



Universidad Nacional Autónoma de México
Facultad de Ingeniería



**ANÁLISIS DE TÉCNICAS DE MODULACIÓN ADAPTIVA
EN REDES INALÁMBRICAS DE BANDA ANCHA
(IEEE 802.16, WIMAX)**

**Tesis que para obtener el título de
Ingeniero en Telecomunicaciones**

Presentan:

**Ximena López Quiroz
Christian Mora Martínez**

**Director de Tesis:
Dr. Víctor Rangel Licea**

**Cd. Universitaria, México, D.F.
Marzo 2006**



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Agradecemos profundamente a nuestra familia por su apoyo incondicional.

A nuestros amigos por hacer el camino más fácil y placentero.

A la Universidad Nacional Autónoma México por brindarnos la oportunidad de aprender y formarnos no sólo como profesionistas sino como personas.

Al Dr. Víctor Rangel por compartir su conocimiento y apoyarnos durante la realización del proyecto.

Al Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica por permitirnos permanecer a su programa de becarios.

Y a la Facultad de Ingeniería por permitirnos disfrutar del placer de ser universitarios.



Índice

Capítulo 1 Introducción1

1.1 Tecnologías de Banda Ancha.....	2
1.2 Definición del problema	3
1.3 Investigación realizada en el área de modelado de redes inalámbricas de banda ancha.....	4
1.4 Objetivos y contribuciones	5
1.5 Estructura de la tesis	6

Capítulo 2 Descripción de la tecnología BWA7

2.1 Introducción	8
2.2 Arquitectura del sistema	8
2.2.1 Sistemas PMP	9
2.2.2 Sistemas MP (Mesh).....	9
2.2.3 Componentes del sistema	9
2.2.4 Características del medio	10
2.2.5 Formas de interferencia.....	11
2.3 Estándares.....	11
2.3.1 ETSI-BRAN.....	12
2.3.2 IEEE 802.16.....	13
2.4 Tecnologías Alternativas.....	14
2.4.1 Wi-Fi	14
2.4.2 3G.	14
2.4.3 UWB	15
2.5 Conclusiones	15

Capítulo 3 Descripción del protocolo de comunicaciones IEEE 802.16.....17

3.1 Introducción	18
3.2 Formatos de los paquetes de transmisión MAC	19
3.2.1 Encabezado genérico	19
3.2.2 Encabezado de solicitud de ancho de banda	20
3.3 Fragmentación, concatenación y empaquetamiento	20
3.4 Paquetes de control MAC	21
3.5 Servicio de programación de transmisión ascendente	24
3.6 Solicitud y asignación de ancho de banda.....	25
3.7 Resolución de colisiones	26
3.8 Ingreso a la red e inicialización.....	27



3.9 Conclusiones	29
Capítulo 4 Técnicas de modulación adaptiva	30
4.1 Introducción	31
4.2 Modulación QPSK (Quadrature Phase Shift Keying)	34
4.3 Modulación QAM (Quadrature Amplitude Modulation)	35
4.3.1 Características de la modulación 16-QAM	37
4.3.2 Características de la modulación 64-QAM	38
4.3.3 Características de la modulación 256-QAM	42
4.4 OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing)	42
4.4.1 Usos	44
4.4.2 MIMO-OFDM	44
4.4.3 Otras versiones de OFDM	44
4.5 Conclusiones	45
Capítulo 5 Modelo de simulación	46
5.1 Introducción	47
5.2 Estación base (BS, Base Station)	47
5.2.1 Rx_point	48
5.2.2 From_network_cloud_rx	48
5.2.3 To_network_cloud_tx	48
5.2.4 To_stats_collection_tx	48
5.2.5 From_link_rx	48
5.2.6 Ant_rx	49
5.2.7 To_link_tx	49
5.2.8 Ant_tx	50
5.2.9 HE_MAC	50
5.2.9.1 Proceso Bwa_bs_mgr	50
5.3 Estación Suscriptora (SS, Subscriber Station)	54
5.3.1 Módulo src_type_1	55
5.3.2 Downstream_sink	55
5.3.3 Ant_rx y ant_tx	56
5.3.4 From_link_rx y from_link_tx	56
5.3.5 MAC	57
5.3.5.1 Proceso Bwa_wm_mgr	57
5.3.5.2 Proceso Bwa_wm_child	61
5.4 Conclusiones	64
Capítulo 6 Resultados	65
6.1 Introducción	66
6.2 Modelo de propagación	66
6.3 Cálculo del SNR	69

6.4 Modelo de simulación	72
6.4.1 Diseño de la Red	74
6.5 Resultados obtenidos sin utilizar modulación adaptiva.....	75
6.6 Resultados obtenidos utilizando modulación adaptiva	79
6.7 Conclusiones	84
Capítulo 7 Conclusiones	86
7.1 Discusiones Finales	87
7.2 Trabajo futuro	87
7.3 Contribuciones.....	88
7.4 Conclusiones finales.....	89
Referencias	91
Apéndice A	93
Apéndice B	98



!





Figura 2 Estándares BRAN.

Figura 3 Acceso inalámbrico de banda ancha.

