre de conexión, la frecuencia y la potencia, conforme lo requiera el ancho de banda
- TTG: brecha de transición que va de modo de transmitir a modo de recibir
- RTG: brecha de transición que va de modo de recibir a modo de transmitir

En los sistemas TDD y H-FDD las transmisiones deben hacerse por medio de un SSRTG (RTG de una SS) y un SSTTG (TTG de una SS); de esta forma, la BS no debe transmitir información en DL a una MS después de SSRTG+RTD (retardo de vuelta completa - Round Trip Delay), antes de iniciar su primera asignación UL programada en cualquier subframe UL; y no deberá transmitirle información en DL antes de SSTTG-RTD, después de terminar la última asignación UL programada.

Además, se le debe permitir a la MS recibir el preámbulo de cada frame que contiene datos DL para ella, al cumplir el periodo específico (arriba mencionado), no hay superposición con el preámbulo. Los parámetros SSRTG y SSTTG son capacidades que proporciona la MS para la BS, mediante solicitud durante la entrada a la red.

### 3.3.5 Mecanismos de control

Existen varios mecanismos de control en la capa Física, la sincronización, el ranging y el control de potencia. A continuación se da una breve descripción de ellos.

#### 3.3.5.1 Sincronización

La sincronización tiene dos modalidades:

- Sincronización de red  
Tanto para TDD como para FDD se recomienda (pero no es requerido) que todas las BSs se encuentren sincronizadas con una señal de tiempo común. Si llega a suceder que hay una pérdida de la señal de tiempo de la red, las BSs tendrán que continuar operando y automáticamente deberán resincronizarse con la señal de tiempo de red cuando sea recuperada.
- Sincronización de estación suscriptora  
Para cualquier método de duplexación, todas las estaciones suscriptoras deberán ajustar y obtener sus tiempos de forma que, los símbolos OFDMA de UL lleguen con un tiempo que coincida en la BS manteniendo una exactitud de  $\pm 25\%$  del mínimo intervalo de guarda o incluso mejor que eso.

#### 3.3.5.2 Ranging (proceso de variar, alinear)

El ranging para tiempo (sincronización ordinaria) y potencia es realizado durante dos fases de operación: durante (re)registro y cuando se pierde la sincronización; y la segunda se realiza durante la transmisión FDD o TDD por periodos.

Durante el registro, una nueva suscriptora se registra utilizando acceso de canal aleatorio, y si tiene éxito, entra en un proceso de ranging controlado por la BS.

El proceso es cíclico, donde el tiempo por defecto y los parámetros de potencia se utilizan para iniciar el proceso seguido de ciclos, donde se recalculan los parámetros para usarlos en secuencia hasta que se cumple el criterio de aceptación para la nueva suscriptora.

Estos parámetros se miden, monitorean y almacenan en la BS, y son transmitidos a la suscriptora para usarse durante el intercambio normal de datos. Durante este intercambio, los parámetros almacenados se actualizan periódicamente en base a intervalos de actualización configurables, para asegurar que los cambios del canal puedan llevarse a cabo.

El ranging en re-registro realiza el mismo procedimiento de un nuevo registro (arriba descrito).

### **3.3.5.3 Control de potencia**

Un algoritmo de control de potencia deberá ser soportado, sin pérdida de datos, por el canal UL tanto para calibración inicial, como para el procedimiento de ajuste periódico.

La BS deberá ser capaz de realizar mediciones exactas de potencia de la señal de la ráfaga recibida; y así, este valor pueda ser comparado contra un nivel de referencia, y el error resultante pueda mandarse de regreso a la SS dentro de un mensaje de calibración, que venga desde la capa MAC.

En general, se habla de un control automático por retroalimentación, de forma que la BS pueda hacer los cambios correspondientes para conservar los parámetros deseados de transmisión a la SS que le está reportando la información por retroalimentación.

### **3.3.6 Modulación**

En el capítulo 2 ya se describieron los tipos de modulación digital que existen, pero aquí se listan las modulaciones que el estándar 802.16e puede manejar: BPSK (Binary Phase Shift Keying), QPSK (Quadrature Phase Shift Keying), QAM (Quadrature Amplitud Modulation).

Aunque para la parte de modulación adaptiva, solamente se manejan QPSK y QAM con diferentes tasas de codificación.

### **Modulación Adaptiva y Codificación (AMC)**

Los conceptos de AMC que se manejarán en este estudio se basan principalmente en medición de Interferencia y Razón de Ruido en la portadora (Carrier to interference plus Noise Ratio – CINR), uso del Canal Indicador de la Calidad del Canal (Channel Quality Indication Channel – CQICH) y criterios para cambiar perfiles de ráfagas (burst profiles).

El *CINR* mide la calidad del canal y la AMC depende de la medición de la calidad del canal, así que depende mucho de este parámetro. Las mediciones del *CINR* son periódicas y se realizan

en la estación móvil (MS) y la estación base (BS), donde las mediciones del CINR mantenidas en la MS se refieren a la calidad el canal Downlink (DL) y las que se mantienen en la BS se refieren a la calidad en el canal de Uplink (UL).

Todas las MS son ubicadas en un *canal CQI* para reportar sus mediciones de CINR de DL. El canal CQI (CQICH) consiste de localidades periódicas ocurriendo con un cierto desplazamiento (Offset) en la región de feedback del UL.

Todas las MS tienen un canal CQICH UL asignado para comunicarse con la BS; la MS responderá a cada ubicación de CQICH desde la BS dando la estimación más actual de CINR en una petición de ancho de banda (BW request) y en el encabezado de UL Tx Power Report. Este CINR es de capa física no hay canal para reportar el CINR efectivo.

La forma en que se toma la decisión del cambio de perfil de ráfaga, se describe en el capítulo 4 (véase sección 4.6 Funcionamiento de la AMC).

# Capítulo 4

## Modelos teóricos y algoritmos

**E**n este capítulo se continúa con la presentación de elementos cada vez más específicos del WiMAX móvil, y a partir de los conceptos básicos descritos en el capítulo anterior, se presentan los modelos teóricos y algoritmos que se relacionan con el mecanismo de modulación adaptiva y codificación, que se definen en el estándar IEEE 802.16e.

Los modelos teóricos involucran modelos de propagación que incluyen conceptos tales como el Path Loss (la pérdida por trayectoria) y la razón de señal a ruido (SNR), principalmente; así como la obtención de los parámetros que se involucran en estos modelos.

Los algoritmos que se presentan en este capítulo, son los que se refieren a la modulación adaptiva y codificación (AMC).

### 3.2 Modelos de propagación

Modelos de propagación para usuarios fijos y móviles manejan categorías asociadas con el tipo de terreno, son tres categorías llamadas:

- A : poblada o montañosa (urbana)
- B: semipoblada (sub-urbano)
- C: terreno despejado (rural)

#### Terreno tipo A

Zonas donde existen muchos edificios, como lo son las grandes ciudades con altos edificios; y también se refiere a áreas con montañas o colinas y muchos árboles.

La figura 4.1 se divide en dos partes, mostrando un par de posibilidades de asentamientos con las características descritas para el terreno A.

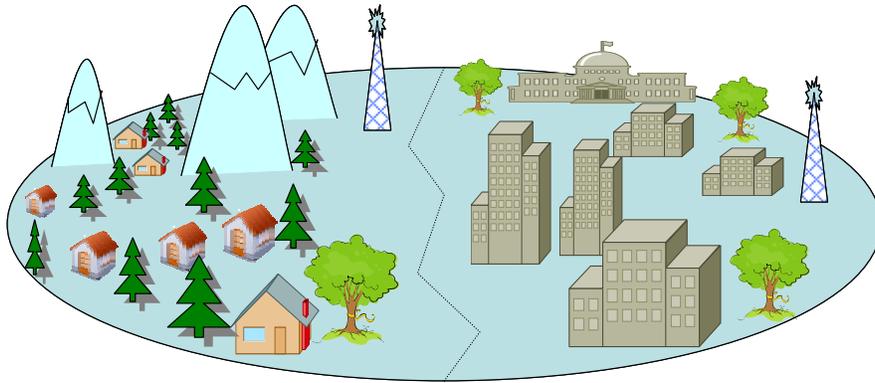


Figura 4.1 Terreno tipo A

### Terreno tipo B

Se refiere a las áreas donde no existen tantos edificios, pequeñas ciudades que no tienen edificaciones muy altas; así como, en las áreas donde no existen grandes montañas con muchos árboles, solamente colinas con algunos árboles.

En la figura 4.2 se muestra dos posibles terrenos del tipo B.

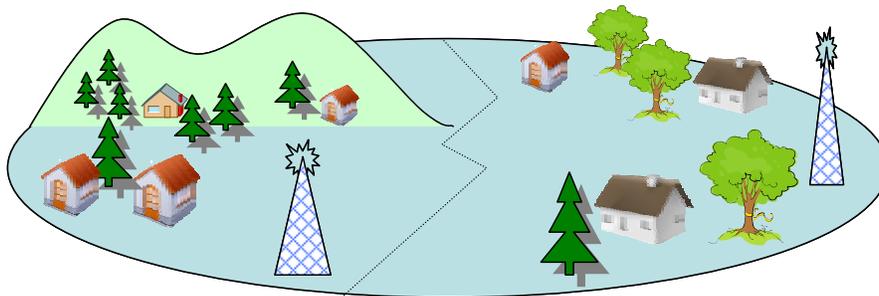


Figura 4.2 Terreno tipo B

### Terreno tipo C

Son áreas donde existen muy pocas edificaciones, y las que existen son de poca altura, casi no existen árboles y el terreno es plano, sin colinas o montañas.

La figura 4.3 muestra un ejemplo de cómo se puede ver un terreno tipo C.

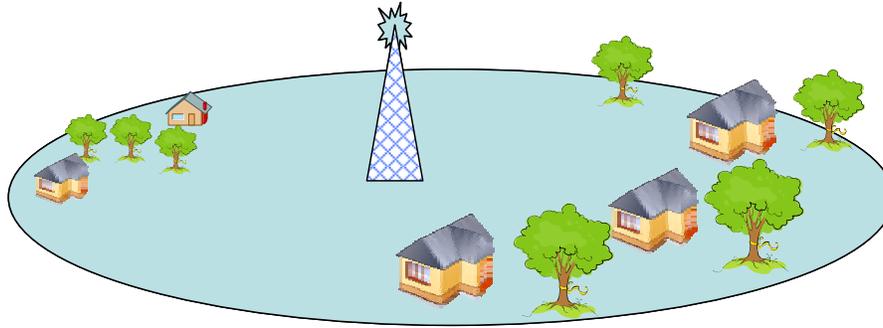


Figura 4.3 Terreno tipo C

#### 4.1.1 Path Loss (Pérdida por trayectoria)

El efecto Path Loss (PL) puede entenderse como la proporción, en decibeles, de la pérdida en la potencia desde que se transmite hasta que se recibe. Reducción de la densidad de potencia conforme se propaga una onda o señal.

Para usuarios móviles, el path loss tiene dos modelos: peatonal y vehicular.

Existen valores sugeridos para realizar pruebas de estos modelos de propagación, la siguiente tabla contiene una relación de tipo de modelo y la movilidad (velocidad) sugerida para cada caso:

Ambiente de prueba	Rango de movilidad sugerido para las simulaciones
Interiores	0 - 3 km/hr
Peatonal	0 - 10 km/hr
Vehicular	0 - 30, 120, 250 km/hr

Tabla 4.1 Rangos de movilidad para simulaciones

##### 4.1.1.1 Path Loss peatonal

El modelo peatonal se obtiene con la siguiente ecuación:

$$PL = 40 \cdot \log_{10}(R) + 30 \cdot \log_{10}(f) + 49 \quad (4.1)$$

donde:

- R - distancia (en metros) entre la BS y MS
- f - frecuencia de la portadora (MHz)

Este modelo es válido para escenarios NLOS solamente y describe el peor escenario de propagación.

### 4.1.1.2 Path Loss vehicular

El path loss promedio para el modelo vehicular está dado por:

$$PL = 40(1 - 4 \times 10^{-3} \cdot \Delta h_b) \log_{10}(R) - 18 \cdot \log_{10}(\Delta h_b) + 21 \cdot \log_{10}(f) + 80 \quad (4.2)$$

donde:

R - distancia (en km) entre la BS y la MS

f - frecuencia (en MHz) de la portadora

$\Delta h_b$  - altura (en metros) de la antena de la BS, medida desde un nivel de techo promedio.

Este modelo solamente es válido para un rango de altura de la antena:  $0 \leq \Delta h_b \leq 50m$ .

En los modelos de PL peatonal y vehicular, al igual que para el modelo fijo, existe el parámetro de shadow fading, el cual se suma al PL obtenido con cualquiera de las fórmulas de PL (ecuaciones 4.1 o 4.2), dicho parámetro de shadow fading tiene un valor distinto para cada tipo de terreno, como se muestra a continuación:

	Tipo A	Tipo B	Tipo C
Shadow fading	10.6	9.6	8.2

Tabla 4.2 Valores de shadow fading por tipo de terreno

## 4.1.2 La razón de la señal a ruido (SNR)

Debido a que existe un reuso de frecuencias, se da lugar a la interferencia, la cual debe mantenerse en un nivel bajo razonable. Por ejemplo, durante una transmisión en DL una MS recibe, además de su señal útil, señales de interferencia desde otras BSs que están utilizando la misma frecuencia.

Los resultados de calcular o estimar la SNR se utilizan para la planificación de redes inalámbricas. Una planificación apropiada es cuando se logra mantener la SNR por encima de un valor establecido (dependiendo del servicio, por ejemplo), mientras se maximiza la capacidad.

También se le conoce como razón o proporción de portadora a interferencia y ruido (Carrier to Interference and Noise Ratio – CINR).

El uso del término SNR se utiliza más en cuestiones de planificación y para ver el lado del receptor; y el término CINR es más usado en operaciones prácticas. Algunas veces, en los textos, SNR y CINR representan el mismo parámetro físico.

### 4.1.2.1 Cálculo de SNR

Para obtener el valor de SNR se requieren una serie de parámetros calculados previamente, a continuación se listan las ecuaciones relacionadas con el cálculo de la SNR:

La SNR se obtiene con la ecuación:

$$\text{SNR [dB]} = \text{Prx [dB]} - \text{N [dB]} \quad (4.3)$$

donde:

Prx – Potencia recibida

N – Ruido térmico, el cual se obtiene con la ecuación 4.4:

$$\text{N [dB]} = 10 \cdot \log_{10}(T \cdot \text{BW} \cdot K_0) + \text{Nf} \quad (4.4)$$

donde:

T – temperatura = 290° K

BW – ancho de banda [Hz]

K<sub>0</sub> – Constante de Boltzmann = 1.38x10<sup>-23</sup> [J/K] (relaciona temperatura absoluta y energía)

Nf – figura de ruido (Noise figure) en el receptor

La potencia recibida se obtiene con la ecuación:

$$\text{Prx} = \text{PIRE} + \text{Grx} - \text{PL [dB]} \quad (4.5)$$

donde:

Grx – ganancia de la antena receptora

PL – Path Loss (ecuaciones 4.1 o 4.2)

PIRE – potencia isotrópica radiada efectiva<sup>4</sup> (Effective Isotropic Radiated Power – EIRP), es la potencia que va a emitir una antena isotrópica y se obtiene con la ecuación 4.6:

$$\text{PIRE} = \text{Ptx} + \text{Gtx} - \text{Lc [dB]} \quad (4.6)$$

donde:

Ptx – potencia de transmisión

Gtx - ganancia de la antena transmisora

Lc – representa las pérdidas del cable y conectores

#### 4.2.1.2 SNR efectiva

El mecanismo actual para reportar la SNR de 802.16e requiere que las MSs reporten directamente la medición del CINR. Este mecanismo no le proporciona a la BS ninguna información sobre la posible selección de una frecuencia de un canal y el ruido (en especial en casos de celdas parcialmente cargadas y con multipath).

Conocer este dato es importante dado que, al contrario de un canal de ruido blanco conocido como AWGN (additive white Gaussian noise), en un canal de frecuencia selectiva, ya no existe

<sup>4</sup> Antena isotrópica es la que radia uniformemente en todas direcciones

una relación 1 a 1 entre el monto de incremento en la potencia y el monto de mejora de la SNR efectiva. (La SNR efectiva en un canal AWGN equivale a la SNR medida).

Además, la relación depende de el nivel de los esquemas de modulación y codificación (Modulation and Coding Schemes - MCS). Además, la falta de conocimiento que tiene la BS, resulta en márgenes más grandes de desvanecimiento, los cuales se traducen directamente en reducción en la capacidad.

Por esto, se propone un mecanismo basado en el modelo de Mapeo Exponencial de la SNR Efectiva (Exponential Effective SNR Mapping - EESM), el cual proporciona a la BS suficiente conocimiento sobre la relación dependiente del canal entre el incremento de la potencia, y el MCS cambia y mejora la SNR efectiva. El método EESM también se conoce como el pronosticador de SNR, dentro del contexto OFDMA.

## EESM

De acuerdo a [18], se utiliza para estimar el desempeño de un demodulador en un canal con señal de frecuencia selectiva y/o ruido.

El EESM, es una función dependiente del canal que mapea niveles de potencia y niveles de MCS para valores de SNR en el dominio de un canal AWGN. Esto permite utilizar este mapeo junto con suposiciones AWGN (tales como efecto de incremento de potencia, tablas de umbral CINR/MCS) con la finalidad de predecir el efecto de MCS y la modificación de incremento. El método ha sido mostrado para capturar una estimación exacta de la SNR equivalente a AWGN (por eso se le conoce como SNR efectiva) para canales de frecuencia selectiva.

El método EESM estima la SNR efectiva utilizando la siguiente fórmula:

$$\gamma_{eff} \equiv EESM(\gamma, \beta) \equiv -\beta \cdot \text{Ln} \left( \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N e^{\frac{\gamma_i}{\beta}} \right) \quad (4.7)$$

donde  $\gamma$  es un vector de los valores SNR por tono, los cuales son típicamente diferentes en un canal selectivo.

En general, se busca que las MSs reporten la SNR efectiva a la BS, y que la BS decida qué modulación y codificación usar, y con qué incremento de potencia. Sin embargo, como ya se dijo, esto es complicado por el hecho de que la relación entre la potencia y el incremento de la SNR efectiva es dependiente del canal y el MCS.

En el contexto de EESM, esto implica que por cada MCS una  $\beta$  debería utilizarse, y por cada una de esas  $\beta$ , diferentes incrementos deberían considerarse. Como un resultado, se requiere que la BS conozca la dependencia de SNR efectiva en  $\beta$  e incremento de potencia; tal cálculo de SNR equivalente no puede permanecer únicamente en el territorio de las MSs.

### 4.3 Medición de la calidad del canal

La medición del RSSI (Receive Signal Strength Indicator) y CINR además de estadísticas asociadas, pueden ayudar en procesos como la selección/asignación de BS, y la selección de un perfil de ráfaga adaptivo. Además la implementación de las estadísticas RSSI y CINR y sus reportes son obligatorios.

Las mediciones de RSSI se pueden realizar de manera confiable incluso con niveles de señal bajos; pero las mediciones de CINR requieren mejores condiciones de la transmisión, ya que proporciona información de la condición real de operación del receptor, incluyendo los niveles de interferencia y ruido, y la fuerza de la señal.

#### 4.3.1 RSSI

Es el nivel de intensidad de la señal recibida; la BS indica a la MS que realice las mediciones de RSSI, esto lo lleva a cabo utilizando una serie de mediciones RSSI para realizar y actualizar estimados de la media y la desviación estándar del RSSI, y reportar esto utilizando mensajes específicos.

Las estadísticas de la media y la desviación estándar se deben reportar en unidades de dBm y dB respectivamente. Los reportes se preparan manejando las estadísticas con rangos desde -40 dBm hasta -123 dBm con incrementos de 1 dB; y los valores que queden fuera del rango mencionado, tomarán el valor del extremo más cercano en la escala.

#### 4.3.2 CINR

Cuando la BS ordena realizar mediciones de CINR física, una SS debe obtener dicha medición, de una serie de estas medidas, la SS realiza y actualiza los estimados de la media y/o desviación estándar de la CINR, y los reporta usando mensajes específicos y/o reportando la media de la CINR física por medio del CQICH (canal de retroalimentación rápida).

Las estadísticas de la media y la desviación estándar del CINR se deben reportar en unidades de dB, los reportes se preparan para utilizar un rango que va desde -10 dB hasta un máximo de 53 dB, con incrementos de 1 dB. Los valores que salgan de este rango, se cambian por el valor del extremo más cercano de la escala.

A manera de definición general, la obtención de la CINR se describe como una expresión matemática que utiliza conceptos generales:

$$\text{CINR} = \text{Potencia de recepción} / (\text{interferencia} + \text{ruido})$$

### 4.4 Funcionamiento de la AMC

Para tomar la decisión de cambio en el perfil de ráfaga la BS guarda dos listas de umbrales: una para UL y otra para DL, cada elemento de la lista correspondiente a un perfil de ráfaga contiene

a su vez dos umbrales de decisión: el mínimo umbral de entrada y el umbral de salida obligatoria.

Existen elementos que dependen de la decisión para cambiar de perfil de ráfaga, que son la eficiencia de la transmisión (en términos de los bits de información por símbolo), y confiabilidad de la recepción.

El cambio de perfil de ráfaga aplica a todas las conexiones establecidas con la MS pero si y sólo si la BS tiene la capacidad de atender el nuevo perfil, en caso de que no pueda, la BS no aprueba dicho cambio.

Todos los cambios de perfil de ráfaga se hacen en la BS basándose en:

- CINR de retroalimentación (feedback) desde la MS (DL)
- Mediciones locales de CINR en la BS (UL)

El proceso de cambio de perfil de ráfaga se lleva a cabo de la siguiente manera:

- Si el nuevo CINR es más pequeño que el CINR actual, la BS debe compararlo contra el umbral “salida obligatoria” y si está debajo de éste, la BS debe decidir si cambiarlo con el mayor umbral “salida obligatoria” que siga siendo menor al CINR actual
- Si el nuevo CINR es más grande que el actual, la BS debe compararlo con el umbral “mínima entrada”, si lo excede, se debe cambiar por el mayor umbral “mínima entrada” que siga siendo mayor al CINR actual

La configuración de los umbrales de decisión, respecto al CINR, en el modelo utilizado para este estudio es la siguiente (Tabla 4.4):

Modulación/Codificación	Salida obligatoria (dB)	Mínima entrada (dB)
QPSK $\frac{1}{2}$	0	5
QPSK $\frac{3}{4}$	4	11
16QAM $\frac{1}{2}$	10	18
16QAM $\frac{3}{4}$	17	25
64QAM $\frac{1}{2}$	24	28
64QAM $\frac{2}{3}$	27	29
64QAM $\frac{3}{4}$	28	30

Tabla 4.3 Umbrales de decisión (AMC)

En la figura 4.4 se muestra la relación entre los umbrales de las mediciones de SNR y las modulaciones y codificación correspondientes a los mismos, mostrando los radios de alcance de la señal de una estación base en el centro de los círculos.