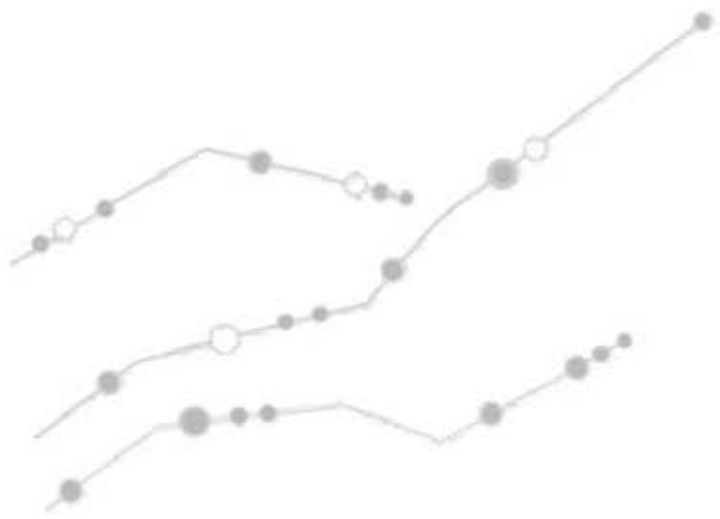




Lista de figuras



Capítulo 1



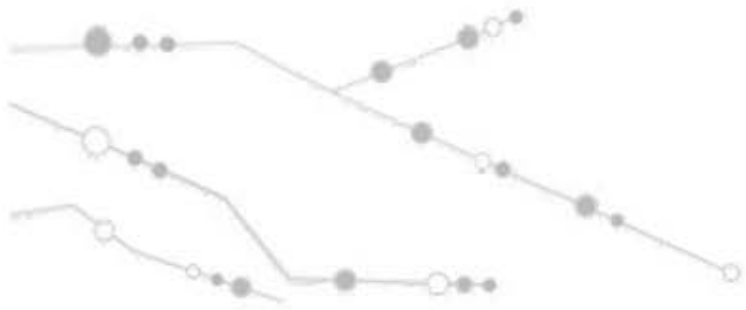
1.1

1.2

1.3

1.4

1.5



Capítulo 2



2.1

2.2

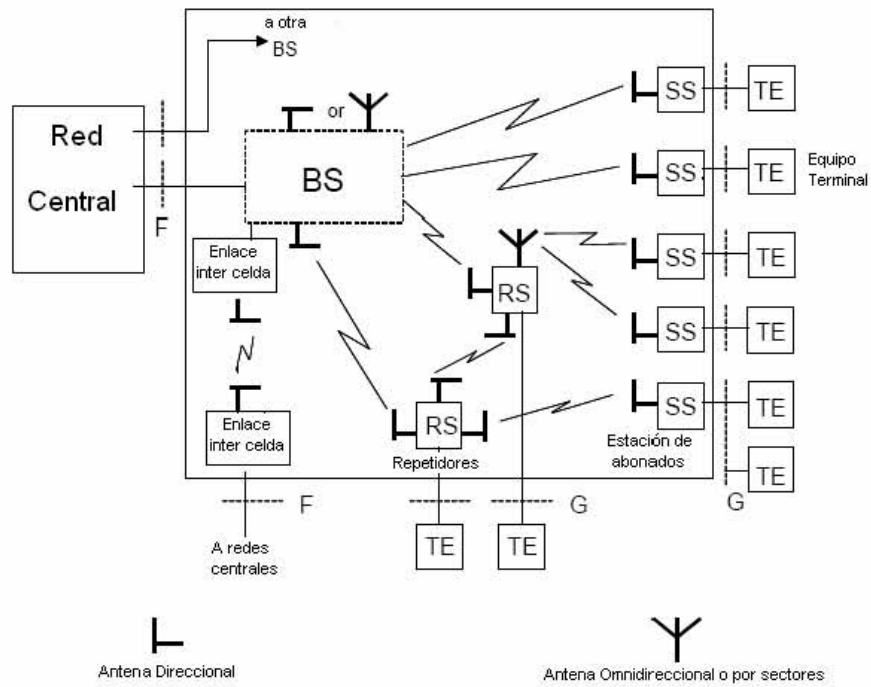


Figura 1 Sistema fijo BWA.

2.3

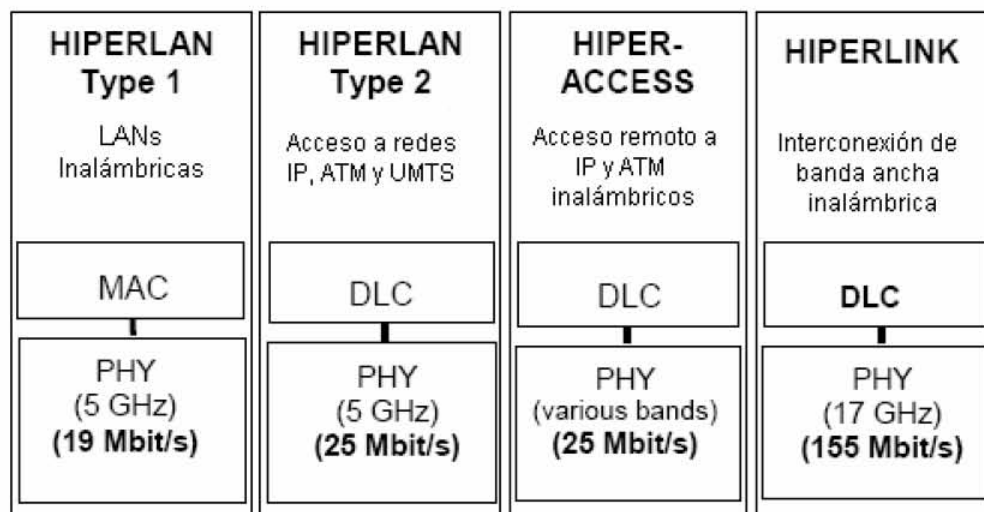


Figura 2 Estándares BRAN.

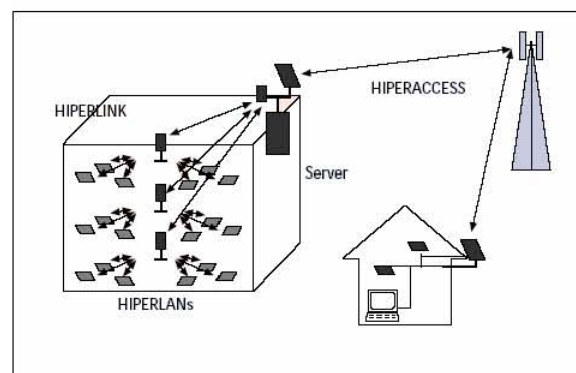


Figura 3 Acceso inalámbrico de banda ancha.

2.4

Tecnología	Estándar	Uso	Throughput	Cobertura	Frecuencia

Tabla 1 Tecnologías inalámbricas[10].

2.5

Capítulo 3



3.1

3.2

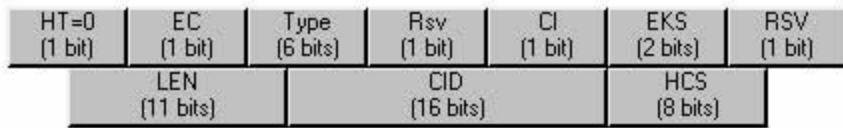


Figura 4 Formato del encabezado MAC genérico.