#### 4.4.1 CQI SNR

Este concepto aplica en el caso de estar manejando AMC. El CQI SNR adquiere el valor de 31 dB cuando la medición actual del SNR excede los 31dB, y este nuevo valor será el que se utilice para tomar la decisión de cambio en el perfil de ráfaga (cambio en la modulación y

codificación). En el caso de que no se rebase este umbral de los 40dB, el valor actual del SNR se evaluará sin cambiarlo, para tomar la decisión de cambio de perfil de ráfaga.

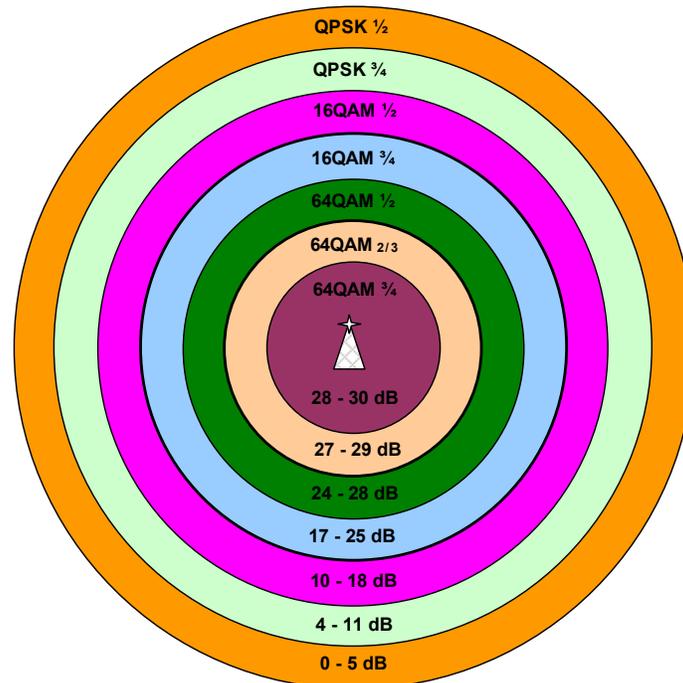


Figura 4.4 Relación de umbrales de SNR y modulación/codificación

#### 4.4.2 Eficiencia espectral

La eficiencia espectral se refiere a la cantidad de información que puede transmitirse, sobre un cierto ancho de banda. Es una medida de que tan eficientemente utiliza el espectro de frecuencia, el protocolo de la capa física y algunas veces la capa MAC.

La unidad de medida de la eficiencia espectral está dada por bits/segundo/Hz. Esto representa la tasa de transmisión neta (o máximo throughput) dividido por el ancho de banda en Hertz de un canal o conexión de comunicación.

Frecuentemente, la eficiencia espectral se utiliza para medir la eficiencia de algún método de modulación digital.

# Capítulo 5

## Análisis de resultados

**E**n este capítulo se presentan los resultados de varias simulaciones que se llevaron a cabo en diferentes escenarios, permitiendo analizar el desempeño de una red inalámbrica WiMAX. Presentando situaciones tales que muestran muy poca demanda de comunicaciones (un solo usuario) o con gran demanda (múltiples usuarios).

Las especificaciones configuradas, se apegan a las regulaciones que deben manejar los productos para las telecomunicaciones en México.

Ya que la descripción y modelos teóricos de los parámetros de análisis para este capítulo se describieron en los capítulos anteriores, en este capítulo se presentan los resultados obtenidos por medio de curvas graficadas con MS Excel, y como salida de las simulaciones realizadas con OPNET Modeler 14.5.

También se presentan resultados por medio de tablas que muestran valores de diferentes parámetros de análisis, obtenidos por expresiones matemáticas o por medio de las simulaciones.

Entre los parámetros más importantes, se presenta la carga ofrecida (en bits por segundo), el throughput (tasas de transmisión en bits por segundo), y retardos principalmente.

Los diferentes parámetros mostrados en este capítulo son importantes para la planeación y configuración de redes inalámbricas móviles, de acuerdo a los tipos de servicios que se quieran proporcionar y los tipos de usuarios que se quieran incluir. Así como para llevar un mejor control de la transmisión de información, monitoreando tasas de transmisión y ajustando configuraciones de acuerdo a las condiciones de las redes en cuestión.

## 5.1 Especificaciones

La configuración correspondiente al componente de WiMAX, es la misma para todos los escenarios mostrados en este capítulo. Se maneja una banda de frecuencia de 3.5 GHz, y tiene los valores correspondientes a las especificaciones SOFDMA de un canal con ancho de banda de 10 MHz, los cuales se muestran en la tabla 5.1:

Parámetro	Valores	
Ancho de banda del canal del sistema (MHz)	10	
Frecuencia de muestreo (Fp en MHz)	11.2	
Tamaño de FFT (NFFT)	1024	
Número de subcanales	16	
Espacio de frecuencias de subportadora	10.94 kHz	
Tiempo de símbolo útil (Tb=1/f)	91.4 μs	
Parámetro	Downlink	Uplink
Ancho de banda del sistema	10 MHz	
Tamaño de FFT	1024	
Subportadoras Nulas	184	184
Subportadoras Piloto	120	280
Subportadoras de datos	720	560
Subcanales	30	35
Periodo de símbolo, Ts	102.9 microsegundos	
Duración del frame	5 ms	
Símbolos OFDM/Frame	48	
Símbolos de datos OFDM	44	

Tabla 5.1 Especificaciones para SOFDMA

### Tasas de transmisión

Las tasas de transmisión que también forman parte de las especificaciones para SOFDMA, se muestran a continuación en la tabla 5.2, estas tasas se obtuvieron al aplicar la expresión matemática (ecuación 5.1) que permite calcular tasas de transmisión para SOFDMA. Cabe mencionar que esta ecuación corresponde a modelos fijos o con poca movilidad, por lo que los datos de la tabla 5.2 pueden variar con respecto a los que se muestran a lo largo de este capítulo, ya que se trata de modelos móviles de tipo vehicular.

Los resultados mostrados en la tabla 5.2 se obtuvieron mediante la herramienta de MS Excel, utilizando las expresiones matemáticas de las ecuaciones 5.1 a 5.3.

A continuación se muestran las expresiones matemáticas utilizadas para obtener las cifras mostradas en la tabla 5.2:

$$T_{UD} \equiv \alpha \cdot \frac{\beta \cdot \varepsilon}{\eta} \quad (5.1)$$

donde:

- $T_{UD}$  – tasa de transmisión del canal (UL/DL)
- $\alpha$  – tasa de transmisión bruta (DL/UL), ecuación 5.2
- $\beta$  – bits por símbolo
- $\epsilon$  – tasa de codificación
- $\eta$  - tasa de repetición

$$\alpha \equiv \tau \cdot \kappa \quad (5.2)$$

donde:

- $\tau$  – total de subportadoras de datos
- $\kappa$  – símbolos de datos por segundo, ecuación 5.3

$$\kappa \equiv \nu \cdot \rho \quad (5.3)$$

donde:

- $\nu$  – símbolos de datos
- $\rho$  – total de frames por segundo

		Canal de 10 MHz	
Modulación	Tasa de Codificación	Tasa de transmisión DL Mbps	Tasa de transmisión UL Mbps
QPSK	½ CTC, 6x	1.06	0.82
	½ CTC, 4x	1.58	1.23
	½ CTC, 2x	3.17	2.46
	½ CTC, 1x	6.34	4.93
	¾ CTC	9.50	7.39
16QAM	½ CTC	12.67	9.86
	¾ CTC	19.01	14.78
64QAM	½ CTC	19.01	14.78
	⅔ CTC	25.34	19.71
	¾ CTC	28.51	22.18
	⅚ CTC	31.68	24.64

Tabla 5.2 Tasas de transmisión calculadas para un canal de 10 MHz

## 5.2 Simulaciones y resultados

Se realizaron varias simulaciones con modelos de redes inalámbricas configurados en OPNET 14.5, utilizando una configuración fija: con una estación base, un servidor de aplicación de voz, un Backbone (IP cloud), y 4 componentes de: configuración de WiMAX, aplicaciones, perfiles de aplicaciones, y configuración de movilidad (cuando se utilizan trayectorias aleatorias).

Se configuraron los canales UL y DL de las MS para utilizar AMC o QPSK  $\frac{1}{2}$  (de acuerdo al escenario), utilizando una clase de servicio Gold (la tasa de transmisión utilizada se define en cada escenario); y los canales de la BS se configuraron con la opción de aceptar la configuración que tuvieran las MSs.

Las simulaciones se realizaron para dos modalidades de escenarios con diferentes tipos de tráfico:

- Escenario con una MS y una BS
- Escenario con una BS y un número variable de MSs

Como parte de la presentación de los parámetros de configuración de los escenarios, a continuación se muestran los valores para los parámetros de configuración de la BS y la MS, los cuales son comunes a todos los escenarios del modelo con una MS que se presentan.

Los parámetros que se muestran son las posiciones de los nodos, las ganancias de sus antenas, la altura de las antenas y los valores máximos de potencia de transmisión; estos valores se listan en la siguiente tabla (5.3):

MS		BS	
x (m)	38,803	x (m)	38,987
y (m)	28,702	y (m)	28,518
antenna gain (dBi)	-1	Antenna gain (dBi)	6
Tx power (W)	0.5	Tx power (W)	1
altitude (m)	2	Altitude (m)	70

Tabla 5.3 Valores de parámetros de MS y BS (Modelo con 1 MS)

Para los escenarios con un número variable de MSs, los datos de la BS y las MS son los mismos que se muestran en la tabla 5.3, exceptuando los valores de la posición de la MS.

Cabe mencionar que los datos observados en la tabla 5.3, están de acuerdo a los estatutos de la Cofetel (Comisión Federal de Telecomunicaciones), en lo que se refiere a las potencias y ganancias de transmisión [19]. A continuación se cita textualmente el texto que corresponde al PIRE máximo permitido:

“La potencia máxima de transmisión entregada a las antenas de los sistemas de radiocomunicación no deberá exceder de 1 W, pudiéndose utilizar antenas de transmisión con ganancia direccional máxima de 6 dBi, de manera que se obtenga una Potencia Isotrópica Radiada Equivalente (PIRE) máxima de 4 W. La densidad de PIRE no deberá exceder de 200 mW/MHz en cualquier banda de 1 MHz.”

\*Debido a esta regularización, se configuran una potencia y una ganancia de la antena de transmisión que cumple con lo citado, aunque actualmente existe equipo que soporta potencias y ganancias de transmisión mayores.

## Tipos de tráfico utilizado en las simulaciones

### Voz

Para el caso del tráfico de voz, se configuró con un codificador G729, el cual maneja una tasa de transmisión de 8 kbps, con un tiempo entre llegadas de 10 frames por segundo. (Véase sección 2.8.1)

### Video

En cuanto al video, se trata de tráfico de video conferencia (tipo pesado configuración de OPNET), que corresponde al formato CIF, donde se tienen frames de 352x240 píxeles, esto es, frames de 84,480 bytes, con una tasa de llegada de 30 frames por segundo. Es decir, se tiene un tamaño de frame de 84,480 bytes, con una tasa aproximada de 2.534 Megabytes por segundo, unos 20.275 Mbps aproximadamente. (Véase sección 2.8.2)

## **Eficiencia volumétrica**

Un concepto importante que aplica a la información que se transmite, es la eficiencia volumétrica, la cual representa la cantidad de información de control que se envía junto con la información que se quiere transmitir, esto es, sobre el total de datos transmitidos se obtiene el porcentaje de los datos que realmente corresponde a la información (el mensaje) que se transmite.

La eficiencia volumétrica se presenta para ambos tipos de tráfico, para que se observe qué tanto se afecta el tamaño de los paquetes de datos que se transmiten, cuando se manejan mensajes pequeños; en este caso, el tráfico de voz maneja mensajes mucho más pequeños que el de video y su eficiencia disminuye en comparación con la eficiencia del video.

La eficiencia volumétrica se obtiene con la siguiente ecuación:

$$E_V \equiv \frac{T_m}{T_m + T_e} \quad (5.4)$$

donde:

- Ev – Eficiencia volumétrica
- Tm – Tamaño del mensaje a transmitir
- Te – Tamaño total de encabezados

Cabe mencionar que el cálculo de la eficiencia se hace a partir de que el mensaje sale de la capa de aplicación, pasando por las capas TCP, IP, y concluye con la salida de los paquetes de la capa MAC, que quedan disponibles para procesarse en la capa PHY (Física) del IEEE 802.16e.

Estos son los encabezados y segmentación que se aplican en cada capa:

Capa	Encabezado (bytes)	Tamaño paquete (bytes)
TCP	20	Con segmentación de 1024
IP	20	Con segmentación de 512
MAC*	7	532

\* se compone de: MAC CS (+1) y MAC CPS (+6)

- La eficiencia volumétrica para la *video-conferencia* se obtiene de la siguiente manera:

tamaño frame 84480 bytes

TCP 82 paquetes de 1024 bytes + 1 paquete de 532 bytes

IP 168 paquetes de 512 bytes + 1 paquete de 124 bytes

Capa	Total paquetes	Tamaños incluyendo encabezado
TCP	82	paquetes de 1044 bytes + 1 paquete de 532 bytes
IP	168	paquetes de 532 bytes + 1 paquete de 144 bytes
MAC	168	paquetes de 539 bytes + 1 paquete de 151 bytes

Utilizando la ecuación 5.4 se obtiene lo siguiente:

$$\text{Total de encabezados} = (82 \cdot 20) + (168 \cdot 20) + (168 \cdot 6) = 6054 \text{ bytes}$$

$$\text{Eficiencia Volumétrica} = 84480 / (84480 + 6054) \quad \text{Eficiencia Volumétrica} = 93.31 \%$$

Esta eficiencia volumétrica nos indica que el 93 % del mensaje transmitido es la información correspondiente al video, lo demás es información de encabezados de control, que se van añadiendo en cada una de las capas por las que pasa un mensaje que se va a transmitir.

- La eficiencia volumétrica para la voz en el escenario 1 se obtiene de la siguiente manera:

Dado que se tiene un muestreo de 10 frames por segundo, y la voz tiene una tasa de 8,000 muestras por segundo (cada muestra es de 1 bit), se calcula el tamaño del frame en bytes resultando lo siguiente:

tamaño frame voz 10 bytes

10 frames/segundo 100 bytes

No hay segmentación, y los datos que se obtienen son:

Capa	Total paquetes	Tamaños incluyendo encabezado
UDP, RTP	1	paquete de 100 bytes
IP	1	paquete de 120 bytes
MAC	1	paquete de 126 bytes

Utilizando la ecuación 5.4 se obtiene lo siguiente:

$$\text{Total de encabezados} = (1 \cdot 20) + (1 \cdot 20) + (1 \cdot 6) = 46 \text{ bytes}$$

$$\text{Eficiencia Volumétrica} = 100 / (100 + 46)$$

$$\text{Eficiencia Volumétrica} = 68.49 \%$$

La eficiencia del tráfico de voz es mucho menor que la de video porque el tamaño de los mensajes de voz son más pequeños, y el tamaño total de encabezados es una proporción más alta con respecto al tamaño de mensaje.

### 5.2.1 Escenario 1 - Modelo con una estación móvil y una estación base

En este escenario, el estudio comprende un extenso análisis del comportamiento de una red móvil que maneja tráfico de voz, entre una estación base (BS) y una estación móvil (MS), con un modelo de propagación vehicular (con una velocidad de 35 Km/hr), en terreno tipo A (descrito en el capítulo 4, véase sección 4.2).

Se tienen dos versiones del escenario 1, una versión es la del modelo con una sola MS y la otra, con un número variable de MSs (hasta 100 nodos activos).

La figura 5.1 muestra el modelo de red del escenario 1, donde se observa la estación móvil (MS\_adaptive\_AMC), la estación base a la que se conecta (BS\_0); a su vez el backbone que conecta a la BS con el servidor de datos y aplicaciones, y los íconos de configuración de las aplicaciones y perfiles a utilizar (por ejemplo, del video o voz), y el de configuración WiMAX.

La MS se mueve con una trayectoria en línea recta haciendo un recorrido en forma de estrella, donde tiene periodos de acercamiento y alejamiento de la BS, como se puede observar en la figura 5.1.

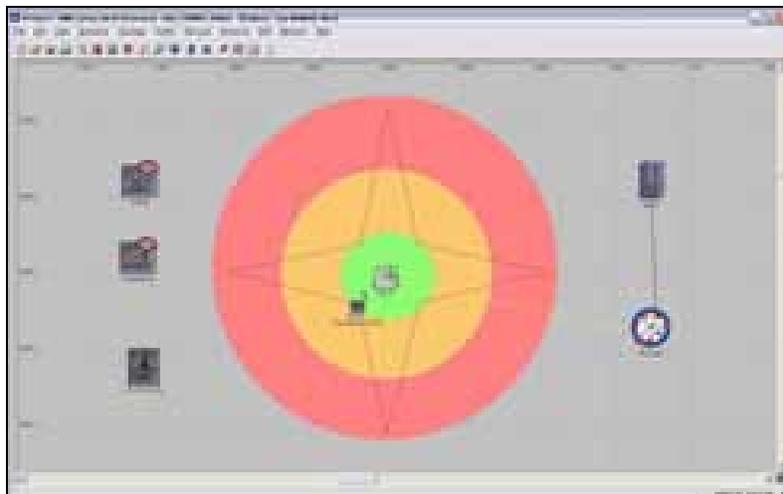


Figura 5.1 Modelo de red - Escenario 1

En este escenario solamente se tiene una MS, ya que la finalidad de la simulación es obtener la capacidad máxima que puede tener esta configuración de red inalámbrica; es decir, medir el rendimiento para transmitir información desde y hacia la BS, sin tener que compartir los recursos de la red con otros usuarios; asimismo, también se evita el ruido e interferencia causado por nodos vecinos, ya sean estaciones móviles o incluso estaciones base vecinas.

La trayectoria que sigue la estación móvil es una línea recta, donde permanece inmóvil por un minuto y comienza a moverse, acercándose y luego alejándose de la estación base con el siguiente comportamiento en el tiempo, con una velocidad de 35 Km/hr (cerca de 10 m/s) y las siguientes características generales:

Trayectoria (fases)	X (m)	Y (m)	distancia recorrida (m)	Tiempo acumulado (s)
1	0	0	0	60
2	192.258	846.756	868.306	149.3
3	402.97	-12.27	884.499	240.29
4	1247.636	-212.711	868.143	329.58
5	388.6	-404.97	880.26	420.12
6	200.439	-1280.361	895.379	512.22
7	12.271	-396.789	903.388	605.14
8	-863.118	-216.802	893.693	697.06
9	-20.453	-12.271	867.143	786.25

Tabla 5.4 Valores de trayectoria de MS1 (Escenario 1)

Se hace un estudio de rendimiento de la transmisión de datos y los cambios de modulación y codificación durante 13.5 minutos de simulación, analizando la carga (load), el rendimiento de bits transmitidos por segundo (throughput), los bits de información por símbolo (para determinar los cambios de modulación y codificación), y el retardo promedio.

En la tabla 5.5 se muestran los resultados del cálculo de distancia entre la BS y la MS durante un periodo de 270 segundos, que corresponde a la parte inicial de la simulación, ya que la trayectoria se puede dividir en 4 partes que tienen el mismo comportamiento.

Los datos que muestra la tabla 5.5 corresponden a la distancia recorrida sobre la trayectoria (columna intermedia), y la distancia entre la BS y la MS (última columna):

Los primeros resultados que se presentan para este escenario, corresponden al cálculo de la razón de señal a ruido (SNR), el cual depende del cálculo de la PL, la potencia de recepción y la distancia entre la estación base y la estación móvil.

En la tabla 5.6 se muestran los valores de resultados obtenidos mediante la herramienta de Excel, para un periodo de 270 segundos a partir de que la MS comienza a moverse (a partir del segundo 60 de simulación).

La tabla 5.6 presenta los valores de los parámetros que son calculados para obtener el SNR (véase sección 4.2). Estos valores se van a comparar con los valores obtenidos con la simulación de OPNET 14.5, generados como salida de la consola del debugger.

	<b>tiempo acumulado (s)</b>	<b>distancia trayectoria (m)</b>	<b>Distancia entre la BS y la MS (m)</b>
	0	0	<b>260.22</b>
	10	97.22386	<b>322.70</b>
	20	194.44772	<b>399.32</b>
	30	291.67158	<b>483.41</b>
	40	388.89544	<b>571.686</b>
	50	486.1193	<b>662.469</b>
	60	583.34316	<b>754.859</b>
	70	680.56702	<b>848.329</b>
	80	777.79088	<b>942.559</b>
<b>Fase 2</b>	<b>90</b>	<b>868.30863</b>	<b>1030.79</b>
	100	97.21912	<b>936.803</b>
	110	194.43824	<b>843.55</b>
	120	291.65736	<b>751.30</b>
	130	388.87648	<b>660.48</b>
	140	486.0956	<b>571.769</b>
	150	583.31472	<b>486.321</b>
	160	680.53384	<b>406.201</b>
	170	777.75296	<b>335.251</b>
<b>Fase 3</b>	<b>180</b>	<b>884.49176</b>	<b>276.417</b>
	190	97.22744	<b>321.391</b>
	200	194.45488	<b>384.774</b>
	210	291.68232	<b>460.127</b>
	220	388.90976	<b>542.484</b>
	230	486.1372	<b>629.1</b>
	240	583.36464	<b>718.437</b>
	250	680.59208	<b>809.594</b>
	260	777.81952	<b>902.02</b>
<b>Fase 4</b>	<b>270</b>	<b>868.1233</b>	<b>988.689</b>

Tabla 5.5 Valores de distancias durante la simulación (Escenario 1)

Por medio de la consola del debugger, se obtuvieron los valores calculados por la simulación para diferentes momentos de la simulación, y así poder compararlos con los resultados obtenidos con las expresiones matemáticas de la tabla 5.6.

Para obtener los mensajes en la consola del debugger, fue necesario incorporar código en las diferentes fases de la comunicación en las conexiones activas de la simulación; y por medio de diferentes comandos en la consola del debugger, se obtuvieron los resultados que se analizarán. Estos mensajes se filtraron para los diferentes momentos (tiempos de simulación) que se analizan en esta sección.

Es muy importante poder obtener la información por medio de la consola del debugger, ya que pueden compararse los resultados obtenidos mediante las expresiones matemáticas de la teoría, con los resultados obtenidos mediante el simulador; y así poder hacer los ajustes necesarios en los modelos teóricos, si así se requiere.

tiempo simulación (s)	PL (dB)	P <sub>RX</sub> (dB)	SNR (dB)	Distancia entre la BS y la MS (m)
60	104.38827	-69.38827	32.06721	260.22
70	107.07995	-72.07995	29.37553	322.70
80	109.74482	-74.74482	26.71066	399.32
90	112.13509	-77.13509	24.32039	483.41
100	114.23283	-79.23283	22.22265	571.686
110	116.07626	-81.07626	20.37921	662.469
120	117.70921	-82.70921	18.74626	754.859
130	119.16934	-84.16934	17.28614	848.329
140	120.48677	-85.48677	15.96870	942.559
150	121.60598	-86.60598	14.84950	1030.79
160	120.41096	-85.41096	16.04452	936.803
170	119.10066	-84.10066	17.35482	843.55
180	117.65390	-82.65390	18.80157	751.30
190	116.04517	-81.04517	20.41031	660.48
200	114.24549	-79.24549	22.20999	571.769
210	112.22804	-77.22804	24.22743	486.321
220	109.98846	-74.98846	26.46702	406.201
230	107.60766	-72.60766	28.84781	335.251
240	105.22771	-70.22771	31.22777	276.417
250	107.99866	-72.99866	28.45681	347.419
260	110.59537	-75.59537	25.86011	427.63
270	112.89006	-77.89006	23.56541	513.752
280	114.89908	-79.89908	21.55640	603.259
290	116.66727	-81.66727	19.78820	694.844
300	118.23780	-83.23780	18.21767	787.782
310	119.64615	-84.64615	16.80933	881.646
320	120.92033	-85.92033	15.53515	976.169
330	122.00288	-87.00288	14.45259	1064.4

Tabla 5.6 Resultados calculados para PL, SNR (Escenario 1)

La información que se observa en la tabla 5.7, corresponde a la transmisión de un paquete de datos que va de la BS a la MS en diferentes momentos (tiempo) de simulación: al inicio, en la parte intermedia y hacia el final del recorrido de una parte (un pico de la estrella).

Los datos que se remarcaron corresponden, en orden de aparición en el mensaje de la consola: Tiempo de simulación (Time), el identificador del paquete de datos transmitido (packet ID), el origen del paquete (source), el receptor del paquete (Module), la potencia de transmisión utilizada (Txed pwr) para enviar el paquete desde la BS hasta la MS, la potencia de recepción, la PL, la distancia entre la BS y la MS, las ganancias de las antenas de transmisión y recepción en dB, y por último la SNR y SNR efectiva en dB.

<p>(ODB 14.5.A: Event)</p> <p>* Time : 60.00561714287 sec, [1m 0s . 005ms 617us 142ns 870ps]                  * Event : execution ID (2025990), schedule ID (#2097155), type (remote (start reception))                  * Source : execution ID (2025989), top.WiMAX Net.BS_0.wimax_port_tx_32_0 [Objid=6041] (radio transmitter)                  * Data : channel (0), packet ID (486576)                  &gt; Module : top.WiMAX Net.MS_adaptive_AMC.wimax_port_rx_0_0 [Objid=7094] (radio receiver)                  WiMAX Power PS                  Txed pwr[1.0000000000000000]watts Rxed pwr[0.000000000086295163]watts                  1/PL[0.000000000027288927] Dist[269.602146633155940000] tx_gain[3.981072] rx_gain[0.794328]                  Txed pwr[30.0000000000000000]dBm Rxed pwr[-70.640135456796159000]dBm                  PL[105.640135456796160000]dB Dist[269.602146633155940000] tx_gain[6.000000]dB rx_gain[-1.000000]dB                  ***** wimax_snr *****                  Rcvd pwr[-70.63873]db SNR[30.871314680727000]dB Efec SNR[30.871315]dB</p>
<p><b>a) inicio de fase 2 de la trayectoria</b></p>
<p>* Time : 140.025205714231 sec, [2m 20s . 025ms 205us 714ns 231ps]                  * Event : execution ID (4938331), schedule ID (#5071975), type (remote (start reception))                  * Source : execution ID (4938330), top.WiMAX Net.BS_0.wimax_port_tx_32_0 [Objid=6041] (radio transmitter)                  * Data : channel (0), packet ID (1269609)                  &gt; Module : top.WiMAX Net.MS_adaptive_AMC.wimax_port_rx_0_0 [Objid=7094] (radio receiver)                  WiMAX Power PS                  Txed pwr[1.0000000000000000]watts Rxed pwr[0.00000000001557561]watts                  1/PL[0.00000000000492544] Dist[945.322530160120100000] tx_gain[3.981072] rx_gain[0.794328]                  Txed pwr[30.0000000000000000]dBm Rxed pwr[-88.075548668382339000]dBm                  PL[123.075548668382340000]dB Dist[945.322530160120100000] tx_gain[6.000000]dB rx_gain[-1.000000]dB                  ***** wimax_snr *****                  Rcvd pwr[-88.07209]db SNR[13.437961046322792]dB Efec SNR[13.437961]dB</p>
<p><b>b) parte intermedia de la fase 3 de la trayectoria</b></p>
<p>* Time : 230.005205714149 sec, [3m 50s . 005ms 205us 714ns 149ps]                  * Event : execution ID (7865123), schedule ID (#8020055), type (remote (start reception))                  * Source : execution ID (7865122), top.WiMAX Net.BS_0.wimax_port_tx_32_0 [Objid=6041] (radio transmitter)                  * Data : channel (0), packet ID (2127229)                  &gt; Module : top.WiMAX Net.MS_adaptive_AMC.wimax_port_rx_0_0 [Objid=7094] (radio receiver)                  WiMAX Power PS                  Txed pwr[1.0000000000000000]watts Rxed pwr[0.000000000041726732]watts                  1/PL[0.000000000013195151] Dist[338.329307851187020000] tx_gain[3.981072] rx_gain[0.794328]                  Txed pwr[30.0000000000000000]dBm Rxed pwr[-73.795856239049158000]dBm                  PL[108.795856239049160000]dB Dist[338.329307851187020000] tx_gain[6.000000]dB rx_gain[-1.000000]dB                  ***** wimax_snr *****                  Rcvd pwr[-73.79712]db SNR[27.712928434633621]dB Efec SNR[27.712928]dB</p>
<p><b>c) parte intermedia de la fase 4 de la trayectoria</b></p>
<p>* Time : 320.010205714067 sec, [5m 20s . 010ms 205us 714ns 067ps]                  * Event : execution ID (11061657), schedule ID (#11279972), type (remote (start reception))                  * Source : execution ID (11061656), top.WiMAX Net.BS_0.wimax_port_tx_32_0 [Objid=6041] (radio transmitter)                  * Data : channel (0), packet ID (3000747)                  &gt; Module : top.WiMAX Net.MS_adaptive_AMC.wimax_port_rx_0_0 [Objid=7094] (radio receiver)                  WiMAX Power PS                  Txed pwr[1.0000000000000000]watts Rxed pwr[0.00000000001408328]watts                  1/PL[0.00000000000445353] Dist[975.549118065018320000] tx_gain[3.981072] rx_gain[0.794328]                  Txed pwr[30.0000000000000000]dBm Rxed pwr[-88.512960890702345000]dBm                  PL[123.512960890702350000]dB Dist[975.549118065018320000] tx_gain[6.000000]dB rx_gain[-1.000000]dB                  ***** wimax_snr *****                  Rcvd pwr[-88.51161]db SNR[12.998435082959487]dB Efec SNR[12.998435]dB</p>
<p><b>d) parte final de la fase 4 de la trayectoria</b></p>

Tabla 5.7 Corrida de la consola del Debugger PL y SNR (Escenario 1)

Con los resultados de las tablas 5.6 y 5.7, ya se tiene la información suficiente para comparar los resultados teóricos, con los prácticos, esta comparación se muestra en la tabla 5.8, tomando los parámetros más importantes en el cálculo de la SNR, es decir, potencia de recepción, distancia entre BS y MS, y el valor de la PL.

<b>Tiempo de simulación</b>	<b>60 segundos</b>	
<b>Parámetro</b>	<b>Valor teórico</b>	<b>Valor práctico</b>
Potencia Rx	-69.38827 dB	-70.64 dB
Distancia	260.22 m	269.6 m
PL	104.38827 dB	105.64 dB
SNR	32.06721 dB	30.871 dB
<b>Tiempo de simulación</b>	<b>140 segundos</b>	
<b>Parámetro</b>	<b>Valor teórico</b>	<b>Valor práctico</b>
Potencia Rx	-85.48677 dB	-88.075 dB
Distancia	942.559 m	945.32 m
PL	120.48677 dB	123.075 dB
SNR	15.96870 dB	13.438 dB
<b>Tiempo de simulación</b>	<b>230 segundos</b>	
<b>Parámetro</b>	<b>Valor teórico</b>	<b>Valor práctico</b>
Potencia Rx	-72.60766 dB	-73.795 dB
Distancia	335.251 m	338.33 m
PL	107.60766 dB	108.795 dB
SNR	28.84781 dB	27.713 dB
<b>Tiempo de simulación</b>	<b>320 segundos</b>	
<b>Parámetro</b>	<b>Valor teórico</b>	<b>Valor práctico</b>
Potencia Rx	-87.00288 dB	-88.513 dB
Distancia	976.169 m	975.55 m
PL	120.92033 dB	123.513 dB
SNR	15.53515 dB	12.998 dB

Tabla 5.8 Tabla comparativa en la obtención de PL y SNR (Escenario 1)

Las diferencias encontradas entre los valores teóricos y prácticos, se deben a que en el cálculo de los valores teóricos se hace uso de diferentes expresiones matemáticas y fórmulas para calcular algunos parámetros que permitan describir las trayectorias, utilizando teoría de triángulos rectángulos se obtienen ángulos para calcular posiciones y distancias de la MS; todo este tipo de aproximaciones y el uso de cierto número de decimales, causan diferencias entre los cálculos obtenidos con Excel y los que arroja la simulación.

En la figura 5.2 se presentan las gráficas correspondientes a PL y SNR. Se muestran como un par de curvas cada una, y dichas curvas fueron graficadas con la herramienta de MS Excel; una curva se generó por medio de los resultados obtenidos de las expresiones matemáticas programadas en Excel, y la otra curva se obtuvo con la exportación de los datos generados por la simulación de OPNET 14.5; de esta forma puede compararse en una misma gráfica las curvas obtenidas de manera teórica y práctica, y poder apreciar las diferencias o similitudes entre ellas.

Como ya se mencionó en párrafos anteriores, las diferencias que se observan en las curvas de la figura 5.2, se debe a las aproximaciones de los cálculos para recorrer las trayectorias y obtener las distancias entre la MS y BS en ciertos momentos de la simulación. Estas diferencias

se acentúan, como puede observarse en las gráficas a) y b) de la figura 5.2, se acentúan cuando se describe el primer y tercer picos de las curvas, que son momentos en los que la trayectoria va alejando a la MS de la BS, y la obtención de las distancias entre la BS y la MS se desfasa más por los ángulos calculados.

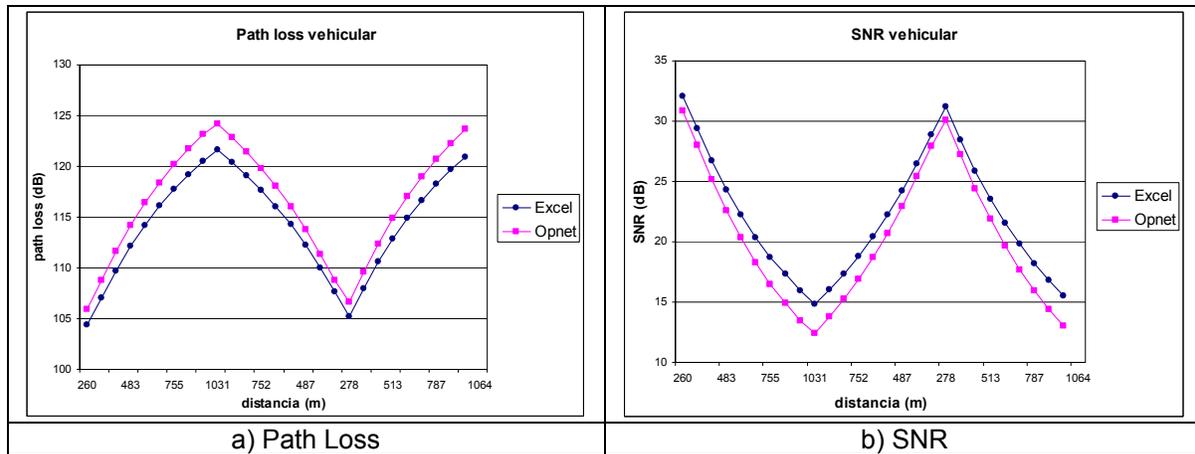


Figura 5.2 Path Loss y Razón señal a ruido (Escenario 1 sin shadow fading)

Otra razón importante por la que se dan estas diferencias es, que los datos utilizados para graficas las curvas generadas por OPNET, fueron muestreadas por segundo, es decir, cada segundo de simulación se recolectó el valor máximo del parámetro en cuestión (SNR o PL).

Aunque se tienen pequeñas diferencias en los cálculos de los valores teóricos, con respecto a los prácticos, se puede considerar que el modelo teórico programado en Excel, se encuentra bien diseñado y está arrojando buenos resultados.

Las gráficas de SNR mostradas en la figura 5.3 son del SNR tanto para el canal DL como para el canal UL, corresponden al tiempo total de simulación (13.5 minutos), el cual permite recorrer toda la trayectoria del escenario 1. En esta figura se puede observar que el SNR del canal UL es un poco menor que para el canal DL, pero conservando un comportamiento muy similar para ambos canales.

### 5.2.1.1 Análisis del canal UL y la ganancia en la antena de la MS

Ya que el SNR para el canal de UL es el que rige la transmisión desde la MS hacia la BS, se le tomó en cuenta para poder mostrar la relación de la potencia de transmisión en la MS, con respecto a la distancia máxima que puede tener con respecto a la BS manteniendo un SNR mínimo, en este caso de 5dB (valor teórico suficiente para poder transmitir utilizando modulación QPSK).

Las diferentes simulaciones se realizaron con un escenario muy parecido al escenario1, y con una configuración de la MS y la BS muy similares, pero por razones de análisis en alcances de cobertura, la ganancia se manejó con dos valores diferentes para mostrar el impacto que pueden tener los mismos. El primer análisis se realizó para una ganancia de la antena receptora de la MS de -1 dBi y el segundo para 14 dB.

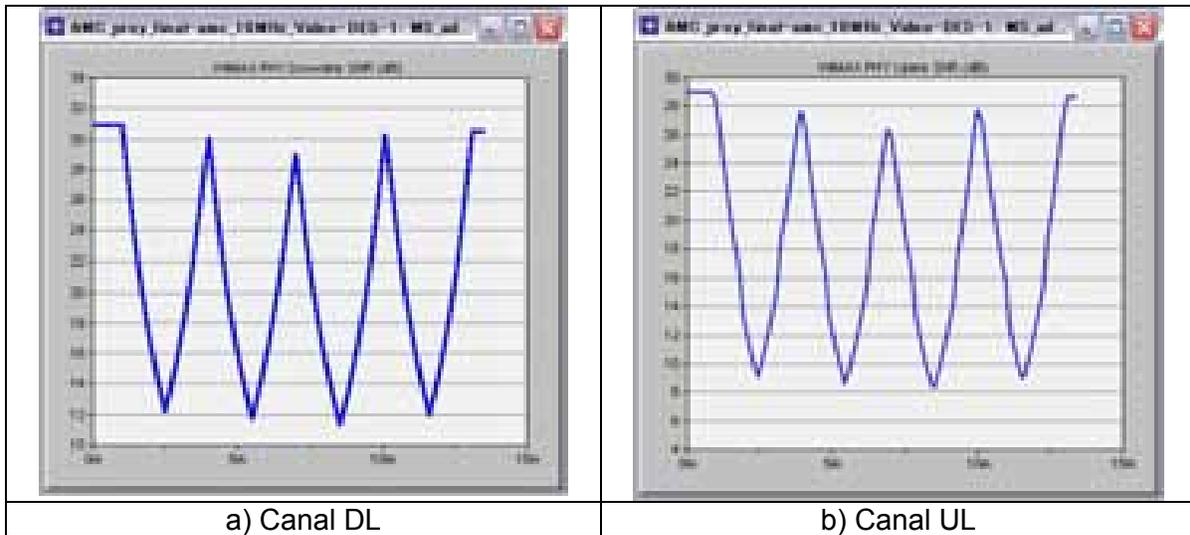


Figura 5.3 Razón señal a ruido para los canales DL y UL (Escenario 1)

La figura 5.4 muestra la configuración del escenario para este análisis, donde la trayectoria de la MS es en línea recta, donde la MS se va alejando de la BS.

La finalidad de este estudio es mostrar el impacto que puede tener el aumento en la ganancia de la antena receptora, en la distancia máxima que puede alcanzar la cobertura de la señal de una estación base, sin tomar en cuenta el inminente incremento de la interferencia con nodos vecinos.

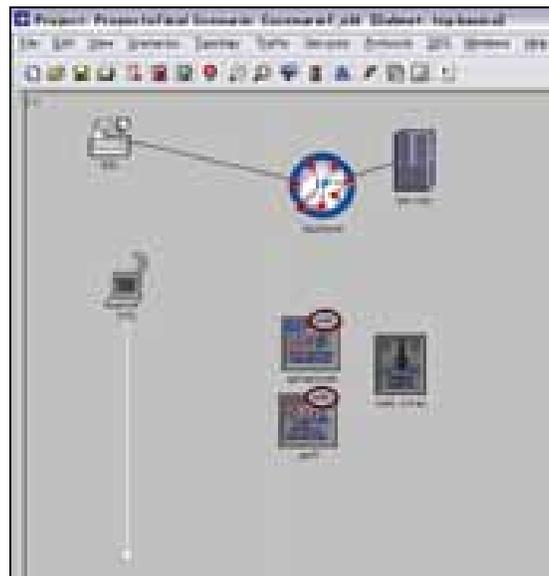


Figura 5.4 Escenario para estudio de ganancia y potencia de la MS

En la figura 5.5 se muestran las curvas para las dos ganancias de la antena de la MS, antes mencionadas, de -1 dB y para 14 dB, donde se muestra la distancia máxima alcanzada para ciertos niveles de potencia. Se puede observar la gran diferencia entre las curvas, siendo la curva de -1 dB casi una tercera parte de la curva para los 14 dB.

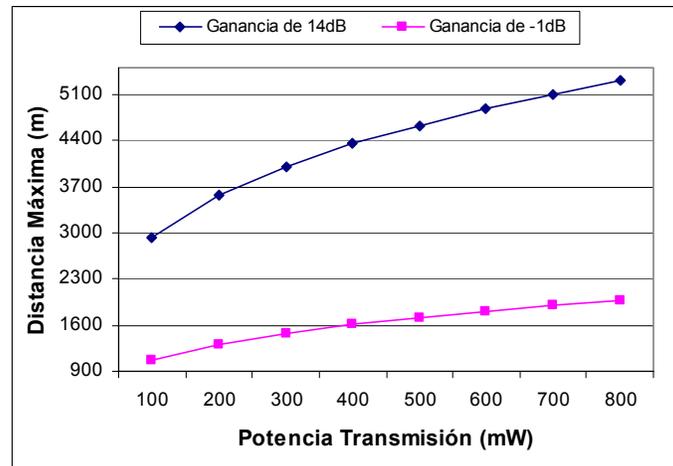


Figura 5.5 Potencia de transmisión vs. distancia máxima

- Ganancia de la antena de la MS de -1 dB**  
Al aumentar la potencia en la MS se obtiene mayor cobertura (en distancia), aunque esta “ganancia” no es muy grande una vez que se sobrepasan los 400 mW, donde se obtuvo una ganancia de aproximadamente máximo 100 m por cada incremento de 100 mW.
- Ganancia de la antena de la MS de 14 dB**  
El crecimiento de la curva es mucho mayor que en el caso anterior, las distancias máximas son considerablemente mayores, incluso la distancia máxima inicial es mayor que la lograda con 800 mW para el caso de ganancia de -1dB.

También se muestra la tabla 5.9, que contiene las distancias máximas alcanzadas con cada ganancia para diferentes potencias. En esta tabla se puede observar que la diferencia entre ambos casos, disminuye a partir de los 400mW, donde ya no es tan grande como a los 100mW.

- Ganancia de la antena de la MS de -1 dB**  
Se muestra que después de los 500 mW, los incrementos de distancia no son tan notables como los anteriores, se hacen de casi 100m. Es importante considerar estos comportamientos, ya que aumentar potencia requiere mayor consumo de energía del usuario móvil, y debe considerarse qué tanto se puede ganar cobertura sin incrementar demasiado el consumo de energía.
- Ganancia de la antena de la MS de 14 dB**  
Los incrementos en la distancia máxima de cobertura, son más grandes antes de los 400 mW, como sucede en el caso de ganancia de -1 dB, y la proporción en que se dan

estos incrementos es muy similar entre ambos casos, después de los 500 mW en un caso son de aproximadamente 100 m y en el otro son casi de 300 m.