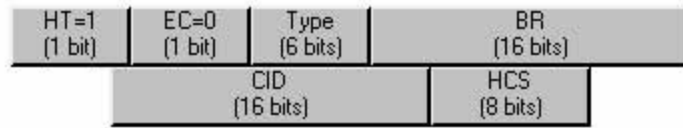


Figura 5 Formato del encabezado MAC de Solicitud de Ancho de Banda.

3.3

3.4

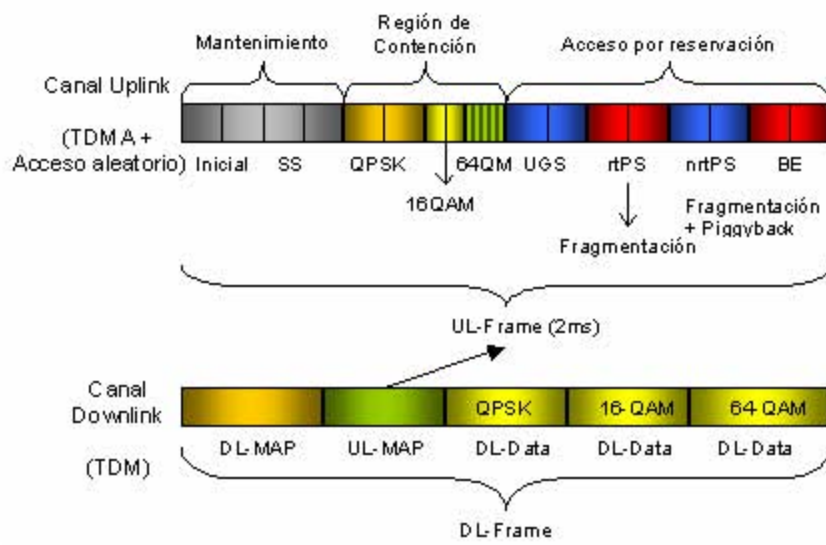


Figura 6 Estructura de los canales UL y DL.

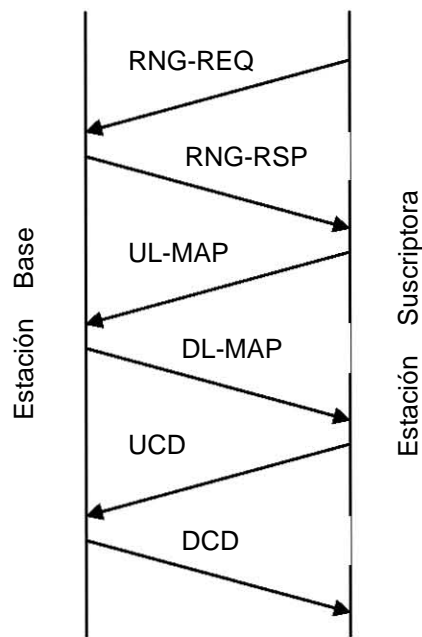


Figura 7 Descripción de los mensajes entre BS y SS.

3.5

3.6

3.7

3.8

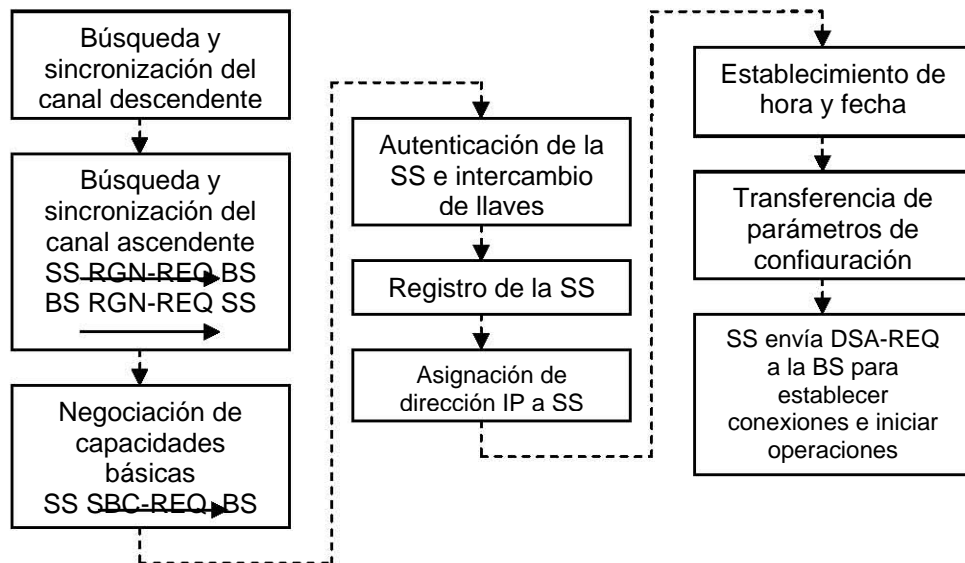


Figura 8 Ingreso a la red e inicialización.

3.9



Capítulo 4

4.1

$$c(t) = E_c \cos(\omega_c t + \phi)$$

$$m(t) = E_m \cos(\omega_m t)$$

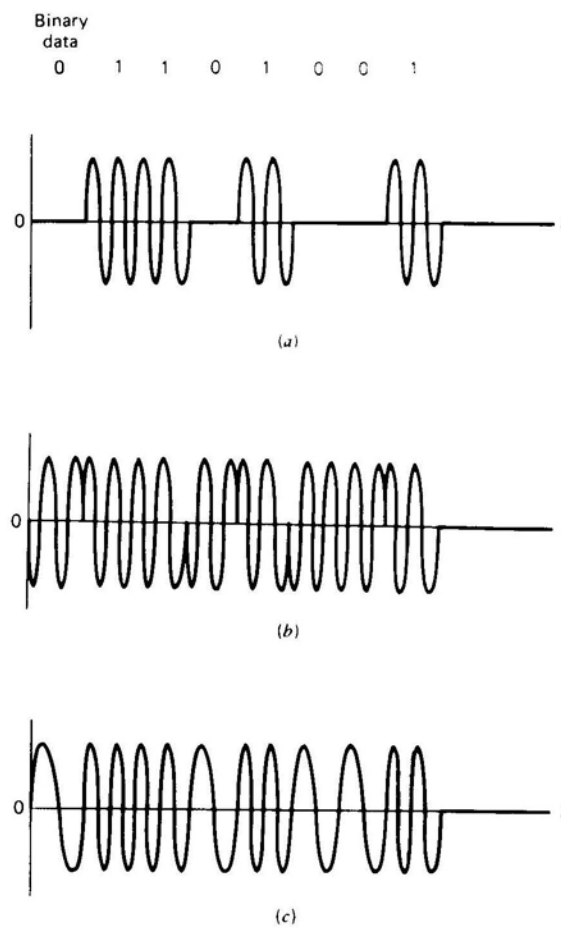


Figura 9 Formas de onda para: a) ASK, b) PSK, c) FSK.

$$s(t) = \begin{cases} A \cos(2\pi ft + \pi), & \rightarrow 1 \\ A \cos(2\pi ft) & \rightarrow 0 \end{cases}$$

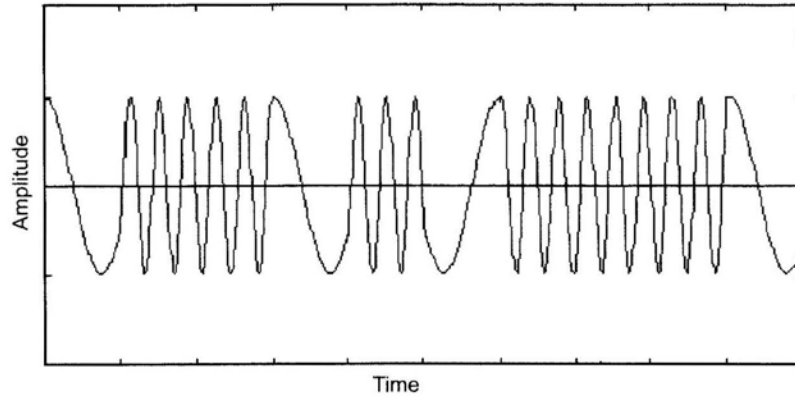


Figura 10 Modulación BPSK.

$$\frac{\pi}{2}$$

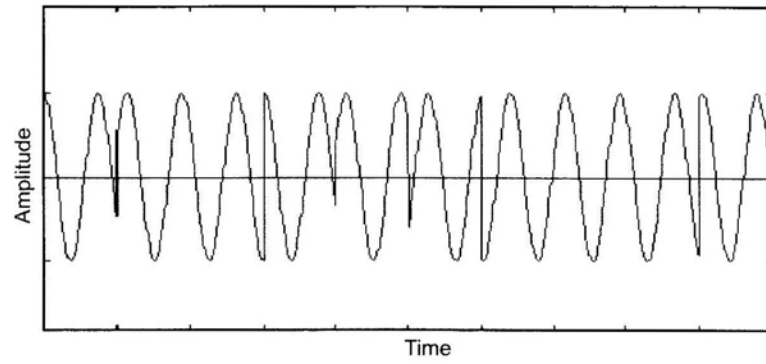


Figura 11 Modulación QPSK.

4.2

$$\sqrt{2} \quad \frac{\pi}{4}$$

$$\sqrt{2} \cos\left(2\pi ft + \frac{\pi}{4}\right)$$

$$\sqrt{2} \cos\left(2\pi ft + \frac{3\pi}{4}\right)$$

$$\sqrt{2} \cos\left(2\pi ft + \frac{5\pi}{4}\right)$$

$$\sqrt{2} \cos\left(2\pi ft + \frac{7\pi}{4}\right)$$

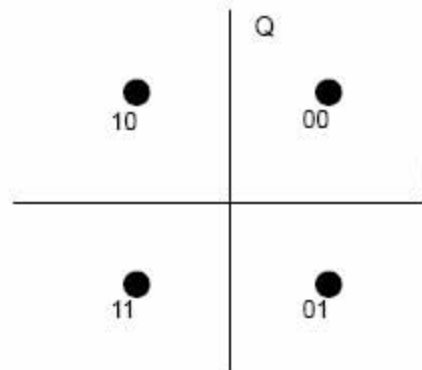


Figura 12 Constelación QPSK.

B(1)	B(2)	I	Q
0	0	1	1
0	1	1	-1
1	0	-1	1
1	1	-1	-1

Tabla 2 Representación de los bits en QPSK.

4.3

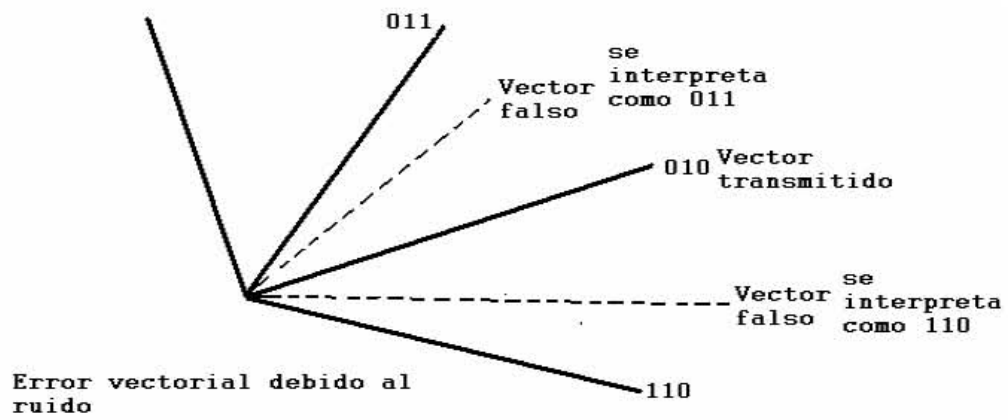


Figura 13 Representación de un error en QAM.

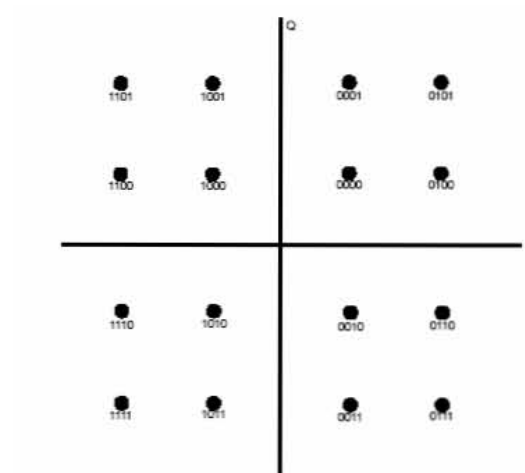


Figura 14 Constelación 16-QAM (en código Gray).

B(1)	B(2)	B(3)	B(4)	I	Q

Tabla 3 Representación de los bits en 16-QAM.