Potencia (mW)	Distancia (m)	
	Ganancia de -1 dB	Ganancia de 14 dB
100	1076.5306	2919.700
200	1312.86	3558.916
300	1479.9224	4000.779
400	1608.2042	4344.470
500	1716.534	4628.920
600	1805.439	4879.152
700	1894.1545	5100.659
800	1963.8765	5299.807

Tabla 5.9 Potencia de la MS y distancia máxima

En resumen, lo que sucede en el segundo caso, de 14 dB, es que la interferencia aumenta como lo hace la distancia de cobertura, y esto puede ocasionar muchos problemas de ruido e interferencia entre nodos. Si bien aumentar la ganancia de la antena mejora el alcance de la cobertura, existe el riesgo de incrementar demasiado la interferencia, y de esta forma afectar demasiado la transmisión de la información.

### 5.2.1.2 Funcionamiento de la AMC

#### Escenario 1 con tráfico de video con modelo vehicular sin shadow fading

Dado que el estudio del funcionamiento de la AMC es la parte central de esta tesis, se presenta un análisis muy detallado del mismo, mediante tablas, gráficas y mensajes de la consola del debugger, principalmente. De esta forma se pueden presentar resultados donde pueden compararse los valores teóricos y valores prácticos, analizar los comportamientos de curvas en diferentes versiones de un mismo escenario, pero sobre todo, resaltando el impacto que tiene el uso de la AMC en los diferentes casos de estudio que aquí se presentan.

Cabe mencionar que los conceptos de eficiencia espectral (véase sección 4.4.2), y de bits de información por símbolo, se consideran como el mismo indicador para este análisis de la AMC. Y este indicador se muestra como número de bits de información por símbolo. El valor de la eficiencia espectral refleja el efecto que tiene la AMC sobre el rendimiento de una red, permite realizar comparaciones con modelos de modulación y codificación fijos.

En esta sección se presentarán resultados de simulaciones de diferentes versiones del escenario 1, de tal forma que se analicen diferentes situaciones para evaluar el uso de la AMC. El análisis detallado del funcionamiento de la AMC, se realiza con el tráfico de video, el cual, por manejar una carga de transmisión del orden de los 20 Mbps, permitió analizar más fácilmente los parámetros correspondientes al estudio que se presenta en esta tesis.

El tráfico de video se utiliza porque tiene la característica de manejar tráfico en ambos canales los de UL y DL; de esta forma permite mostrar el análisis de la capacidad de transmisión y recepción del modelo de red simulado. El tráfico de video conferencia será muy útil para cumplir con uno de los objetivos de este análisis, el cual es verificar la capacidad máxima con tráfico real, enviando y recibiendo datos.

La configuración de la modulación y codificación de la MS, además de ser AMC, se seleccionó como clase de servicio la tipo Gold, que maneja una calidad de servicio eRTPS con una tasa máxima de transmisión de 4 Mbps (en cada canal).

### Cambio de perfil de ráfaga

El proceso de evaluación de CINR, para elegir el cambio de perfil de ráfaga (la modulación y codificación), se realizó de acuerdo a la tabla de umbrales (Tabla 4.4). Cabe mencionar que la modulación y codificación iniciales, en una simulación con la opción de modulación *adaptiva*, son QPSK con codificación  $\frac{1}{2}$ .

Al igual que en otras secciones de este capítulo, el uso de los mensajes de la consola del debugger, es una parte muy importante en el análisis del proceso del cambio de perfil de ráfaga. En este caso se tuvo que implementar (codificar) el comando y configurar la salida a la consola, que muestra los datos necesarios para la toma de decisión del cambio de perfil de ráfaga, así como también muestra los parámetros y sus valores correspondientes a los cambios de modulación y codificación. Esta información que se obtuvo como mensaje de salida en la consola del debugger, se muestra en la tabla 5.10.

Mediante mensajes en la consola del Debugger de la simulación, se obtuvieron las mediciones del CINR actual y los umbrales contra los que se comparaba dicho valor; dado que se generan archivos demasiado grandes para esto, solamente se muestran porciones de los mismos.

Se pueden observar diferentes parámetros de estudio en los mensajes de la consola, siendo los más notables, el tiempo en que se envió el paquete de datos, origen y destino del mismo, el canal de transmisión (UL o DL) de la MS donde aplica el cambio de modulación y codificación; y por último, se muestran los valores medidos que se utilizaron para tomar la decisión del cambio de ráfaga.

Los siguientes mensajes de la consola, corresponden al periodo de tiempo donde se observan mejor los cambios de modulación y codificación de la simulación, asimismo, se muestran las curvas para los canales UL y DL en la Figura 5.6 b). Dicho periodo se encuentra en el rango de los 570 a 660 segundos aproximadamente.

En la tabla 5.10 se tienen diferentes mensajes de la consola del debugger, y son los siguientes:

- a) se observa un mensaje de consola que corresponde al primer cambio de modulación y codificación que se realizó en la simulación, el cual sucedió en el tiempo de simulación de 566.94 segundos, la BS\_0 es la que manda la información a la MS para que cambie la modulación y codificación del canal DL a 16QAM  $\frac{1}{2}$
- b) Hacia la mitad de la simulación (625.78 segundos), la BS indica que se realice un cambio en el canal DL de la MS, de una modulación/codificación actual 64QAM  $\frac{1}{2}$  a una nueva 64QAM  $\frac{2}{3}$

- c) Por último, hacia el final del periodo elegido para análisis (642.46 segundos), la BS indica a la MS hacer un cambio en el canal DL, de modulación/codificación 64QAM 1/2 a 16QAM 1/2

<pre> (ODB 14.5.A: Event) * Time : 566.94328937099 sec, [9m 26s . 943ms 289us 370ns 990ps] * Event : execution ID (19149102), schedule ID (#19443781), type (stream intrpt) * Source : execution ID (19149101), top.WiMAX Net.BS_0.wimax_port_rx_32_0 [Objid=6038] (radio receiver) * Data : instrm (0), packet ID (5349906) &gt; Module : top.WiMAX Net.BS_0.wimax_mac_32_0 [Objid=5752] (processor)   Device: MS_adaptive_AMC, Direction: DL   Changed Modulation and Coding from QPSK 1/2 to 16-QAM 1/2 for all service flows ***** wimax_amc nuevo perfil***** sim_time[566.94329] SS: MS_adaptive_AMC med actual[24.000000] min_ent[25.000000] sal_obl[10.000000] sim_time[566.94329] SS: MS_adaptive_AMC modo_nuevo 16-QAM codigo_nuevo 1/2                 </pre>
<b>a) Inicio de la simulación</b>
<pre> (ODB 14.5.A: Event) * Time : 625.783289370936 sec, [10m 25s . 783ms 289us 370ns 936ps] * Event : execution ID (21479110), schedule ID (#21843223), type (stream intrpt) * Source : execution ID (21479109), top.WiMAX Net.BS_0.wimax_port_rx_32_0 [Objid=6038] (radio receiver) * Data : instrm (0), packet ID (5944601) &gt; Module : top.WiMAX Net.BS_0.wimax_mac_32_0 [Objid=5752] (processor)   Device: MS_adaptive_AMC, Direction: DL   Changed Modulation and Coding from 64-QAM 1/2 to 64-QAM 2/3 for all service flows ***** wimax_amc nuevo perfil***** sim_time[625.78329] SS: MS_adaptive_AMC med actual[28.000000] min_ent[30.000000] sal_obl[27.000000] sim_time[625.78329] SS: MS_adaptive_AMC modo_nuevo 64-QAM codigo_nuevo 2/3                 </pre>
<b>b) Parte media de la simulación</b>
<pre> (ODB 14.5.A: Event) * Time : 642.463289370921 sec, [10m 42s . 463ms 289us 370ns 921ps] * Event : execution ID (22156853), schedule ID (#22541207), type (stream intrpt) * Source : execution ID (22156852), top.WiMAX Net.BS_0.wimax_port_rx_32_0 [Objid=6038] (radio receiver) * Data : instrm (0), packet ID (6113366) &gt; Module : top.WiMAX Net.BS_0.wimax_mac_32_0 [Objid=5752] (processor)   Device: MS_adaptive_AMC, Direction: DL   Changed Modulation and Coding from 64-QAM 1/2 to 16-QAM 1/2 for all service flows ***** wimax_amc nuevo perfil***** sim_time[642.46329] SS: MS_adaptive_AMC med actual[24.000000] min_ent[28.000000] sal_obl[17.000000] sim_time[642.46329] SS: MS_adaptive_AMC modo_nuevo 16-QAM codigo_nuevo 1/2                 </pre>
<b>c) Final de la simulación</b>

Tabla 5.10 Cambios de modulación/codificación (consola del debugger)

Los datos mostrados en la tabla 5.10 se pueden agrupar de forma tal que, se observe de manera más sencilla como se aplicaron los criterios para realizar el cambio de ráfaga. En la

tabla 5.11 se lleva a cabo este análisis de cambio de ráfaga, utilizando los umbrales de decisión de la Tabla 4.4 sección 4.4.

La decisión de cambio de perfil de ráfaga se hace en un solo tipo de umbral (de mínima entrada o salida obligatoria) dependiendo del valor medido con respecto al actual (si es mayor o menor).

Y por eso se remarca la celda del valor del umbral tomado en cuenta para el cambio, en las columnas de la tabla se muestran los resultados como se obtuvieron en la consola del debugger de la simulación.

tiempo sim. (s)	medición actual de SNR	minima entrada (dB)	salida obligatoria ( dB)	cambios > Fuente : top.basica.BS1.wimax_mac_32_0	
566.94	24	25	10	modo_nuevo 16-QAM código_nuevo 1/2 Device: MS_adaptive_AMC, Direction: DL	Changed Modulation and Coding from QPSK 1/2 to 16-QAM 1/2 for all service flows
625.78	28	30	27	modo_nuevo 64-QAM código_nuevo 2/3 Device: MS_adaptive_AMC, Direction: DL	Changed Modulation and Coding from 64-QAM 1/2 to 64-QAM 2/3 for all service flows
642.46	24	28	17	modo_nuevo 16-QAM código_nuevo 1/2 Device: MS_adaptive_AMC, Direction: DL	Changed Modulation and Coding from 64-QAM 1/2 to 16-QAM 1/2 for all service flows

Tabla 5.11 Ejemplos de mediciones para realizar el cambio de perfil de ráfaga

Las gráficas de la figura 5.6 muestra el número de bits de información por símbolo vs. el tiempo de simulación transcurrido, para los canales DL y UL. Se hizo un acercamiento a las curvas mostradas en a), durante un periodo entre 9 y 11 minutos aproximadamente, que corresponde al mismo periodo utilizado para el análisis de la tabla 5.10. En las curvas de la figura b), se observa más claramente los cambios de modulación/codificación para ambos canales (UL y DL).

La tabla 5.12 muestra la equivalencia del tipo de modulación/codificación que corresponde al número de bits de información por bit, para poder interpretar las curvas mostradas en la figura 5.6.

Modulación/Codificación	Bits de Información por símbolo
QPSK 1/2	1
QPSK 3/4	1.5
16QAM 1/2	2
16QAM 3/4	3
64QAM 1/2	3
64QAM 2/3	4
64QAM 3/4	4.5

Tabla 5.12 Bits de información por símbolo por tipo de modulación/codificación

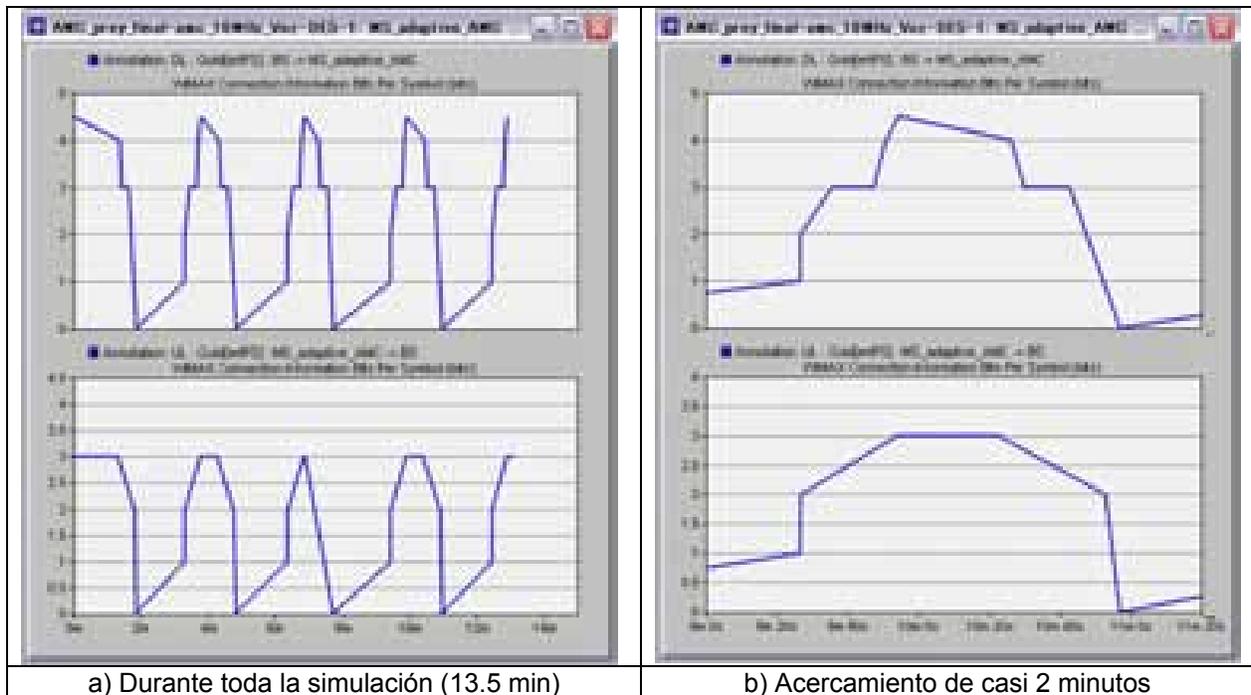


Figura 5.6 Bits de información por símbolo para los canales DL y UL

La figura 5.7 presenta las curvas correspondientes a los cambios de modulación y codificación de los canales de DL y UL, basadas en la tabla 5.12 y en los resultados obtenidos mediante las gráficas de la figura 5.6, obtenidas con el simulador de OPNET 14.5.

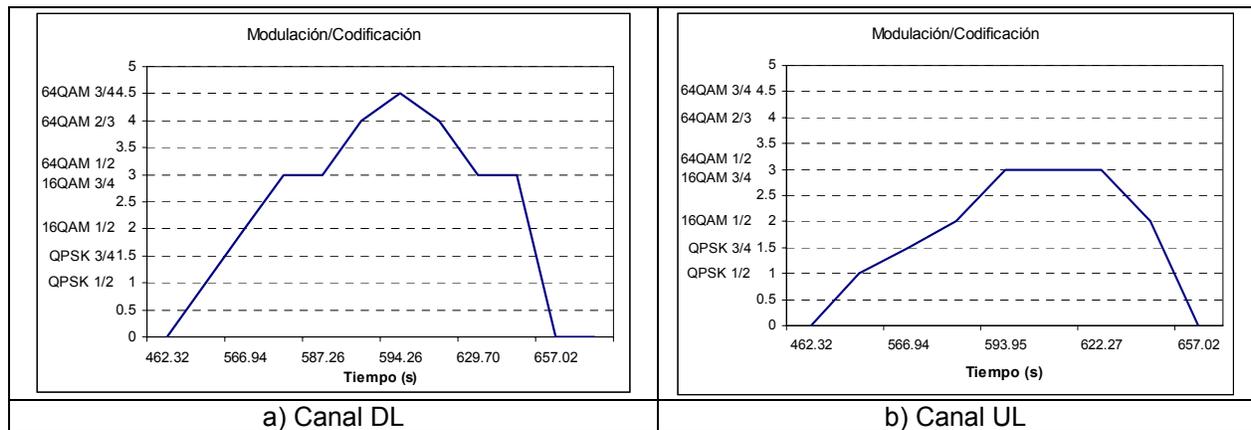


Figura 5.7 Cambios en la Modulación y codificación (Escenario 1 tráfico de video)

En la figura 5.7, se puede observar en ambas curvas que las modulaciones/codificaciones 16QAM  $\frac{3}{4}$  y 64QAM  $\frac{1}{2}$  coinciden en el número de 3 bits de información por símbolo, sin embargo, para la toma de decisión del cambio de perfil de ráfaga, lo que se toma en cuenta es el SNR actual que se tiene y se compara con los umbrales de decisión correspondientes (Tabla 4.4).

Para poder analizar el efecto que estos cambios de modulación y codificación pueden tener en el rendimiento de la red, se obtuvieron las gráficas correspondientes a carga (load) y rendimiento de transmisión de bits (throughput), y de retardo end-to-end (tiempo que tarda un paquete de datos en ir desde un origen hasta su destino final).

En la figura 5.8 se presentan las curvas de la carga y throughput para los canales DL y UL, con dos modos de presentación, las curvas generadas durante toda la simulación y, el de acercamiento, que muestra las curvas durante el periodo de tiempo (entre 9 y 11 minutos).

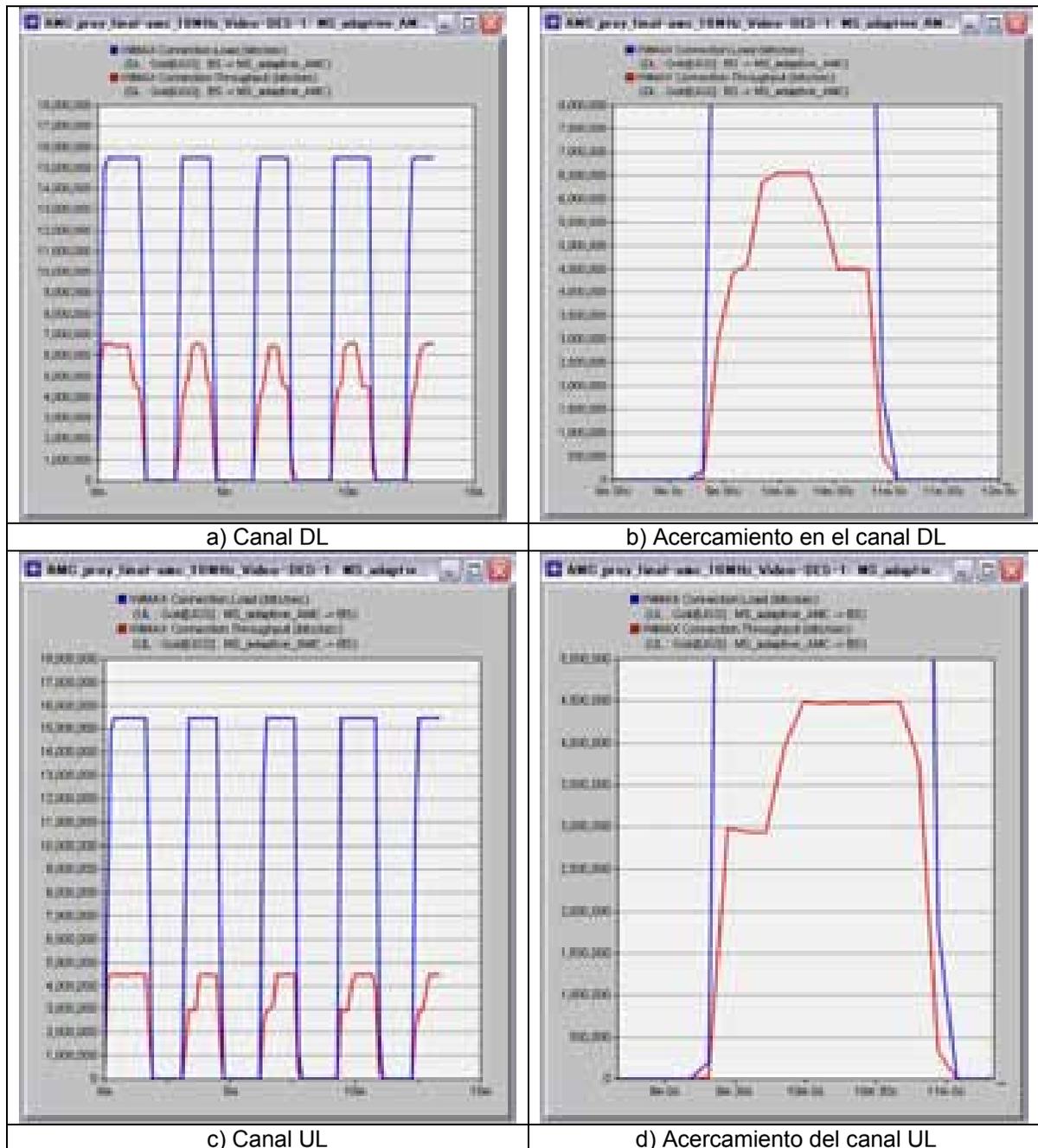


Figura 5.8 Efecto de la AMC en la Carga y Throughput (tráfico de video)

Para este análisis, se utiliza una carga de aproximadamente 15 Mbps en ambos canales, con la finalidad de obtener el máximo throughput de este modelo de red para cada canal (DL y UL). Este tipo de tráfico existe en sistemas de transmisión de HDTV sobre IP como se describe en [22], los cuales manejan tasas aproximada de 20 Mbps.

Para el canal DL se observa que el throuhput alcanzó hasta los 6.5 Mbps y para el canal UL de 4.5 Mbps, dando un total de aproximadamente 11 Mbps.

Si se comparan las curvas de la figura 5.7 con las de la figura 5.8, se puede distinguir que el cambio de las modulaciones y codificaciones afectó el throughput de forma tal que, se definen curvas que forman figuras muy similares, en ambos canales de transmisión.

En la figura 5.9 se muestran las curvas del retardo end-to-end, donde también se observa el efecto que tuvo el cambio de modulación y codificación, al principio y final de la curva, tiene valor de cerca de 0.2 segundos, pero durante la parte media de la curva tiene un retardo menor a 0.1 segundos que es el momento en que el throughput es mayor.