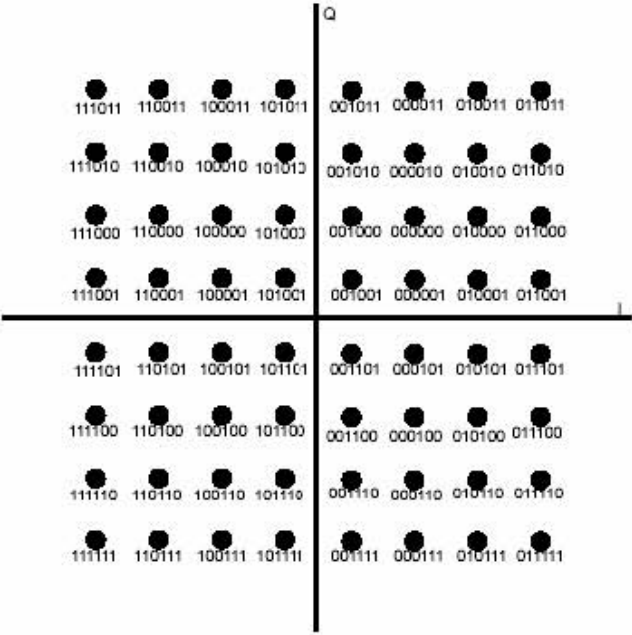


Figura 15 Constelación 16-QAM (en código Gray).

B(1)	B(2)	B(3)	B(4)	B(5)	B(6)	I	Q

Tabla 4 Representación de los bits en 64-QAM.

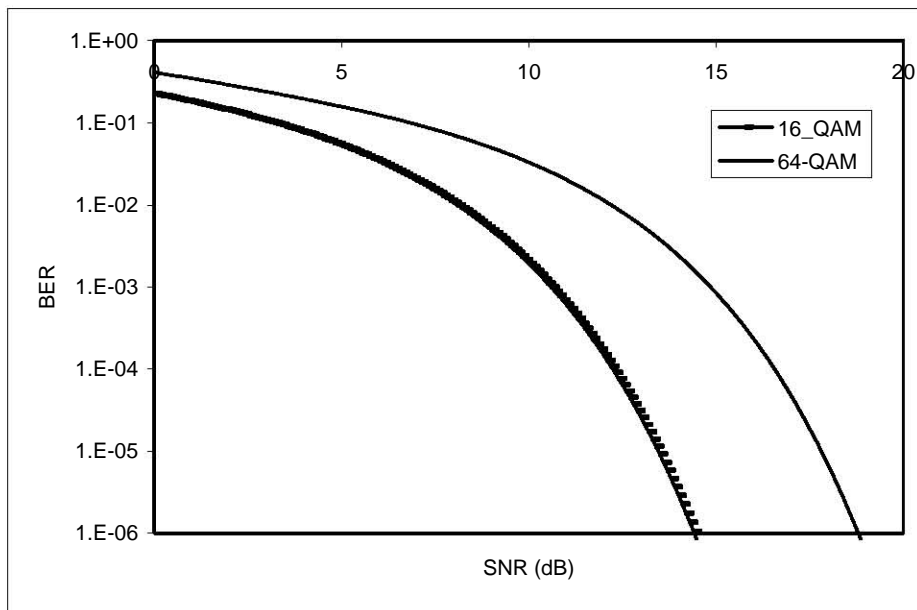


Figura 16 BER en función del SNR en QAM[15].

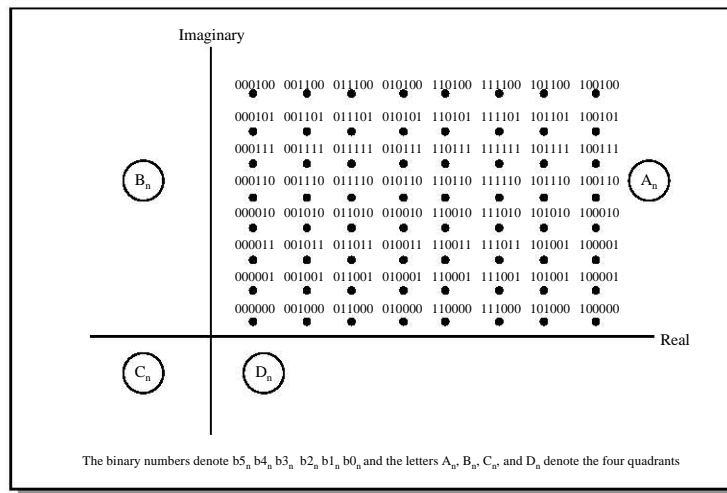


Figura 17 Constelación 256-QAM (en código Gray).

4.4

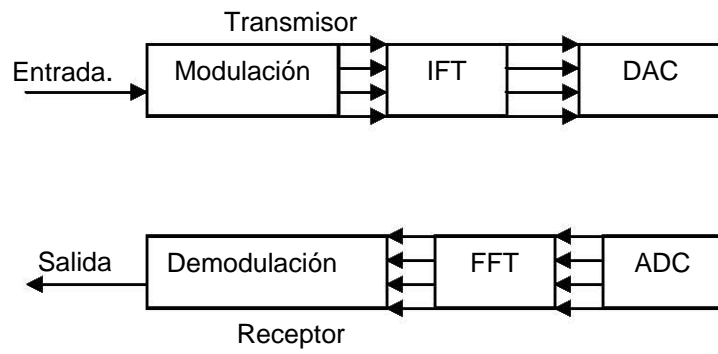
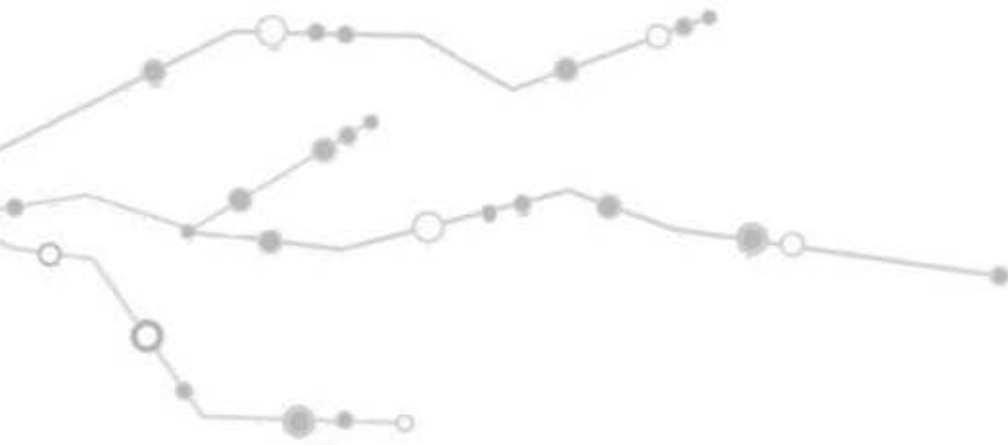


Figura 18 Sistema OFDM.

4.5



Capítulo 5

5.1

5.2

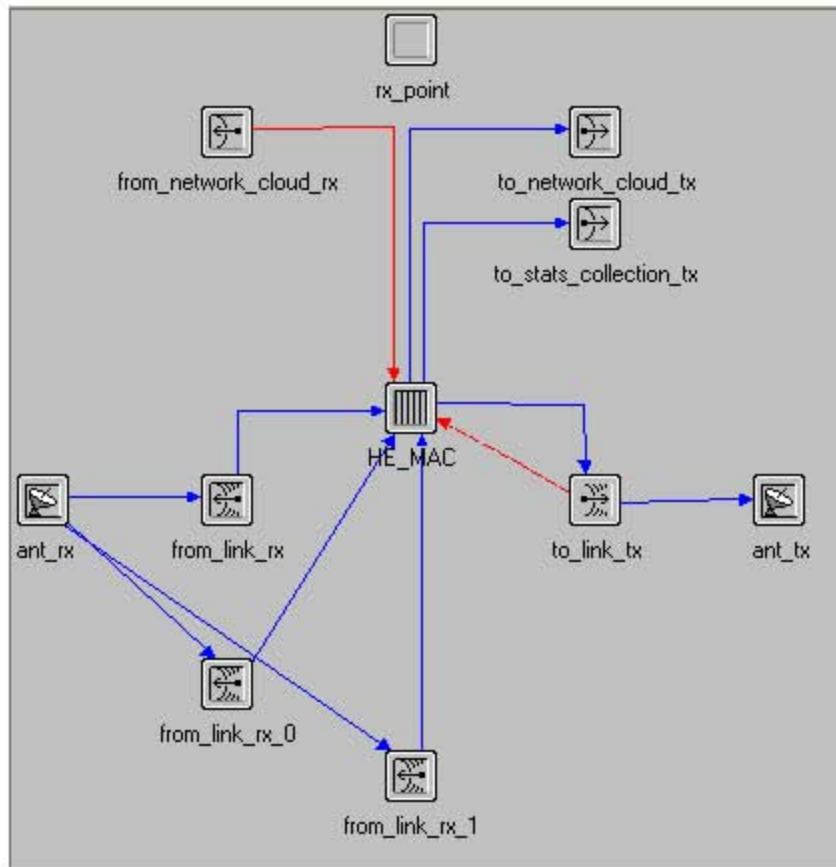


Figura 19 Representación de la estación base.

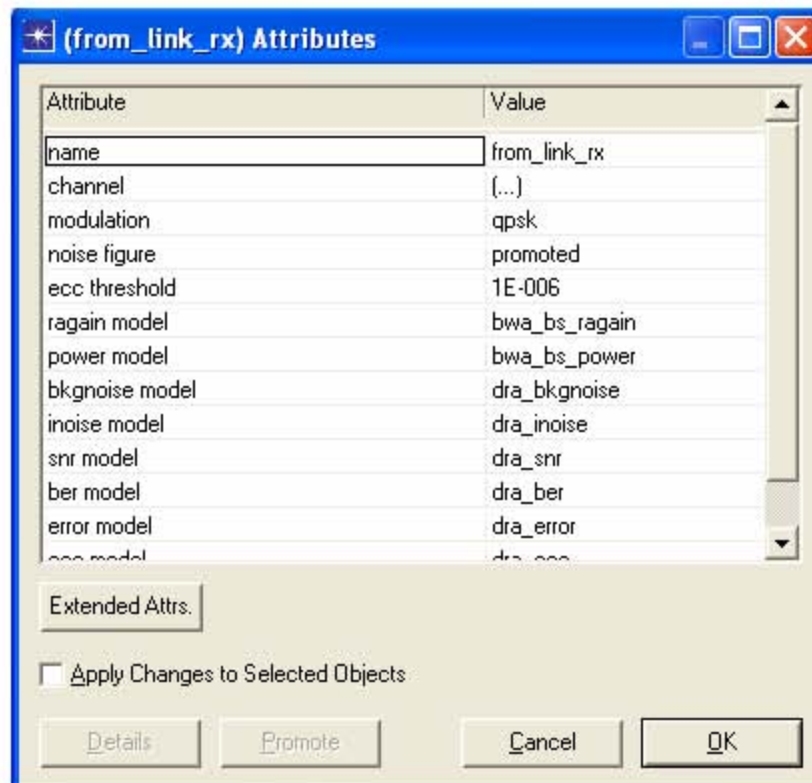


Figura 20 Atributos del canal de subida.