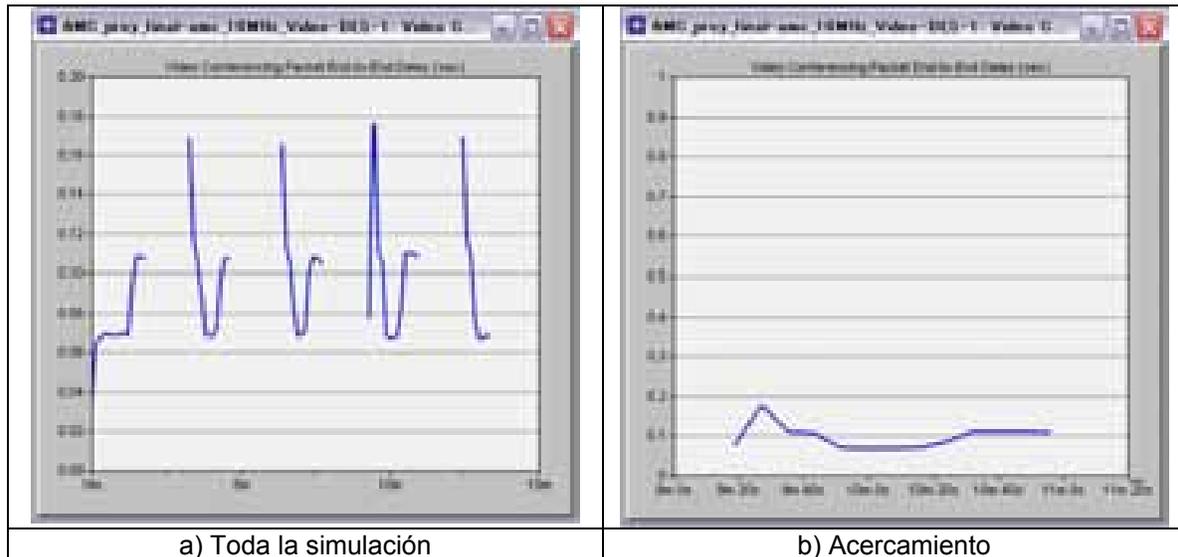


Figura 5.9 Efecto de la AMC en el retardo end-to-end (tráfico de video)

Después de haber hecho el estudio detallado del funcionamiento de la AMC, a continuación se muestran otras configuraciones del Escenario 1, manejando diferentes tipos de tráfico y diferentes modelos de propagación, para poder observar el rendimiento del modelo de red del escenario 1, entre estas diferentes configuraciones.

Se muestran gráficas similares a las utilizadas en el estudio detallado, pero solamente se presentan las que ofrecen los indicadores que se relacionan con el rendimiento de la red.

Las variantes a mostrar son:

- Tráfico de video con modelo vehicular con shadow fading
- Tráfico de voz con modelo vehicular sin shadow fading

**Escenario 1 con tráfico de video con modelo vehicular con shadow fading**

Para este caso, tanto el efecto PL como la SNR son diferentes a los mostrados en el caso sin shadow fading, y por esta causa, se muestran sus gráficas en la figura 5.10; ya que al modificarse estos parámetros, se originan cambios que se analizan a continuación.

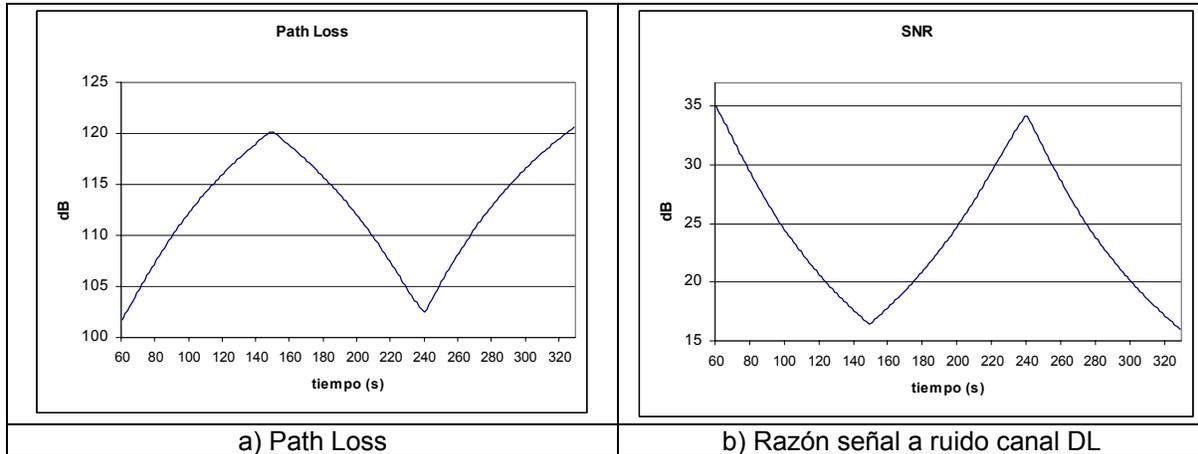


Figura 5.10 PL y SNR en modelo vehicular con shadow fading

En la figura 5.11 se puede observar la forma en que el throughput del canal UL se afectó mucho más que el del canal DL, con respecto al modelo sin shadow fading, ya que el canal UL tuvo momentos en los que perdió la conexión, y esto se puede observar claramente en la curva del inciso d).

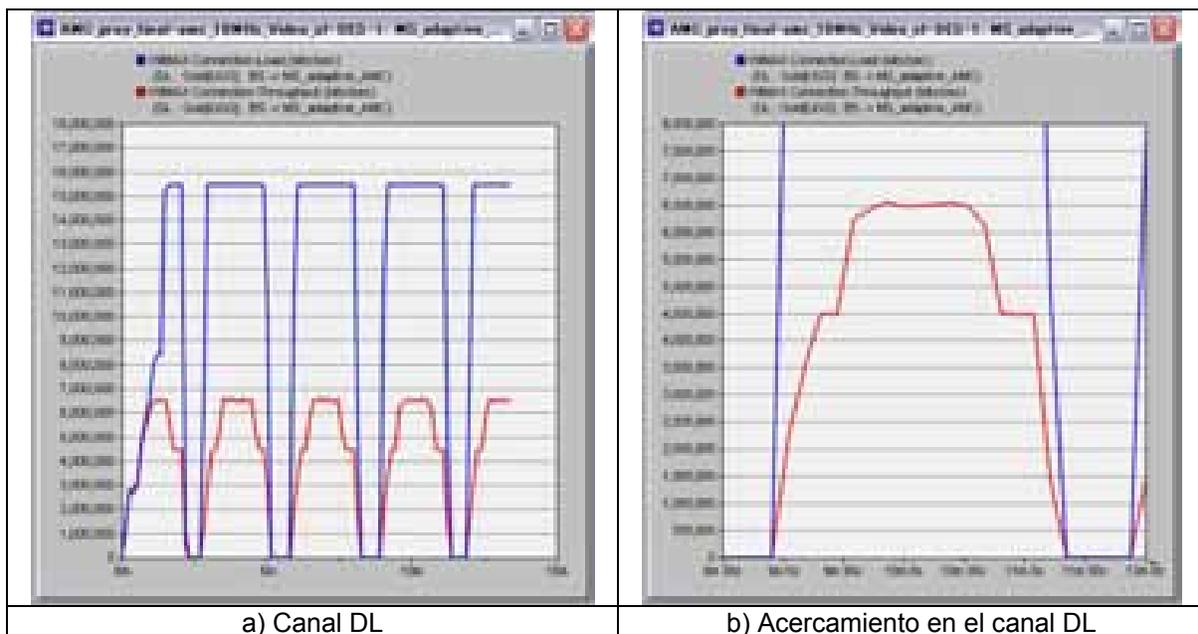


Figura 5.11 Efecto de la AMC en la Carga y Throughput – Canal DL (tráfico de video)

El canal DL como puede observarse en la curva del inciso b), tuvo un comportamiento muy similar al observado en el modelo sin shadow fading.

En la figura 5.12 se puede observar la forma en que el throughput del canal UL se afectó mucho más que el del canal DL, con respecto al modelo sin shadow fading, ya que el canal UL tuvo momentos en los que perdió la conexión, y esto se puede observar en la curva del inciso b).

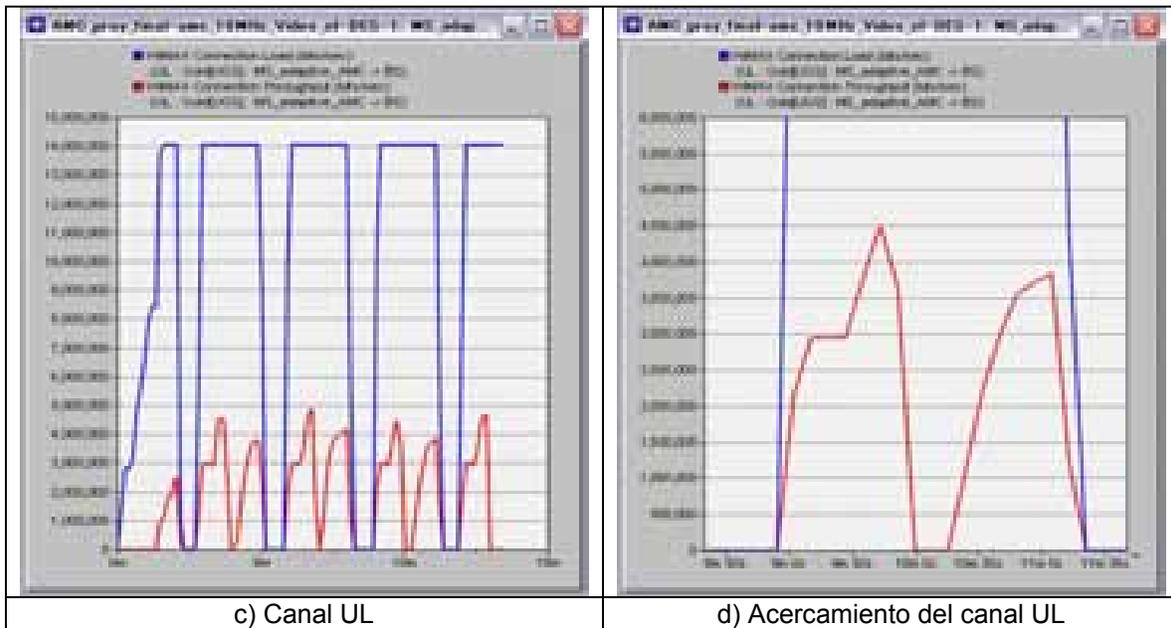


Figura 5.12 Efecto de la AMC en la Carga y Throughput – Canal UL (tráfico de video)

En la figura 5.13 se muestra la gráfica del retardo end-to-end. Dicho retardo osciló entre los valores aproximados de 0.1 y 0.2 segundos. Un poco mayor que el modelo sin shadow fading mostrado en la figura 5.9, donde ni siquiera se acercó al valor de 0.2 segundos.

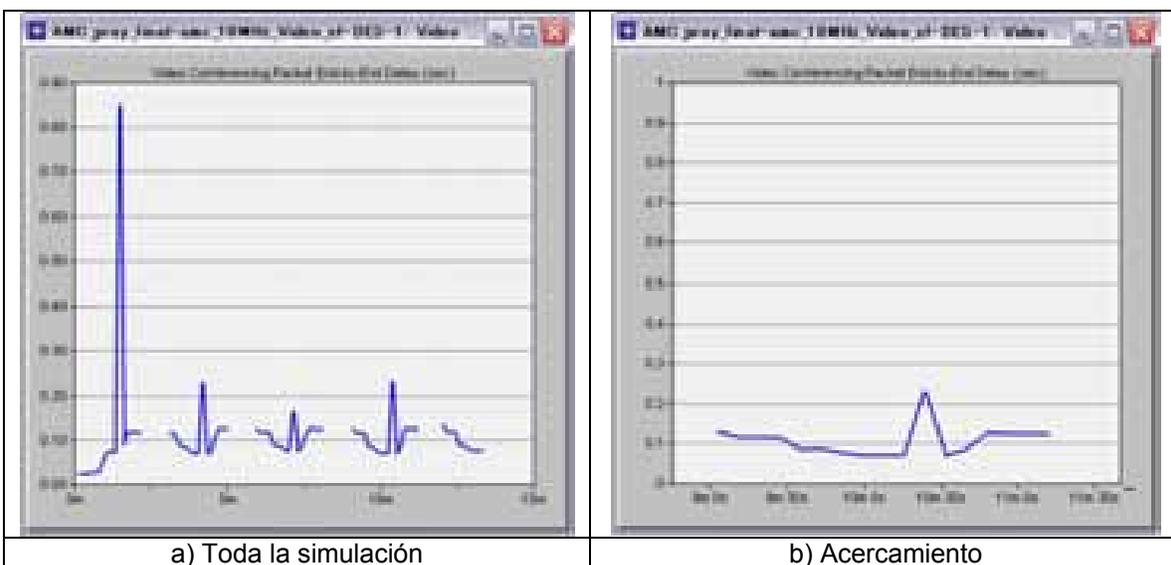


Figura 5.13 Efecto de la AMC en el retardo end-to-end (tráfico de video)

En el inciso b) de la figura 5.13, se tiene un pico donde aumenta significativamente el retardo, justo en el momento donde se pierde la comunicación en el canal UL (gráfica b) de la figura 5.12).

**Escenario 1 con tráfico de voz modelo vehicular sin shadow fading**

En la gráficas de la figura 5.14 se presentan las gráficas para carga y para throughput, en los canales DL y UL de la conexión de la BS con la MS, donde puede apreciarse el mismo comportamiento que muestran las gráficas de la figura 5.6, pero de esta forma puede observarse la proporción de cargas y rendimientos en cada canal (UL y DL).

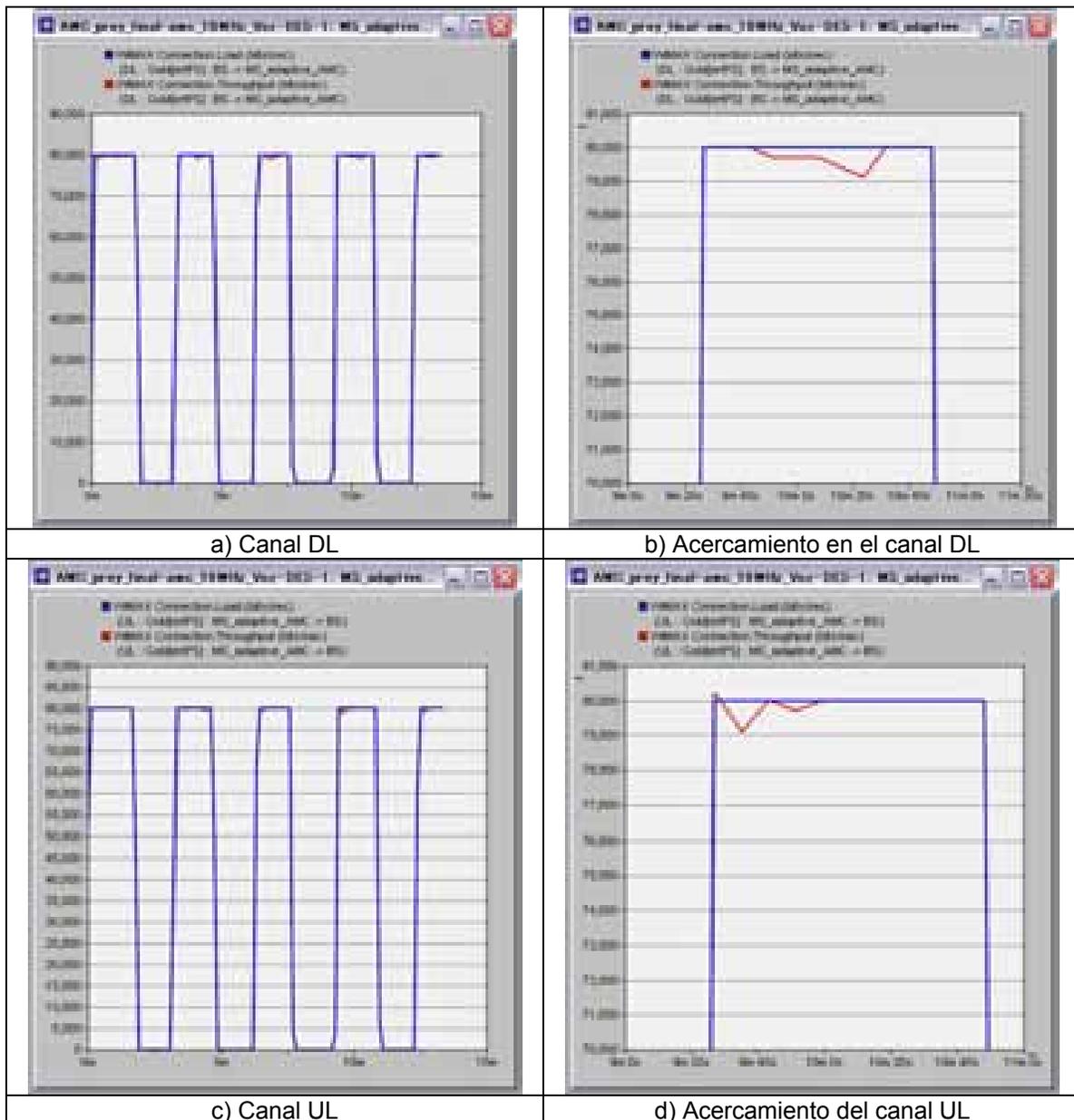


Figura 5.14 Efecto de la AMC en la Carga y Throughput (tráfico de voz)

Las variaciones de la curva del throughput para el tráfico de voz son muy pequeñas, como puede observarse en las gráficas b) y d) de la figura 5.14, con respecto a las curvas del modelo con tráfico de video, ya que la carga es mucho menor y el throughput máximo iguala a la carga.

En la figura 5.14, también se observa que solamente cuando se dieron cambios de modulación y codificación entre extremos, es decir, de manejar pocos bits de información por símbolo a manejar más del triple de bits de información por símbolo.

Debido a que el throughput está comprendido en el rango de los 80 kbps, los cambios en la tasa de transmisión variaron a lo más en 1kbps, efecto que puede observarse claramente en las gráficas b) y d) de la figura 5.14.

La figura 5.15 corresponde a la gráfica del retardo end-to-end, mostrando la curva correspondiente al periodo completo de la simulación, y la curva del acercamiento de unos 2 minutos, que corresponden al periodo de estudio definido para el estudio realizado en esta sección.

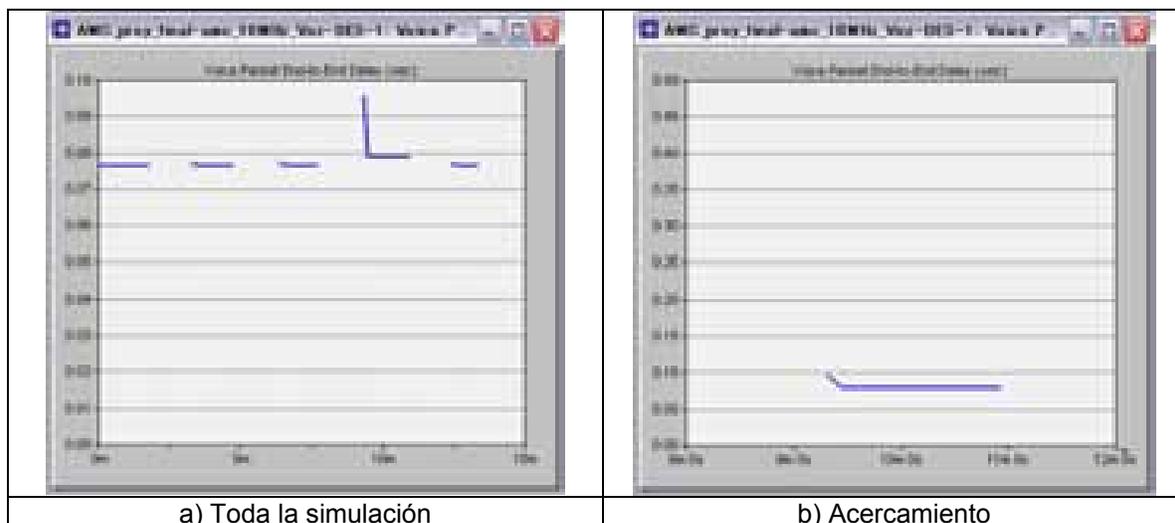


Figura 5.15 Efecto de la AMC en el retardo end-to-end (tráfico de voz)

Se observa claramente, que al igual que sucede con las curvas del throughput, que no tienen mucha variación o no es tan notable como con el tráfico de video, el retardo es casi constante, solamente se tiene un pico inicial, donde comienza en un nivel más alto del que se tiene en el resto de la curva; esto se debe a que en el canal UL, en la gráfica d) de la figura 5.13 se puede comprobar que al inicio de la transmisión de información, existen una serie de picos donde el throughput baja en varias ocasiones para después estabilizarse y quedar con el mismo valor que la carga. Los cambios del canal DL son tan pequeños que no alcanzan a reflejarse en la curva del retardo end-to-end de la figura 5.15.

### 5.2.1.3 Resumen del Escenario 1

En el escenario 1 se configuraron condiciones ideales para transmitir información en las mejores condiciones posibles, es decir, se tiene una configuración sin estaciones móviles

vecinas, sin otras estaciones base que se encuentren en células vecinas, y sin efectos de desvanecimientos (shadow fading). Todas estas condiciones permitieron obtener el máximo rendimiento de la conexión entre la estación base y la estación móvil, y así poder monitorear como debe ser el comportamiento de un modelo de red similar en la vida real.

Se eligió un modelo vehicular, ya que el estándar 802.16e tiene la característica principal del movimiento, y aunque el modelo peatonal era otra de las opciones de movimiento, el vehicular ofrece más dificultad por la velocidad que puede alcanzar.

En los resultados obtenidos, se pudo comprobar que la velocidad y los efectos del shadow fading, pueden afectar los niveles de SNR, que a su vez afectan el rendimiento de la red.

Los resultados obtenidos del Escenario 1 para tráfico de video, mostraron que el throughput para ambos canales fue de aproximadamente 11 Mbps, con 6.5 Mbps en el canal DL. El throughput del canal DL fue mayor que el del UL debido a que el SNR de este canal, no pudo ser suficiente para manejar más de 3 bits de información por símbolo.

Los retardos obtenidos en todas las variantes del escenario 1, oscilaron alrededor del valor de 0.1 segundos, algunos casos más estables que otros.

### 5.2.2 Escenario 2 - Modelo con una estación base y un número variable de estaciones móviles

En la figura 5.16 se muestra la configuración para el escenario 2, donde se tienen hasta 140 estaciones móviles con una sola estación base (en la parte central). A diferencia del escenario 1, se tiene un elemento adicional (encerrado en un círculo) que es el componente para configurar la trayectoria aleatoria de las estaciones móviles.