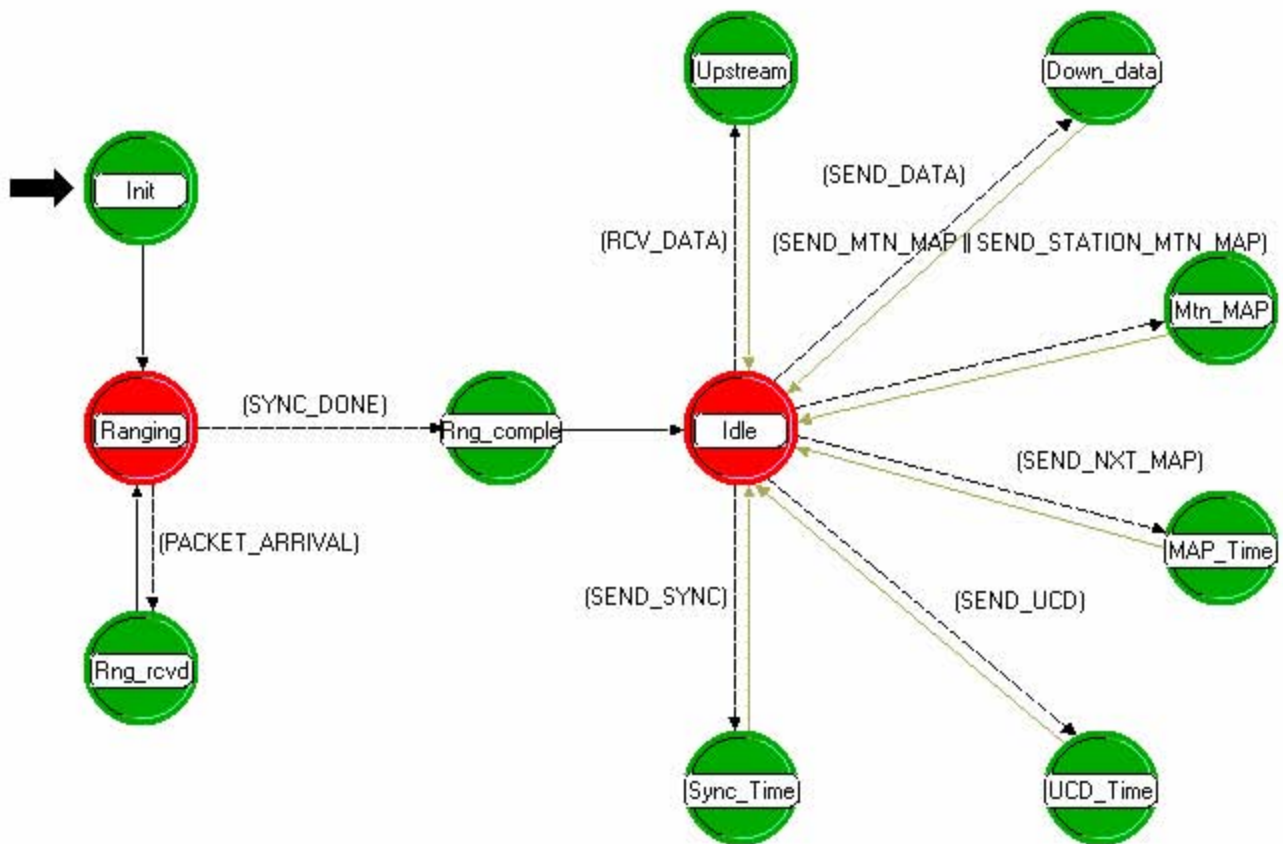


Figura 21 Proceso Bwa_bs_mgr.

5.3

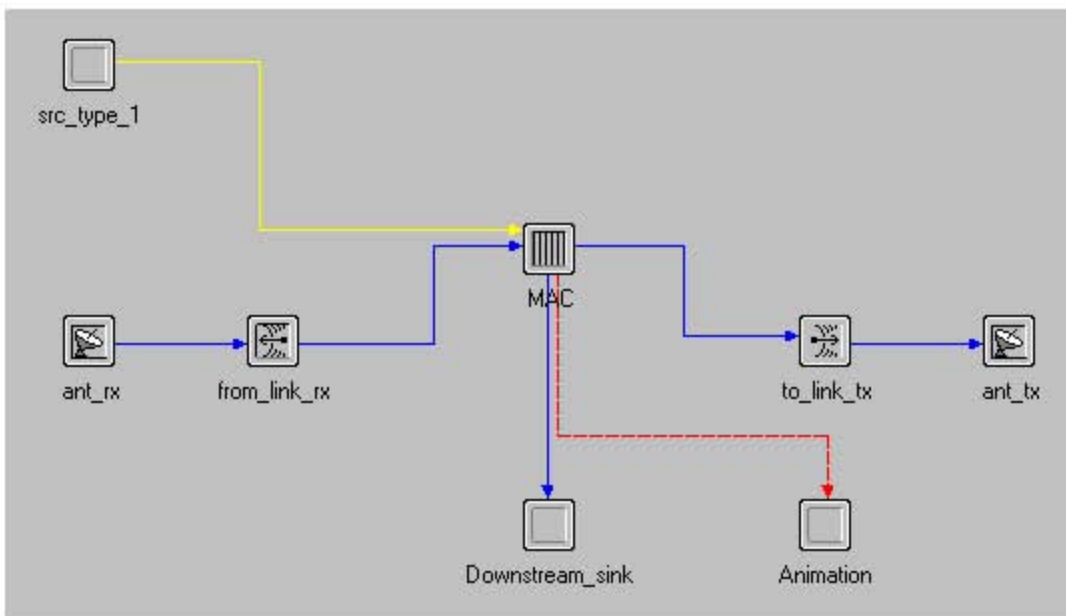


Figura 22 Estación suscriptora.

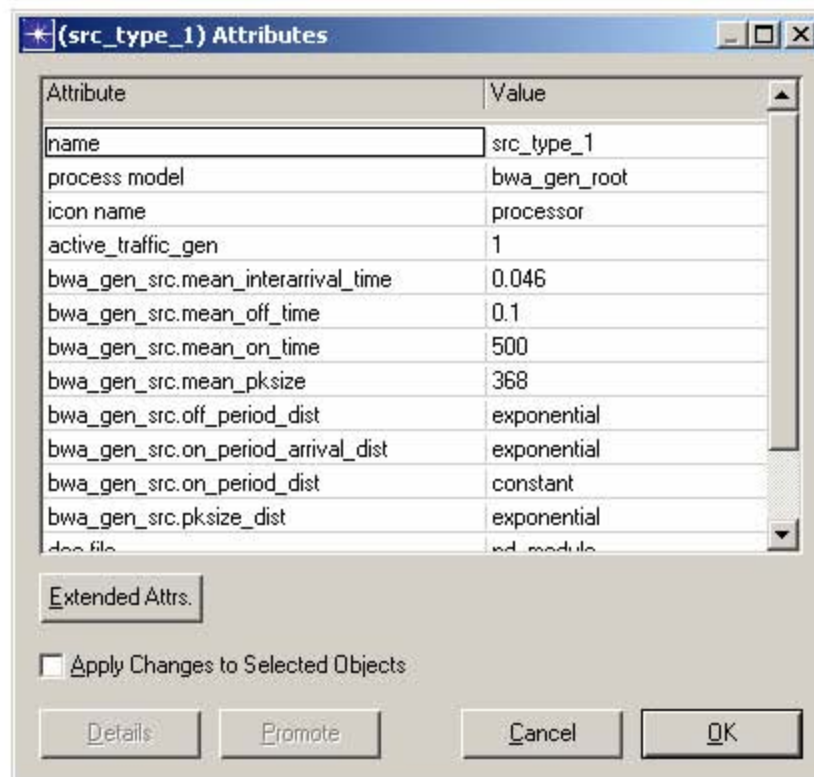


Figura 23 Atributos del generador de tráfico.