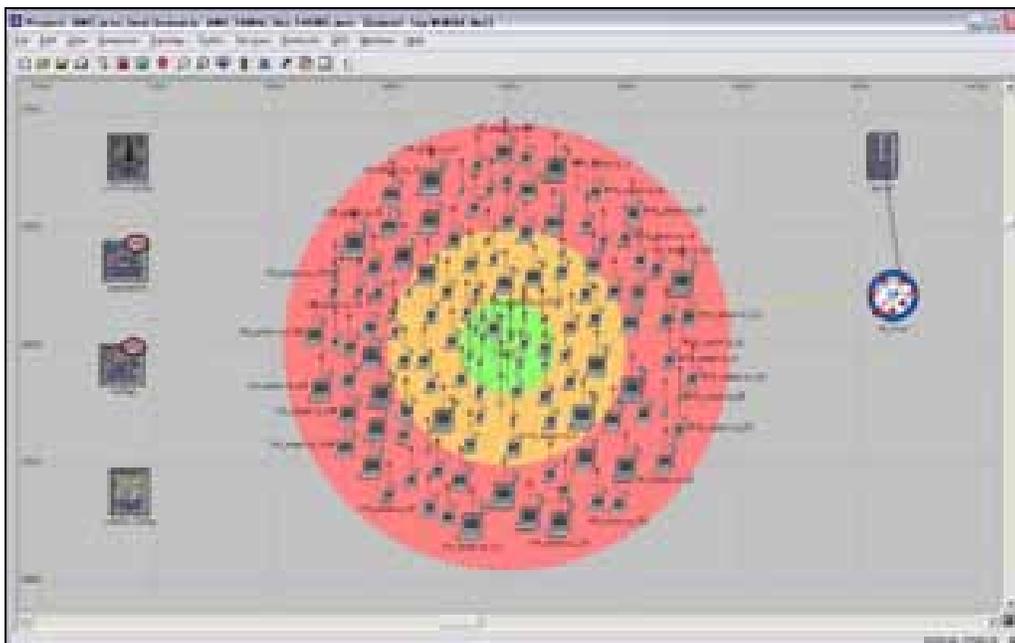


Figura 5.16 Modelo de red - Escenario 2

La configuración de la BS y las estaciones móviles es la misma que se manejó para el escenario 1, excepto en la trayectoria de cada MS, la cual es una trayectoria de tipo Random Waypoint.

El tipo Random Waypoint, como se define en [21], es un modelo de trayectoria muy utilizado en las redes inalámbricas móviles. El cual consiste en que cada nodo de la red elige un punto destino, al que se mueve a una velocidad establecida (ya sea un intervalo o un valor constante); una vez que alcanza este destino, hace una pausa (con un tiempo establecido ya sea constante o aleatorio); y selecciona otro punto destino, y se mueve hacia él a la velocidad establecida. Los puntos destino, se eligen dentro de un área determinada.

El área dentro de la que se mueven los nodos corresponde al círculo más exterior (aproximadamente 1,900 x 1,900 m) de la figura 5.16, con una velocidad de 35 km/hr, con tiempo de inicio entre 0 y 1 segundo, y pausas de 10 segundos.

El escenario 2 se simuló para manejar un tráfico de voz (G729) como el descrito en la sección 5.3, la simulación se ejecutó con varias corridas donde variaba el número de nodos activos. El rango de nodos activos se manejó desde 0 nodo hasta 140 nodos, con incrementos de 10, de esta forma se tuvieron 14 corridas por simulación.

Las gráficas que se muestran en esta sección corresponden a valores escalares capturados en la simulación, en su mayoría de valores promedio del parámetro en cuestión, para graficarse contra el número de nodos activos.

Para el estudio y análisis de resultados del escenario 2, se comparan los resultados obtenidos con una configuración de AMC, contra los resultados obtenidos con modulación/codificación fija. Para obtener resultados de modulación/codificación fija, se configuraron 2 casos, uno para QPSK  $\frac{1}{2}$  y otro para 64QAM  $\frac{3}{4}$  (los extremos de los tipos de modulación/codificación).

Cabe mencionar que para la modulación de 64QAM  $\frac{3}{4}$ , se utilizó un área de 500m x 500m, la cual es el área de cobertura para esta modulación. Esta reducción se realizó para asegurar la transmisión de información durante la simulación, evitando que las estaciones móviles se alejaran demasiado de la BS, y así no perder la comunicación.

### 5.2.2.1 Escenario 2 con tráfico de voz con modelo vehicular sin shadow fading

En las siguientes figuras se muestran las curvas obtenidas del rendimiento del escenario 2, mostrando también retardos o pérdidas de paquetes. Cada figura corresponde a un tipo de modulación y codificación.

Entre los parámetros que se muestran como parte del estudio de este escenario, se tiene la carga y throughput, la capacidad de transmisión del canal UL, los retardos (end-to-end) y pérdidas de datos para cada tipo de modulación de este escenario, y si existieron pérdidas de paquetes transmitidos por las estaciones móviles.

La figura 5.17 corresponde al comportamiento del escenario 2 para la modulación adaptiva y codificación (AMC).

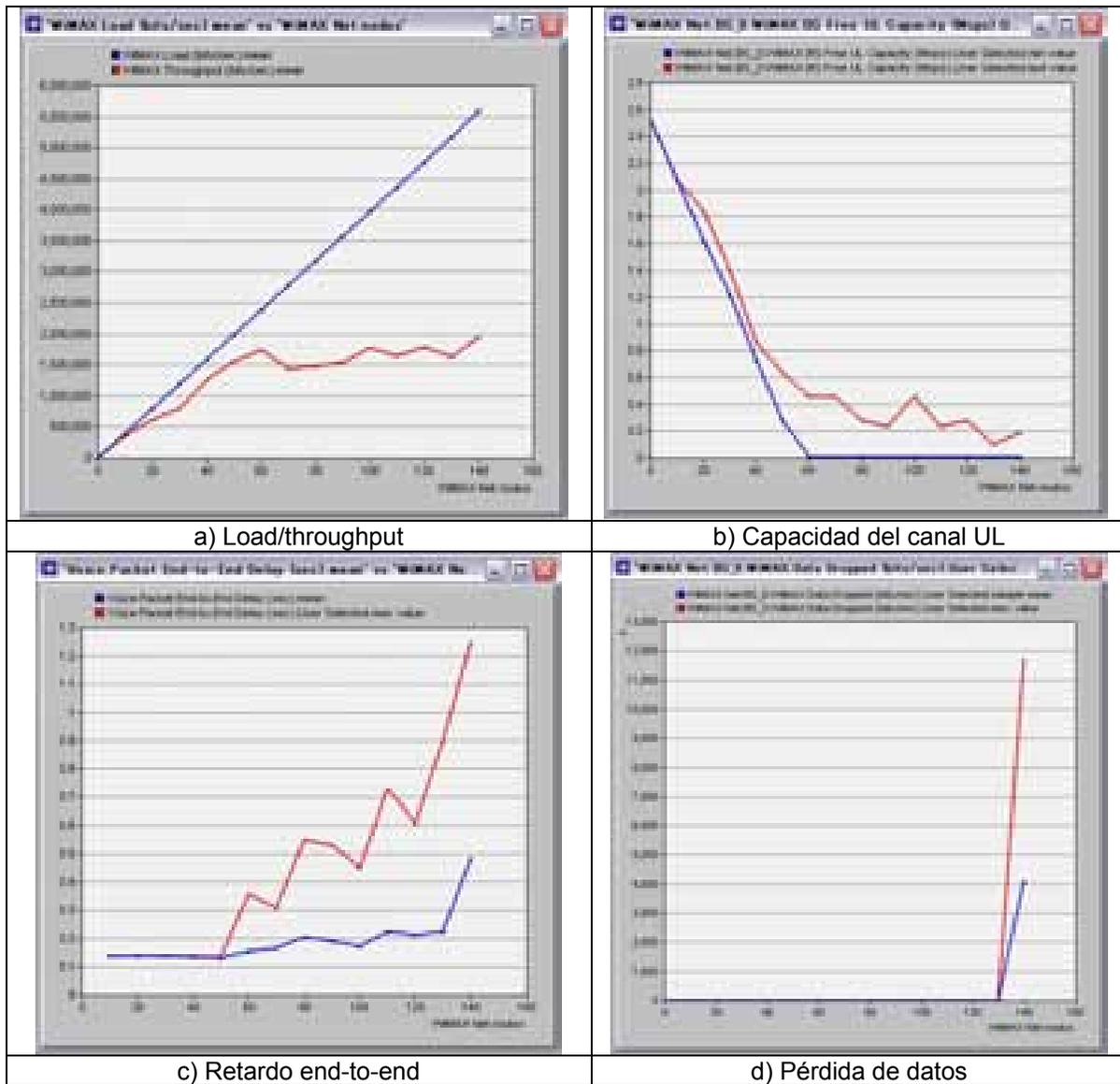


Figura 5.17 Comportamiento del Escenario 2 utilizando AMC (sin shadow fading)

La figura 5.17 muestra diferentes curvas que permiten visualizar el comportamiento de la transmisión de voz, es decir, en la gráfica a) el throughput se mantiene entre 1.5 y 2 Mbps a partir de los 70 nodos aproximadamente. Si observamos la gráfica b) se comprueba que la capacidad del canal UL varía entre 0 y 0.5 Msp/s (mega símbolos por segundo) a partir de los 60 nodos.

En cuanto al retardo, en la gráfica c), también se puede observar que a partir de los 60 nodos comienza a haber incrementos en los picos máximos sin gran impacto, hasta sobrepasar los 120 nodos activos que es cuando se disparará el máximo hasta más de 1 segundo.

Por último, en la curva de pérdida de datos, la gráfica d), no se habían tenidos pérdidas de datos hasta llegar a los 130 nodos, que es cuando el retardo también se elevó considerablemente como se comentó en el párrafo anterior.

La figura 5.18 corresponde al comportamiento del escenario 2 para la codificación y modulación QPSK  $\frac{1}{2}$ .

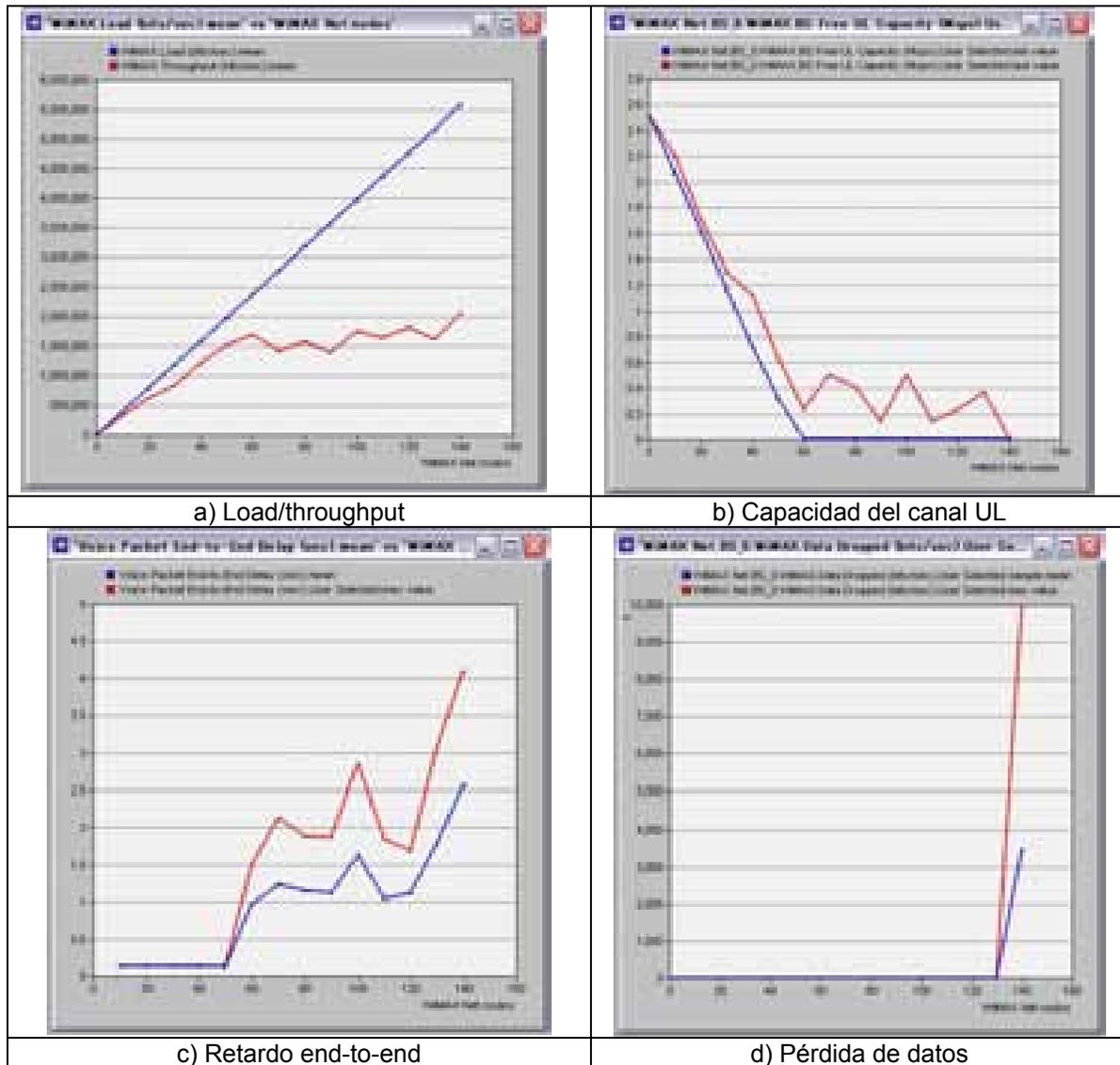


Figura 5.18 Comportamiento del Escenario 2 utilizando QPSK  $\frac{1}{2}$  (sin shadow fading)

En la figura correspondiente a la modulación y codificación QPSK  $\frac{1}{2}$ , se observa en la gráfica a) que a partir de los 50 nodos activos, la curva se mantiene estable alrededor de 1.5 Mbps, y después de los 90 nodos activos se incrementa la tendencia hacia los 2 Mbps; aunque parece una cifra alta para throughput, no se debe olvidar que el retardo cuando hay más de 50 nodos activos, ya no es tolerable.

Si observamos las gráficas b) y c), podemos ver que después de los 50 nodos las curvas de capacidad de UL tiene picos mínimos de 0 Msps, los retardos tienen picos que sobrepasan 1 segundo; en los retardos otro momento importante es a partir de los 100 nodos, donde el retardo tiene otro incremento considerable de hasta 2.5 segundos; y estos efectos se reflejan en el comportamiento de la curva del throughput.

La pérdida de datos alcanza un valor máximo muy alto, ya que el retardo promedio para 130 nodos casi es de 2 segundos, y aún así tiene pérdida de datos por no poder transmitir la voz ni siquiera con retardos altos.

La figura 5.19 corresponde al comportamiento del escenario 2 para la codificación y modulación 64QAM  $\frac{3}{4}$ .

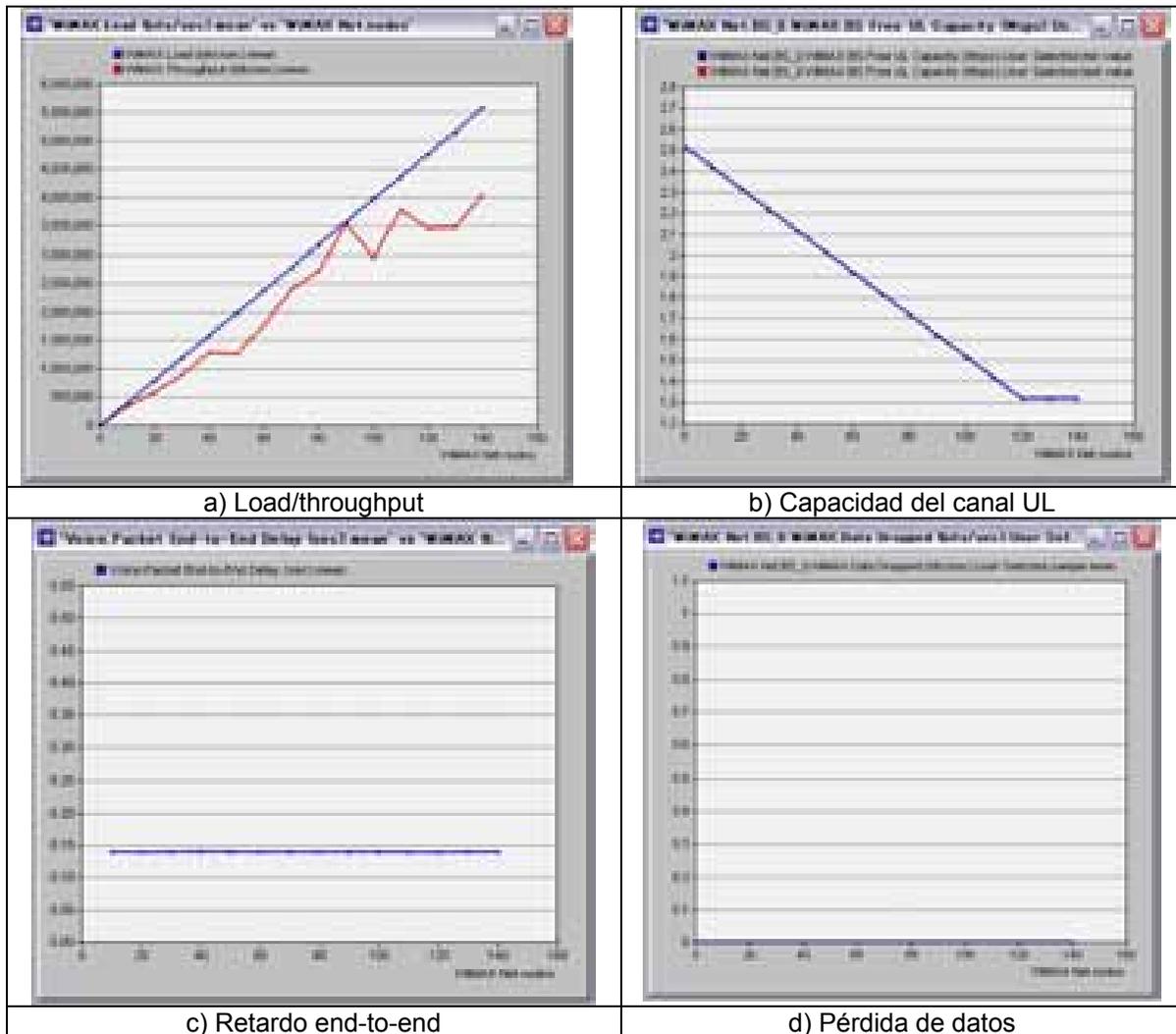


Figura 5.19 Comportamiento del Escenario 2 utilizando 64QAM  $\frac{3}{4}$  (sin shadow fading)

Para esta modulación y codificación, no debe olvidarse que se modificó el escenario de forma tal que, siempre hubo cobertura en la comunicación de las estaciones móviles y la BS. Se hizo una simulación igual a la de los dos casos anteriores (AMC y QPSK  $\frac{1}{2}$ ), con 14 corridas con incrementos de 10 en 10 nodos activos hasta llegar a los 140 nodos.

En la gráfica a) se observa un comportamiento creciente del throughput, no tan parecido a la curva de la carga aunque con tendencia a estabilizarse entre los 3.5 y 4 Mbps; si se observan las demás gráficas de la figura, puede observarse que todavía pueden existir más nodos activos ya que los retardos se mantienen casi constantes, la capacidad del canal tiene alrededor de 1 Msp/s, y aún no existen pérdidas de datos. Pero la simulación se hizo hasta 140 nodos que fue

el límite establecido por los rendimientos de las otras modulaciones y codificaciones, principalmente el de la AMC, que es el caso de estudio.

Las comparaciones de los rendimientos entre los diferentes tipos de modulación, se realiza únicamente con las curvas de la AMC y QPSK  $\frac{1}{2}$ , ya que para 64QAM  $\frac{3}{4}$  se tiene la restricción de que, no puede manejar un área mayor a los 500m<sup>2</sup> sin perder la comunicación con la BS. Y por este motivo, no tiene un comportamiento similar a las otras dos modulaciones, que nunca pierden la comunicación con la BS en toda el área correspondiente a este Escenario 2.

En la figura 5.20 se muestran las diferentes curvas a comparar de los parámetros de throughput y retardo end-to-end (máximos).

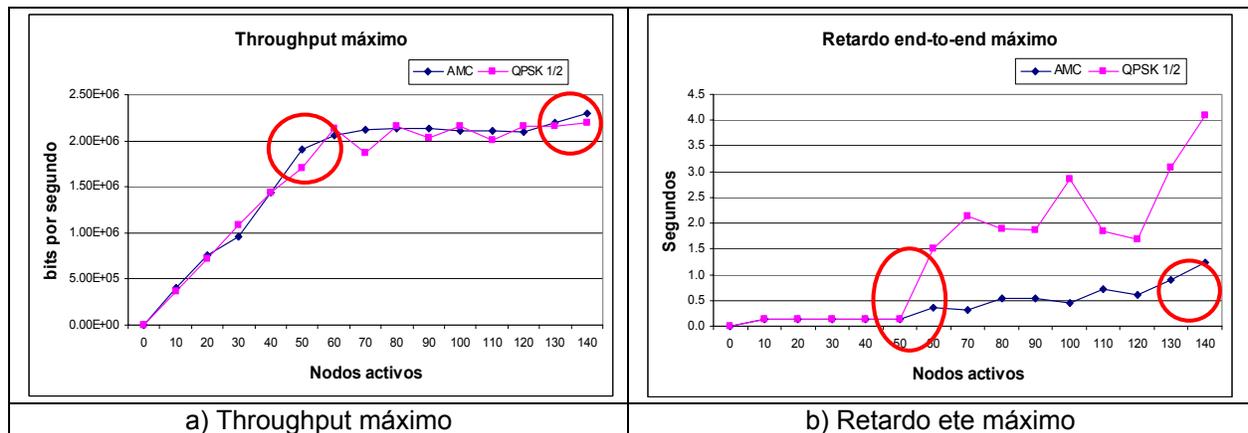


Figura 5.20 Comparación de Throughput y Retardo end-to-end por modulación/codificación (Escenario 2 sin shadow fading)

En la figura 5.20 se observa un comportamiento muy similar para ambas curvas, pero como se mostró en las figuras 5.17 y 5.18, los retardos y pérdidas de datos son factores muy importantes que también forman parte del rendimiento de la red.

En general, el throughput de la AMC obtuvo un mejor comportamiento que el de QPSK  $\frac{1}{2}$ . Con un promedio entre 1.5 y 2 Mbps, con unos picos máximos alrededor de 2 Mbps.

En la gráfica a) de la figura 5.20, se marcaron con círculos los puntos donde el caso de QPSK  $\frac{1}{2}$  tuvo problemas con grandes retardos; y de esta forma, sabemos que la tasa de throughput de la curva no es útil por esta razón; mientras que la AMC mantuvo retardos promedio tolerables por debajo de los 0.5 segundos.

En la gráfica b) de la figura 5.20 se muestran las diferentes curvas a comparar del retardo end-to-end (máximo) para ambas modulaciones y codificaciones.

En la gráfica b) de la figura 5.20 se puede observar el comportamiento casi constante de la curva de la AMC con respecto a la de QPSK  $\frac{1}{2}$ , incluso en los picos máximos se mantiene muy estable hasta la parte final de la simulación que es el momento en que llega a rebasar 1 segundo.

### 5.2.2.2 Escenario 2 con tráfico de voz con modelo vehicular con shadow fading

En esta variante del escenario 2, se hará un análisis similar al anterior caso de estudio (sin shadow fading), donde se analizarán los valores de parámetros tales como carga, throughput y retardos; los cuales permiten comparar el rendimiento del modelo de red para diferentes modulaciones y codificaciones.

En esta versión del escenario 2, ya que existe shadow fading, los SNR cambiaron con respecto a la versión sin shadow fading; y por esta razón, los rendimientos generales se afectan con respecto al escenario sin shadow fading.

En la figura 5.21 se muestra el comportamiento de la red para la AMC.

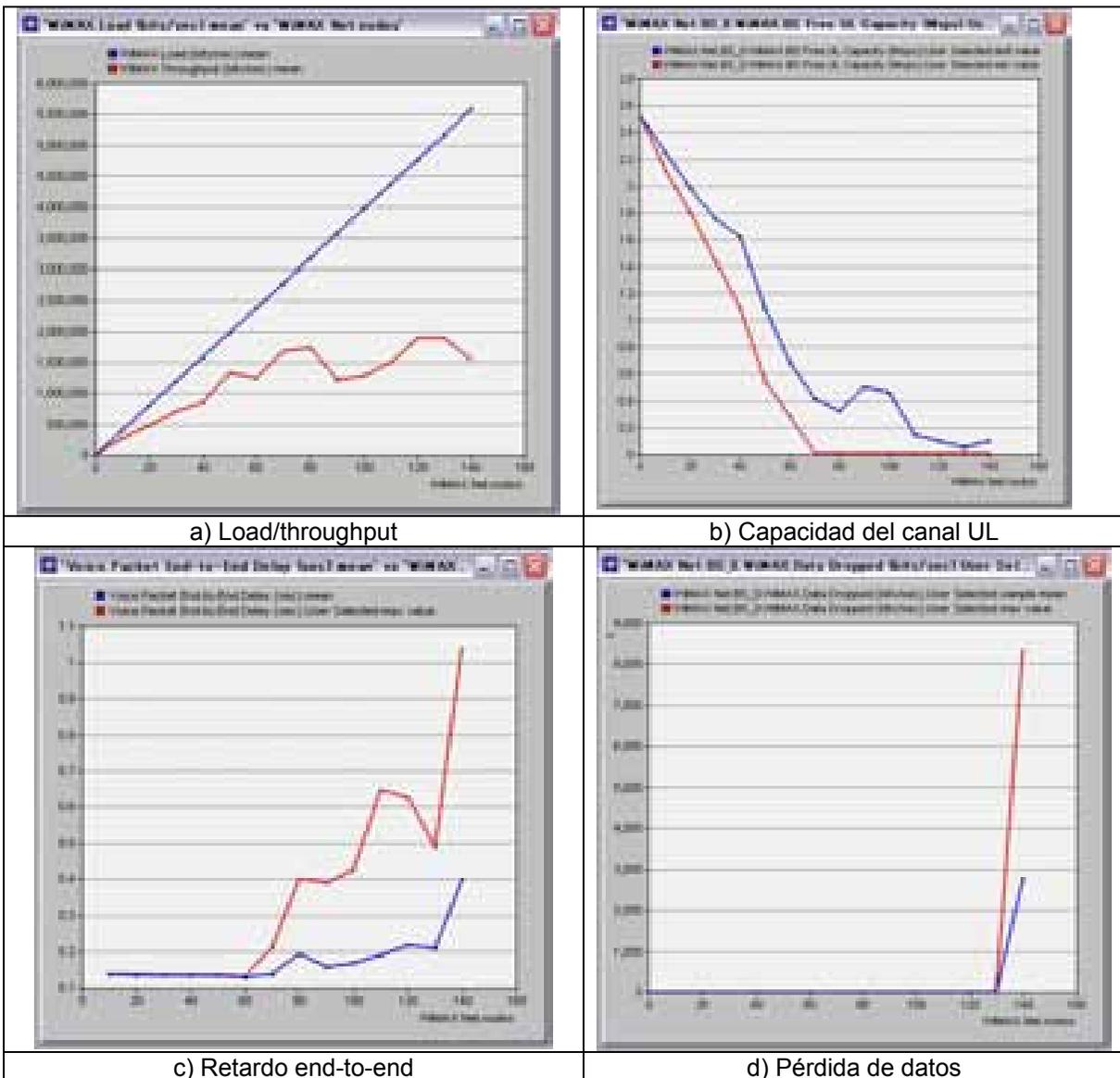


Figura 5.21 Comportamiento del Escenario 2 utilizando AMC (con shadow fading)

Si se observan las gráficas de la figura 5.17 y las de la figura 5.21, se puede ver que los resultados son muy similares, incluso habrá momentos en que algunos puntos tengan mejores resultados en la versión con shadow fading, pero son mínimos; en general, los resultados son los mismos, ya que la AMC se ajusta a la situación actual de la comunicación de la MS y la BS, y asigna la modulación y codificación más adecuada para el momento.

La figura 5.22 muestra el comportamiento para QPSK 1/2, mostrando los mismos parámetros que la figura 5.18 para su comparación.

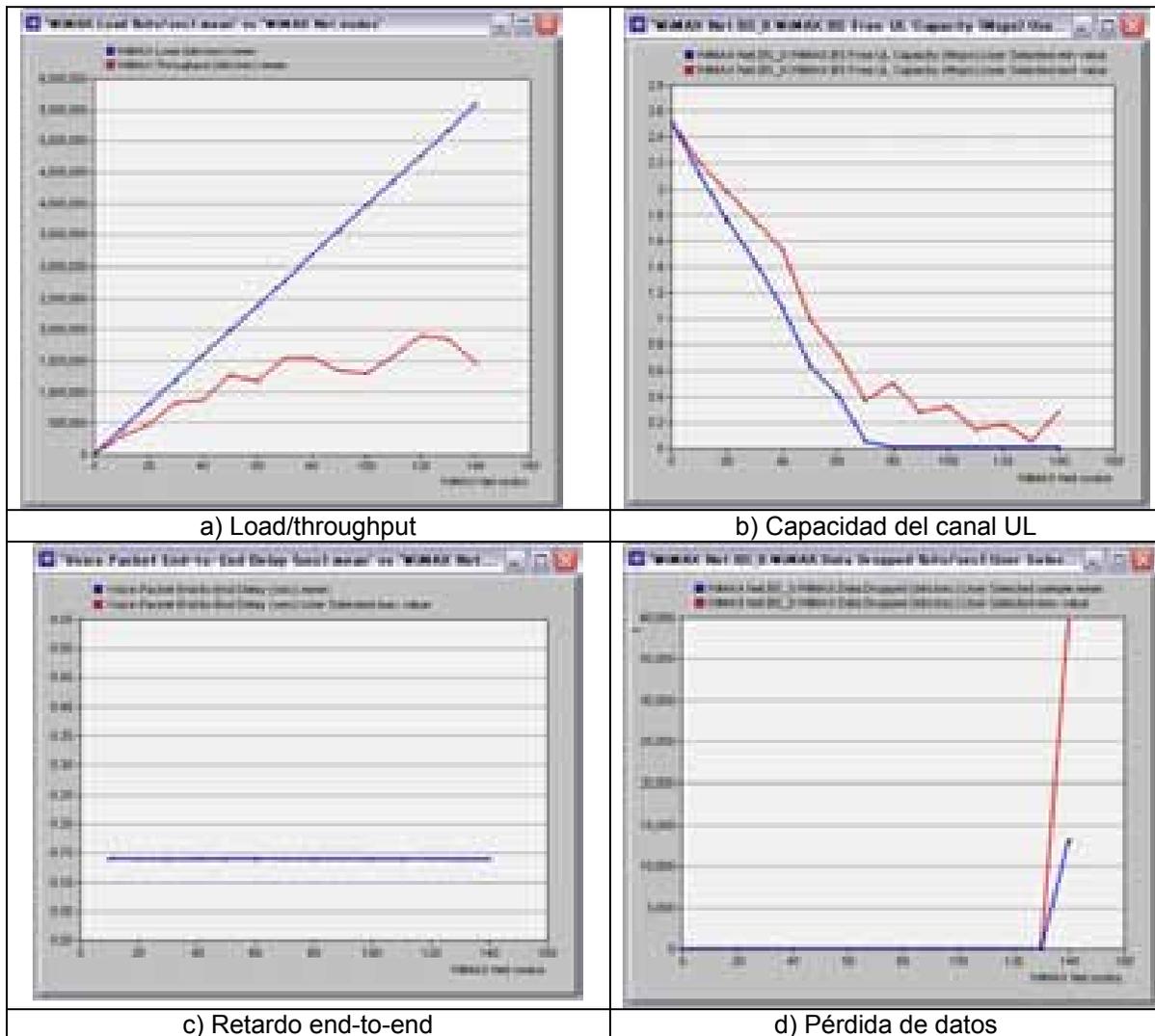


Figura 5.22 Comportamiento del Escenario 2 utilizando QPSK 1/2 (con shadow fading)

En este caso de comparación, el throughput fue menor que la versión sin shadow fading, y la capacidad del canal UL en este caso, disminuyó más rápido y manejó valores más pequeños que en la figura 5.18. La pérdida de datos si se incremento en su valor promedio final.

En cuanto a retardos en este caso, fueron menores ya que hasta los 60 nodos comenzaron los incrementos de retardos; pero los promedios generales indicaron una tendencia a tener retardos de más de 2 segundos al final de la simulación.

A continuación, la figura 5.23 muestra el comportamiento para 64QAM  $\frac{3}{4}$ .

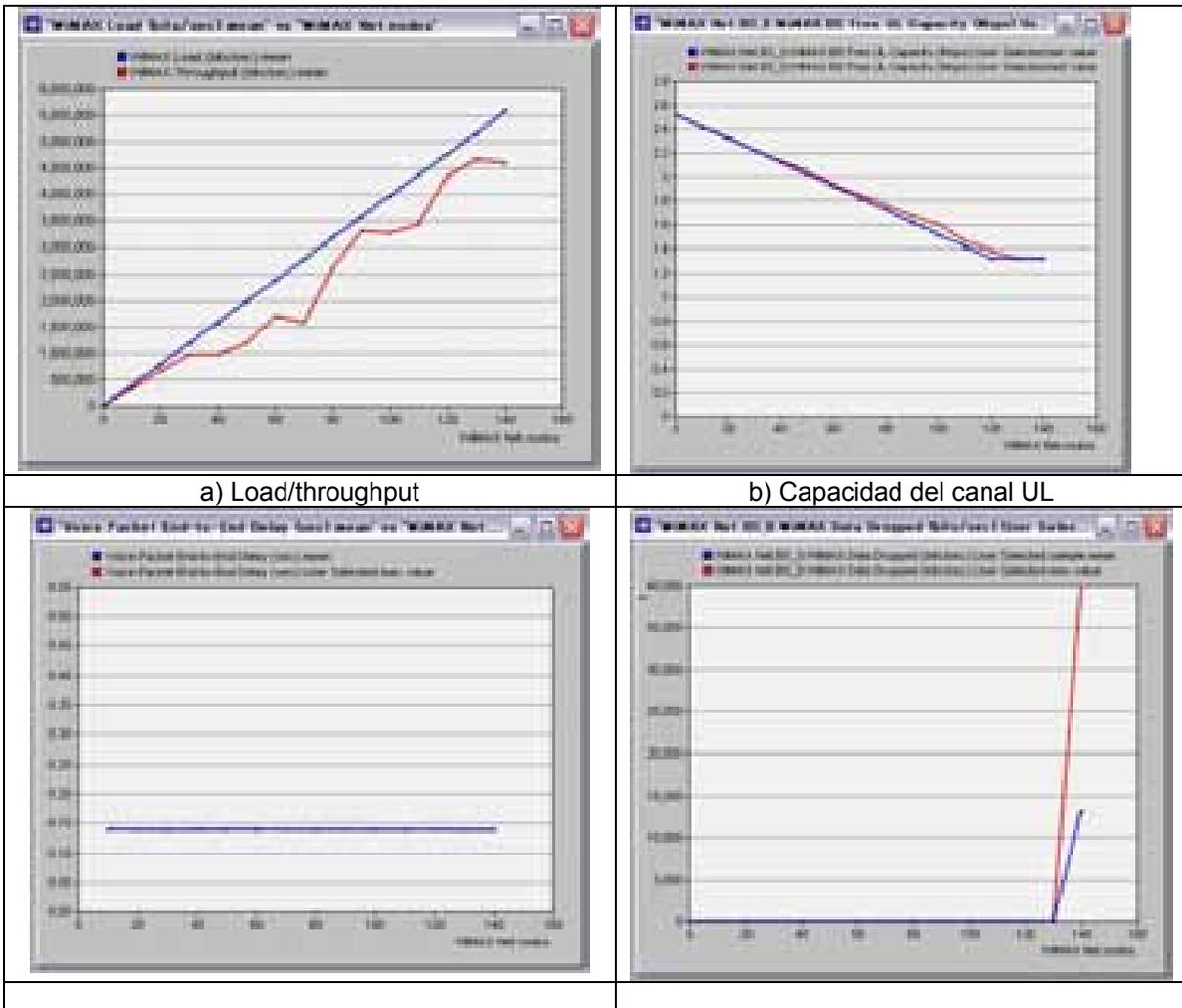


Figura 5.23 Comportamiento del Escenario 2 utilizando 64 QAM  $\frac{3}{4}$  (con shadow fading)

En esta figura 5.23, se observan que las curvas de load y throughput son muy diferentes con respecto a la figura 5.19, ya que en este caso, la curva del throughput está muy alejada de la curva de load y aunque al final alcanza un throughput mayor al de la figura 5.19, existen otros factores que se afectaron en este caso.

En cuanto a retardos y capacidad del canal UL, se obtuvieron curvas muy similares a la figura 5.19, no se afectaron estos parámetros por el shadow fading.

Un parámetro que si se afectó fue el de pérdida de datos, ya que de no existir pérdida de datos en el caso sin shadow fading, ahora hubo hasta de 9 kbps (pico máximo).

El que exista shadow fading, además del movimiento de las estaciones móviles, es un factor que puede comprometer el comportamiento y rendimiento de ciertos escenarios, en algunos casos de manera más notable que en otros, pero finalmente si se afectan.

La figura 5.24 muestra la comparación de curvas de throughput y retardo end-to-end de AMC y QPSK 1/2.

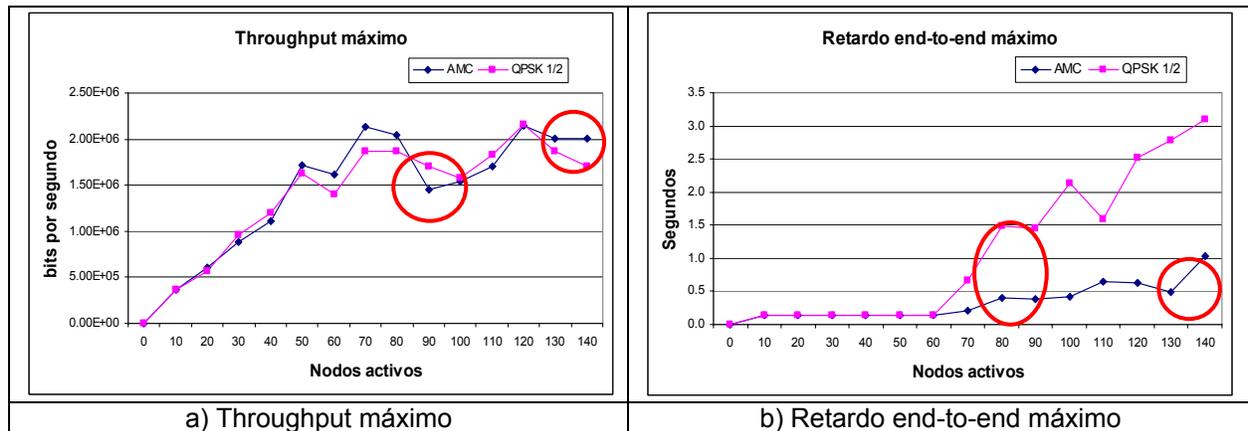


Figura 5.24 Comparación de Throughput y Retardo end-to-end por modulación/codificación (Escenario 2 con shadow fading)

En la gráfica a) de la figura 5.24 sigue teniendo mejor desempeño la AMC con respecto a QPSK 1/2, como sucedió en el caso sin shadow fading. Cabe mencionar que en este caso las curvas de AMC para las gráficas a) y b), muestran una diferencia más notable, con respecto a QPSK 1/2, que lo observado en la figura 5.20.

Se señalan con círculos los puntos críticos de las curvas, al igual que en el caso sin shadow fading.

La gráfica b) de la figura 5.24 muestra retardos un poco diferentes a los observados en la figura 5.20, sin embargo, el comportamiento de la curva de AMC vuelve a ser mucho mejor que el de QPSK 1/2, teniendo curvas casi constantes.

### 5.2.2.3 Resumen del Escenario 2

El escenario 2 pretende mostrar un modelo de red lo más cercano a la realidad posible, por eso se analiza el rendimiento de la red con un número variable de usuarios móviles activos, poniendo como máximo 140 nodos.

Se realizaron comparaciones entre los resultados obtenidos con AMC y con modulación/codificación fijas; para que de esta forma se puedan evaluar los beneficios que brinda el uso de la AMC conforme aumenta el número de nodos activos, principalmente.

Se eligieron como modulaciones y codificaciones fijas, los dos extremos de modalidades que existen, QPSK 1/2 y 64QAM 3/4, con la finalidad de analizar el peor y el mejor de los casos de modelos de red sin movilidad.

El estudio del escenario 2 se llevó a cabo para dos variantes del mismo, uno sin shadow fading y otro con shadow fading, y el resultado en ambos casos favoreció a la AMC.

El caso de la modulación y codificación 64QAM  $\frac{3}{4}$  mostró un rendimiento muy bueno, y mejor que la AMC, pero siempre y cuando los nodos activos no se salgan del área de 500m<sup>2</sup>, porque de hacerlo se pierde la comunicación y su rendimiento desmejorará notablemente.

Se pudo comprobar que el uso de la AMC fue una opción acertada, la cual no disminuyó o afectó negativamente el rendimiento de la red; sino que, en general, superó los resultados de las otras modulaciones y codificaciones fijas.

Cabe resaltar un punto importante en cuanto al escenario con shadow fading, se hizo evidente que al cambiar las mediciones de los SNR, sobre todo para el canal UL, el rendimiento de la red se vio afectado notablemente para las modulaciones y codificaciones fijas, siendo la de QPSK  $\frac{1}{2}$  la más afectada.

El comportamiento de la red con AMC fue muy similar al obtenido en el escenario sin shadow fading; dando muestra que su comportamiento dinámico se adapta favorablemente a las condiciones que va presentando la red.

### 5.2.3 Planeación y operación de redes inalámbricas móviles WiMAX

De acuerdo al análisis realizado durante todo este capítulo, surgen una serie de sugerencias y comentarios que pueden ayudar en la planeación y operación de redes inalámbricas móviles WiMAX.

Debido a que en condiciones reales, no puede existir una red sin el efecto de desvanecimientos e interferencias, se hablará de los resultados obtenidos para los escenarios de redes con número variable de usuarios y con shadow fading (modelo vehicular).

La célula comprende un área aproximada de 1,900 m<sup>2</sup>, con una sola estación base en la parte central, y las estaciones móviles se mueven dentro de esa área a una velocidad de 35 km/hr.

- El área puede crecer un poco más, aunque debe tenerse cuidado con los niveles del SNR del canal UL, los cuales ya están por debajo de los 10 dB en su extremo mínimo.
- La configuración WiMAX de la red y sus componentes (BS y MS) están de acuerdo a regulaciones para México, y se utiliza la banda de los 3.5 GHz con canales de 10 MHz (la tendencia actual de productos WiMAX para México y EU).
- La potencia y ganancia de la antena de transmisión se configuró en niveles por debajo de los que pueden manejar los productos actuales, pero se hizo para mantenerse dentro de regulaciones de la Cofetel. Si pueden cambiarse en un futuro, al aumentar la potencia y ganancia de transmisión, la cobertura alcanzará mayores distancias y mejorarán también los niveles de SNR para ambos canales, mejorando los rendimientos de las conexiones de esa red.
- En cuanto al número de usuarios que pueden conectarse a la BS, sin afectar el rendimiento de la misma, la modulación y codificación configuradas son factor

importante para determinarlo. Si se utiliza la AMC se pueden tener máximo 130 usuarios activos sin afectar de manera importante los throughputs ni incrementar retardos. Ahora que si se quiere utilizar alguna de las modulaciones y codificaciones fijas, se pudo comprobar que QPSK  $\frac{1}{2}$  no es buena opción al superar los 60 nodos, ya que sus retardos comienzan a aumentar significativamente. El uso de 64QAM  $\frac{3}{4}$  puede ser buena opción en áreas pequeñas de cobertura, es decir, las MSs no deben alejarse más allá de 250m para asegurar la transmisión sin pérdidas de comunicación con la BS.

### 5.3 Detalles técnicos para implementar mejoras

En modelos de redes reales, los conceptos de control de potencia, AMC y clases de servicio, se encuentran estrechamente relacionados, y difícilmente pueden existir unos sin los otros.

La implementación del algoritmo para utilizar AMC sí está implementada en el modelo de WiMAX de OPNET 14.5, y se encuentra dentro del archivo (del tipo external source C) llamado "wimax\_amc\_support.ex.c", contiene todas las funciones que son utilizadas a lo largo de una simulación que tiene configurada la AMC en alguna o todas las estaciones suscriptoras del modelo correspondiente.

Dentro del archivo de AMC, se encuentra una función muy importante para llevar a cabo la AMC y se llama "wimax\_amc\_modulation\_coding\_adapt", la cual se encarga de la toma de decisión del cambio de perfil de ráfaga, haciendo uso de la tabla de umbrales de decisión (véase tabla 4.4), y los valores de las nuevas mediciones de CINR.

En el archivo "wimax\_amc\_support.ex.c" es donde se concentra todo lo que se relaciona con el manejo de la AMC, tanto valores de inicialización, como de obtención de parámetros necesarios para manejar dinámicamente los cambios de modulación y codificación que se requieran durante la simulación.

Tanto en el modelo de procesos de la SS (wimax\_ss\_control.pr.m) como en el de la BS (wimax\_bs\_control.pr.m), dentro del bloque de funciones, podemos encontrar varias funciones que manejan parámetros de AMC, directamente relacionados con el archivo "wimax\_amc\_support.ex.c".

Es importante notar que dentro del modelo de procesos de la BS, se tiene la función "wimax\_bs\_control\_amc\_threshold\_process", porque es una parte importante en el cambio de modulación y codificación, como consecuencia de las mediciones actuales.

Otros archivos externos que se involucran directamente con la ejecución de la AMC son, "wimax\_support.ex.c" y "wimax\_phy\_mpath\_support.ex.c", este último cuenta con valores de configuración y obtención del EESM.

# Capítulo 6

## Conclusiones generales

### 6.1 Conclusiones finales

El objetivo que se planteó para esta tesis involucra el análisis detallado del desempeño de redes inalámbricas del estándar IEEE 802.16e, mediante la comparación de resultados teóricos (calculados con los modelos teóricos) y resultados prácticos (obtenidos mediante simulaciones en OPNET 14.5); involucrando conceptos de AMC.

La AMC demostró ser una buena opción, obteniendo mejores resultados que con modulación/codificación fija, los indicadores utilizados mostraron que de manera general superó a las otras dos.

Se mostró que utilizar AMC puede garantizar obtener el mejor rendimiento posible, sin desperdiciar los recursos de la red; puede ayudar a administrar la asignación de servicios de transmisión de información, de manera más equitativa evitando en lo posible, desperdiciar ancho de banda sin usar.

Un aspecto muy importante es, que la AMC ayuda con el aprovechamiento de los recursos de acuerdo a las condiciones actuales de la conexión, ofreciendo una opción dinámica de configuración. Esta configuración dinámica permite aprovechar los momentos que son ideales para cada tipo de modulación/codificación, y así disminuir los retardos (si debe usarse una eficiencia espectral menor) o aumentar el throughput (aplicando una eficiencia espectral mayor).

### 6.2 Contribuciones

A partir de la información mostrada a lo largo de esta tesis, y tomando en cuenta los resultados obtenidos en el capítulo 5, puede surgir un proyecto de investigación donde se asegure el completo y correcto funcionamiento de AMC dentro del modelo WiMAX de OPNET, y a su vez,

se agregue la parte de control de potencia que complementa a la AMC; y de esta forma el desempeño de las redes inalámbricas se mejorará notablemente.

Esta investigación sugerida como continuación de este proyecto de análisis, puede comprender el diseño e implementación<sup>5</sup> de:

- Mejorar el control para manejar los umbrales de decisión de la AMC, ya que actualmente se cuenta con la medición de SNR y SNR efectiva, pero solamente utiliza SNR como parámetro de comparación; con esto podría obtenerse un manejo de AMC más conveniente
- Incluir y/o mejorar algoritmos de control durante la asignación de la clase de servicio, dentro de las funciones de evaluación de los cambios de AMC puede integrarse esta parte y así tener un máximo rendimiento en la transmisión de información
- Incluir algoritmo para controlar la potencia de transmisión de la MS, partiendo de que se cuenta con el monitoreo (por retroalimentación) de diversos parámetros utilizados para medir la SNR, puede implementarse un control de potencia que permita modificar esas mediciones para mejorar la SNR actual, y así evitar aplicar un cambio en la modulación/codificación y clase de servicio que pudiera disminuir el desempeño actual de la conexión en cuestión
- Se puede vincular esta investigación con técnicas de hand off, para mejorar el rendimiento de las conexiones, durante la entrada y salida de una célula, de los usuarios móviles

En modelos reales, los operadores de las redes requieren de herramientas que les permitan predecir el desempeño y los posibles problemas que pueden presentarse en algún momento, de acuerdo a la configuración de modelo de red que tengan y la cantidad de usuarios activos que quieran manejar. En la sección 5.3.3 se incluyen comentarios y sugerencias que pueden ayudar en la toma de decisiones, en lo que se refiere a planeación y operación de redes inalámbricas móviles WiMAX.

Cabe mencionar que este tipo de estudio, así como los resultados obtenidos, tiene gran importancia en actividades de la vida cotidiana. Además de que puede contribuir con un análisis que sirva como base para otros proyectos de investigación, que puedan mejorar los resultados obtenidos. Asimismo, también los resultados de investigaciones como la que se presenta en esta tesis pueden servir como guía para los proveedores y operadores de servicios de telecomunicaciones, para que éstos puedan diseñar modelos que funcionen de acuerdo a lo planeado y así puedan ofrecer servicios confiables.

---

<sup>5</sup> La sección 5.4 indica la ubicación y nombres de rutinas relacionadas con AMC.

# Glosario

Backhaul	Conexión que permite conectar redes de computadoras y redes de telecomunicaciones; permite interconectar redes ya sea de forma alámbrica o inalámbrica
Benchmark	Aplicación que sirve para evaluar rendimientos de sistemas, dispositivos, etc.
Broadcast	Transmisión de una fuente a todos los posibles receptores de una red
Buffer	Memoria de almacenamiento temporal
BWA	Acceso inalámbrico de banda ancha
C/N	Razón portadora a ruido
CCITT – UIT	Actualmente denominado Unión Internacional de Telecomunicaciones
CDMA	Acceso Múltiple por División de Código
Checksum	Método para detectar errores, involucra el incluir un número en los mensajes transmitidos que se calcula de acuerdo al grupo de bits contenidos en el mensaje
CID	Identificador de conexión. Consta de 16 bits, y es el mismo para el par de la conexión UL y DL
CINR	Interferencia y Razón de Ruido en la portadora
Códec	Decodificador, transforma datos y señales para transmitir/recibir
Códecs	Archivos residentes en el ordenador que permiten a uno o varios programas descifrar o interpretar el contenido de un determinado tipo de archivo multimedia
CP	Prefijo cíclico
CQICH	Canal de información de la calidad del canal
Datagrama	Estructura de un paquete de datos, o un paquete de datos transmitidos en una conexión
Debugger	Depurador, Aplicación o herramienta de software que permite ejecutar de manera controlada un programa o alguna parte de él, para dar seguimiento a cada instrucción ejecutada; y así poder localizar errores o algún valor de parámetro en especial, principalmente.

Distribución Gaussiana	Distribución de probabilidad, función matemática
Distribución log-normal	Distribución de probabilidad, donde una variable aleatoria tiene un logaritmo que cuenta con distribución normal
DL	Canal de bajada
DMT	Modulación por multitono discreto (otro nombre de OFDM)
Doppler	Efecto que hace variar la longitud de onda de cualquier tipo de onda, transmitida o recibida por un objeto en movimiento
Eb/No	Razón señal a ruido pero basándose en la energía del bit, también véase SNR
EESM	Mapeo exponencial de SNR efectiva. Método para calcular la SNR efectiva
ETSI HiperMAN	Versión europea de WiMAX
Fading	Desvanecimiento
FFT	Transformada rápida de Fourier
Frame	Trama, segmento.
GMH	Encabezado MAC genérico
Gray, código	Forma de ordenar números binarios, donde un número tiene una diferencia de 1 dígito binario con respecto a su predecesor
Grx	Ganancia de la antena receptora
GSM	Sistema global para comunicaciones móviles (telefonía celular)
Gtx	Ganancia de la antena transmisora
Host	Nodo/equipo anfitrión (servidor) que proporciona servicios a otros nodos/equipos
ITU-T	Union Internacional de Telecomunicaciones, sector de estandarización
Kernel	Parte esencial de un sistema operativo. Gestiona recursos, tales como accesos de información
Multicast	Transmisión de datos desde un origen a varios receptores simultáneamente
NS2	Simulador de redes ver. 2
OFDM	Multiplexación por División de Frecuencias Ortogonales
OFDMA	Acceso Múltiple por División Ortogonal de Frecuencia
OPNET Modeler	Herramienta de software para modelar y simular redes de comunicaciones (OPNET Technologies, Inc)

Payload	Carga útil
PHY	Capa física
PMP	Topología de Punto – MultiPunto
Prx	Potencia de recepción
Ptx	Potencia de transmisión
QCIF	Quarter Common Intermediate Format
QoS	Calidad de servicio
RSSI	Nivel de intensidad de la señal recibida
RTG	Brecha de transición que va de modo de recibir a modo de transmitir
Slot	Ranura (intervalo de tiempo)
Streaming	Transmitir audio o video a través de una red en tiempo real, sin necesidad de descargar el archivo completo
Streams	Flujos de datos
T1	Enlace que cuenta con una tasa de transmisión de 1,544 Mbps
Throughput	Tasa de rendimiento de la transmisión de datos expresado en unidades de bits por segundo. (Volumen de información que fluye)
TLV	Mensaje Tipo/Longitud/Valor
TTG	Brecha de transición que va de modo de transmitir a modo de recibir
UL	Canal de subida
VoIP	Transmisión de voz por Internet
WiMAX	Interoperabilidad Mundial para Acceso por Microondas
WMAN	Redes de área metropolitana inalámbricas

# Abreviaturas

AAS	Adaptive Antenna Systems
AMC	Adaptive Modulation and Coding
AMR	Adaptive Multi-Rate
ARQ	Automatic Repeat Request
ASK	Amplitude Shift Keying
AWGN	Additive White Gaussian Noise
BE	Best Effort
BPSK	Binary Phase Shift Keying
BS	Base Station
BWA	Broadband Wireless Access
C/N	Carrier to Noise
CCITT – UIT	Actualmente denominado Unión Internacional de Telecomunicaciones
CDMA	Code Division Multiple Access
CID	Connection Identifier
CIF	Common Intermediate Format
CINR	Carrier to Interference plus Noise Ratio
Cofetel	Comisión Federal de Telecomunicaciones
CP	Cyclic Prefix
CPS MAC	Common Part Sublayer of MAC
CQICH	Channel Quality Information Channel
CS	Convergence Sublayer
DAMA	Demand Assigned Multiple Access

dB	Decibeles
DCD	DownLink Channel Descriptor
DL	Down Link
DMT	Discrete Multitone Modulation
DS-CDMA	Direct Sequence Code Division Multiple Access
DSL	Digital Subscriber Line
EESM	Exponential Effective SNR Mapping
ertPS	Extended Real-time Polling Service
ETSI HiperMAN	European Telecommunications Standards Institute
FCH	Frame Control Header
FDMA	Frequency Division Multiple Access
FEC	Forward Error Correction
FFT	Fast Fourier Transform
FSK	Frequency Shift Keying
GMH	Generic MAC Header
GSM	Global System for Mobile communications
HARQ	Hybrid Automatic Repeat Request
ICI	Inter-Carrier Interference
IE	Information Element
IEEE	Institute of Electrical and Electronic Engineers
IP	Internet Protocol
ISI	Inter Symbol Interference
ITU-T	International Telecommunication Union, standardization sector
LOS	Line Of Sight
MAC	Media Access Control
MAN	Metropolitan Area Network
Mbps	Mega bits por segundo
MCS	Modulation and Coding Schemes
MIMO	Multiple Input Multiple Output
MS	Mobile Station
Msp/s	Mega símbolos por segundo
NLOS	Non Line Of Sight – Sin línea de vista.

nrtPS	Non-real-time Polling Service
NS2	Network Simulator
NTSC	National Television System Committee
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
OPNET	Optimized Network Engineering Tools
PAL	Phase Alternating Line
PCM	Pulse Code Modulation
PDU	Protocol Data Units
PIRE	Effective Isotropic Radiated Power (EIRP)
PL	Path Loss
PMP	Point-Multi-Point
PSK	Phase Shift Keying
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
QoS	Quality of Service
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying
RF	Radio Frequency
RSSI	Receive Signal Strength Indication
RTD	Round Trip Delay
RTG	Receive/transmit Transition Gap
rtPS	Real-time Polling Service
SAP	Service Access Point
SDU	Service Data Unit
SIR	Signal-to-interference ratio
SN	Sequence Number
SNR	Signal to Noise Ratio
SOFDMA	Scalable OFDMA
SQCIF	Sub Quarter CIF, véase CIF
SS	Suscriptor Station
TCP	Transmission Control Protocol
TDMA	Time Division Multiple access
TLV	Type/Lenght/Value
TTG	Transmit/receive Transition Gap
UCD	Uplink Channel Descriptor

UDP	User Data Protocol
UGS	Unsolicited Grant Service
UIUC	Uplink Interval Usage Code
UL	Up Link
VoIP	Voice over Internet Protocol
WiMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access
WMAN	Wireless Metropolitan Area Network

# Apéndice A

## Código agregado

El código que se presenta, fue incluido para agregar la funcionalidad de poder indicar el número de nodos activos en una simulación, dando la oportunidad a manejar un solo valor o múltiples valores con incrementos.

El código que se agregó al bloque de funciones del modelo de procesos wimax\_ss\_control es el siguiente:

```
/* Discover all the revelant BS information to switch to. */  
  
if (OPC_COMPCODE_FAILURE == wimax_ss_control_bs_info_initialize (initial_bs_mac_address)  
    //{  
    /*******mmsg july 2008  
    // it must be stoped the asociation/registration of the current node if the number of it,  
    // it's greater than the global variable nodos (total of nodes to be active for the simulation)  
  
    || !activar_nodo(numero_nodo_actual(), numero_nodos_activos())  
  
    )  
  
    ///*****mmsg july 2008  
  
    {  
  
    /* There is not even one BS this SS could associate with. */  
    /* An log has been produced, warning the user - force      */  
    /* this child process to commit suicide.                    */  
    op_pro_destroy (op_pro_self ());  
    }  
}
```

Se incluyó en la parte donde se registra la MS a la BS, si no cumple con las funciones programadas, no se le permite el registro a la BS.

El código que se agregó en el nodo init (Enter Executives) del modelo de procesos wimax\_ss\_control es:

Cada función incluye en los comentarios, la descripción en inglés de lo que realiza cada una de ellas.

```
//*****mmg july 2008
```

```
static int
numero_nodos_activos()
{
    // This function is used to obtain the number
    // of active nodes, selected in the
    // simulation sequence

    Objjid          objeto;
    int              nodos_activos = 1;

    FIN (numero_nodos_activos());

    // it is read from the value of the global variable nodos
    // of the simulation sequence

    objeto = op_topo_parent(op_topo_parent(op_id_self()));

    //verifying that the attribute exists
    if (op_ima_obj_attr_exists(objeto, "nodos"))
        op_ima_obj_attr_get(objeto, "nodos", &nodos_activos);

    printf("nodos activos %d \n", nodos_activos);

    FRET (nodos_activos);
}
```

```
static int
numero_nodo_actual()
{
    // This function is used to obtain the number
    // of the current node that is about to register
    // to the BS

    Objjid          objeto;
    char             nombre[14];
    int              nodo_actual = 1;
    Prg_List *      lista;

    FIN (numero_nodo_actual());

    //it obtains the string of the name of the current node
    // then it obtains the substring corresponding to the
    // number of the node after the character _

    objeto = op_topo_parent(op_id_self());

    op_ima_obj_attr_get(objeto, "name", nombre);
```

```
// obtain a list of the 3 fields
lista = prg_str_decomp (nombre, "_");

// the substring of the number of the node it is converted
// to an integer number

nodo_actual= atoi(prg_list_access (lista, 2));

/* deallocate the field list contents and list */
prg_list_free (lista); prg_mem_free (lista);

printf("nodos actual %d \n", nodo_actual);

FRET (nodo_actual);
}

static Boolean
activar_nodo(int nodo_id, int total_nodos)
{
// This function checks if the numer of the node to be activated
// is not greater than the total of nodes for the simulation

Boolean activar_nodo = OPC_FALSE;

FIN (activar_nodo(nodo_id, total_nodos));

// compare if nodo is greater than total_nodos, if not the function
// will be true

if (nodo_id <= total_nodos)
    activar_nodo = OPC_TRUE;

FRET (activar_nodo);
}

//*****mmg july 2008
```

# Referencias Bibliográficas

- [1] Loutfi Nuaymi , “WiMAX, Technology for broadband wireless access”, John Wiley & Sons Ltd, England 2007. ISBN 978-0-470-02808-7.
- [2] IEEE Computer Society and the IEEE Microwave Theory and Techniques Society, “802.16, IEEE Standard for Local and metropolitan area networks, Part 16: Air interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems”, USA, 2004.
- [3] OPNET Technologies Inc., “802.16 ARQ Model Design”, 2005.
- [4] OPNET Technologies Inc., “WiMAX Consortium Model, Version 2, Software Design Document”, Nov., 2005.
- [5] OPNET Technologies Inc., “WiMAX (802.16) Physical Layer Design, Phase 3”, 2006
- [6] OPNET Technologies Inc., “WiMAX 802.16 Physical Layer Model”, 2006.
- [7] OPNET Technologies Inc., “WiMAX Consortium Meeting”, Aug., 2006.
- [8] Masoud Olfat, “1827 Introduction to WiMAX, presentation at OPNETWORK 2006”, Emerging Access Technologies Research (SPRINT), Aug., 2006.
- [9] OPNET Technologies Inc., “Requirements for Internal and Periodic Ranging in WiMAX Model”, Jan., 2007.
- [10] OPNET Technologies Inc., “Requirements for Adaptive Modulation and Coding in WiMAX Model”, Jan., 2007.
- [11] OPNET Technologies Inc., “OPNET’s OFDMA Model for WiMAX, version 2”, Jan., 2007.
- [12] OPNET Technologies Inc., “WiMAX (802.16) DL Frame Concatenation/Packing of MAC PDUs”, 2007.
- [13] OPNET Technologies Inc., “Introduction to WiMAX, Technology Tutorials (Session 1827)”, Official OPNETWORK 2007 Presentation, 2007.
- [14] OPNET Technologies Inc., “WiMAX Adaptive Modulation and Coding, Implementation Design”, 2007.
- [15] Jenhui Chen, Chih-Chieh Wang, Frank Chee-Da Tsal, et al, “The Design and Implementation of WiMAX Module for ns-2 Simulator”, Italia, 2006.
- [16] Andrew S. Tanenbaum, “Computer Networks”, Prentice Hall, Third edition (and Fourth edition), USA 1996. ISBN 0-13-349945-6.

- [17] IEEE Computer Society and the IEEE Microwave Theory and Techniques Society, "802.16, IEEE Standard for Local and metropolitan area networks, Part 16: Air interface for Fixed and Mobile Broadband Wireless Access Systems. Amendment 2: Physical and Medium Access Control Layers for combined Fixed and Mobile Operation in License Bands", USA, 2006.
- [18] Ran Yaniv, Danny Stopler, Tal Kaitz, Kfir Blue Alvarion Ltd. Kevin Baum, Yufei Blankenship, et al, Motorola Labs, "CINR measurements using the EESM method", USA Mar, 2005.
- [19] Cofetel, "Gaceta Cofetel, Año IV, número 23", México, 2005-2006.
- [20] Ma. Carmen España Boquera, "Servicios avanzados de telecomunicación", Ediciones Díaz de Santos, España, 2003, ISBN 8479786078.
- [21] Yueh-Ting Wu, Wanjiun Liao, et al, "Epoch distance of the Random Waypoint Model in Mobile Ad hoc networks", Department of Electrical Engineering, National Taiwan University, Taipei, Taiwan, Oct 2005.
- [22] Tohru Kondo, "Development and evaluation of Robust HDTV transmission system using FEC", Graduate School of Engineering, Hisoshima University, Japan, Oct 2004.
- [23] Supratim Deb, Sharad Jaiswal, Kanthi Nagaraj, "Real-time video multicast in WiMAX Networks", Bell Labs Research India, India, Apr 2008.
- [24] Dionysia Triantafyllopoulou, Nikos Passas, Alexandros Kaloxylos, "Cross-layer adaptation for real-time broadband multimedia over IEEE 802.16e networks", Universities of Greece, Athens and Tripoli, Greece, Apr 2008.
- [25] Yi-Neng Li, Che-Wen Wu, et al, "A latency and modulation aware bandwidth allocation algorithm for WiMAX base stations", Universities of Taiwan, Taipei and Hsinchu, Taiwan, Apr 2008.
- [26] Nishita Hathi, Afzal Lodhi, Petrit Nahi, "Performance evaluation of mobile WiMAX with AMC and MIMO tradeoffs", AIRCOM International Planning Products Engineering Department, UK, Nov 2007.
- [27] L.D. Malviya, A. Gaiwak, Dr. P.D. Vyavhare, "Simulation based comparison of different modulation schemes for mobile WiMAX using TCP and its variants", First International Conference on Emerging trends in Engineering and Technology, Jul 2008.

# Páginas Web

Foro WiMAX

<http://www.wimaxforum.org/home/>

OPNET, Technologies Inc.

<http://www.opnet.com>

OPNET Academic Tier (University Program)

[http://www.opnet.com/WiMAX\\_Academic/](http://www.opnet.com/WiMAX_Academic/)

IEEE Xplore

<http://ieeexplore.ieee.org/search/advsearch.jsp>

Asociación de estándares IEEE

<http://standards.ieee.org/getieee802/index.html>

Libros en línea de Google

<http://books.google.com.mx>

Diccionario Informático

<http://www.alegsa.com.ar/Diccionario/diccionario.php>