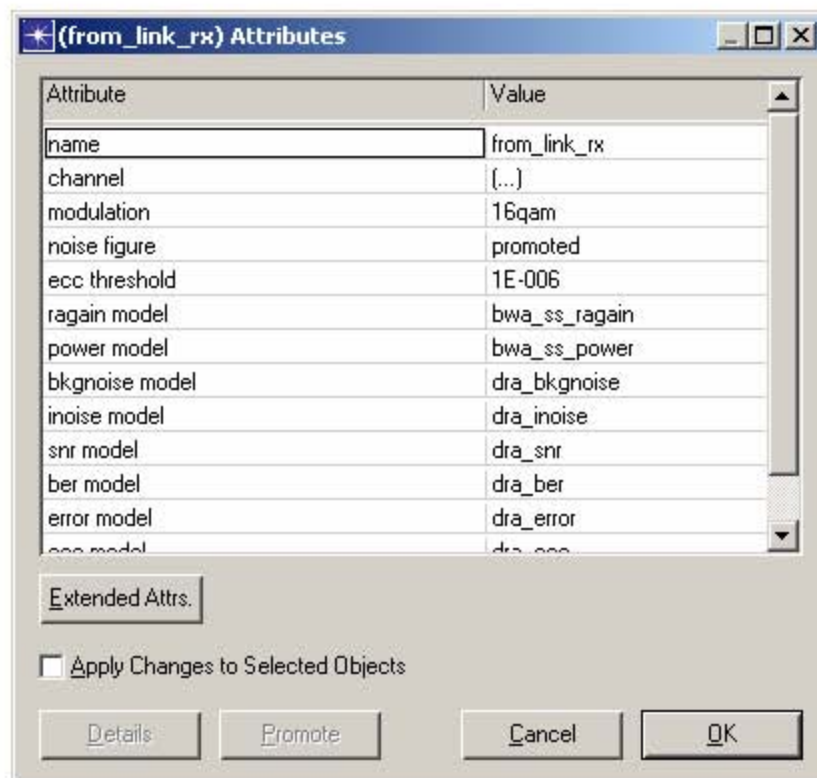


Figura 24 Atributos del canal de bajada.

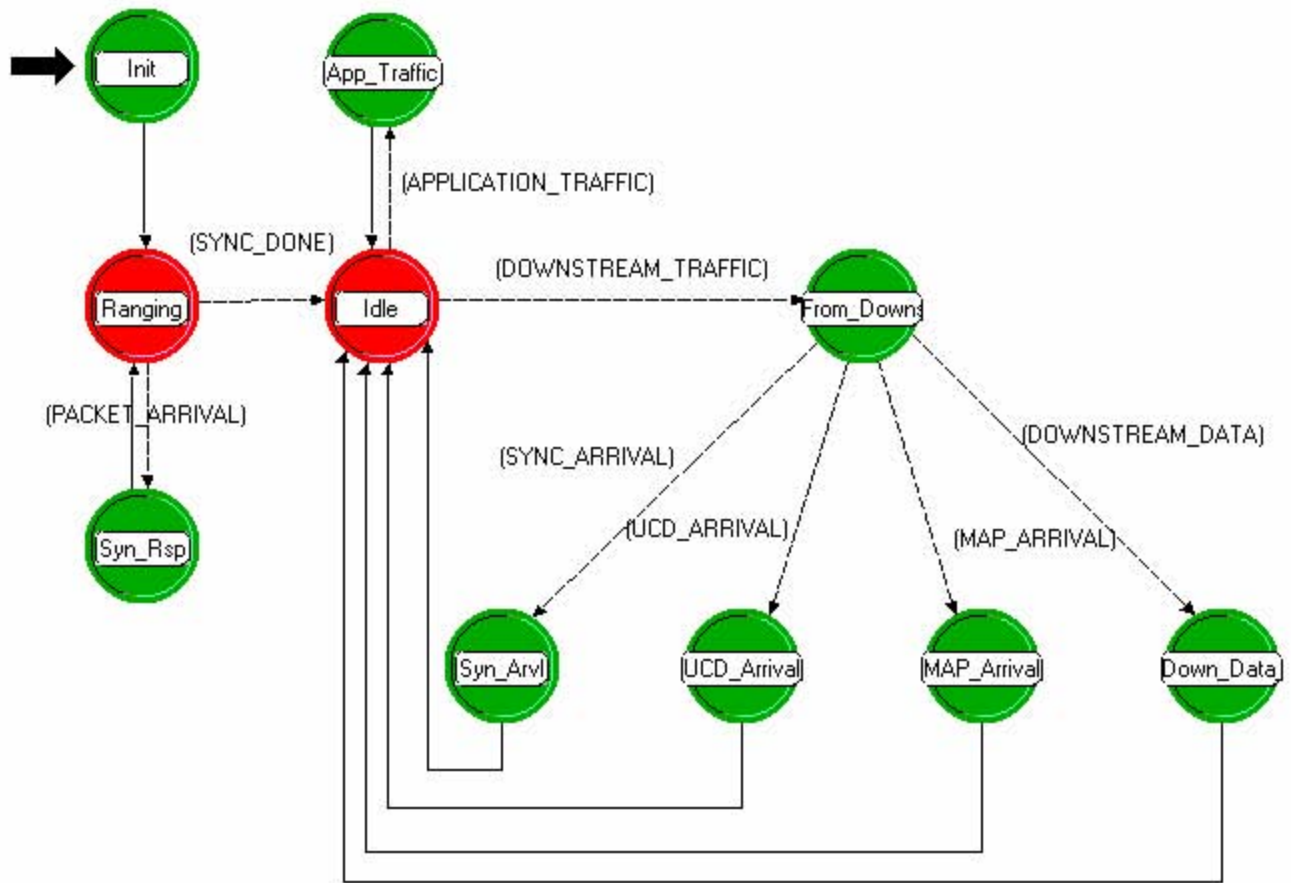


Figura 25 Proceso Bwa_wm_mgr.

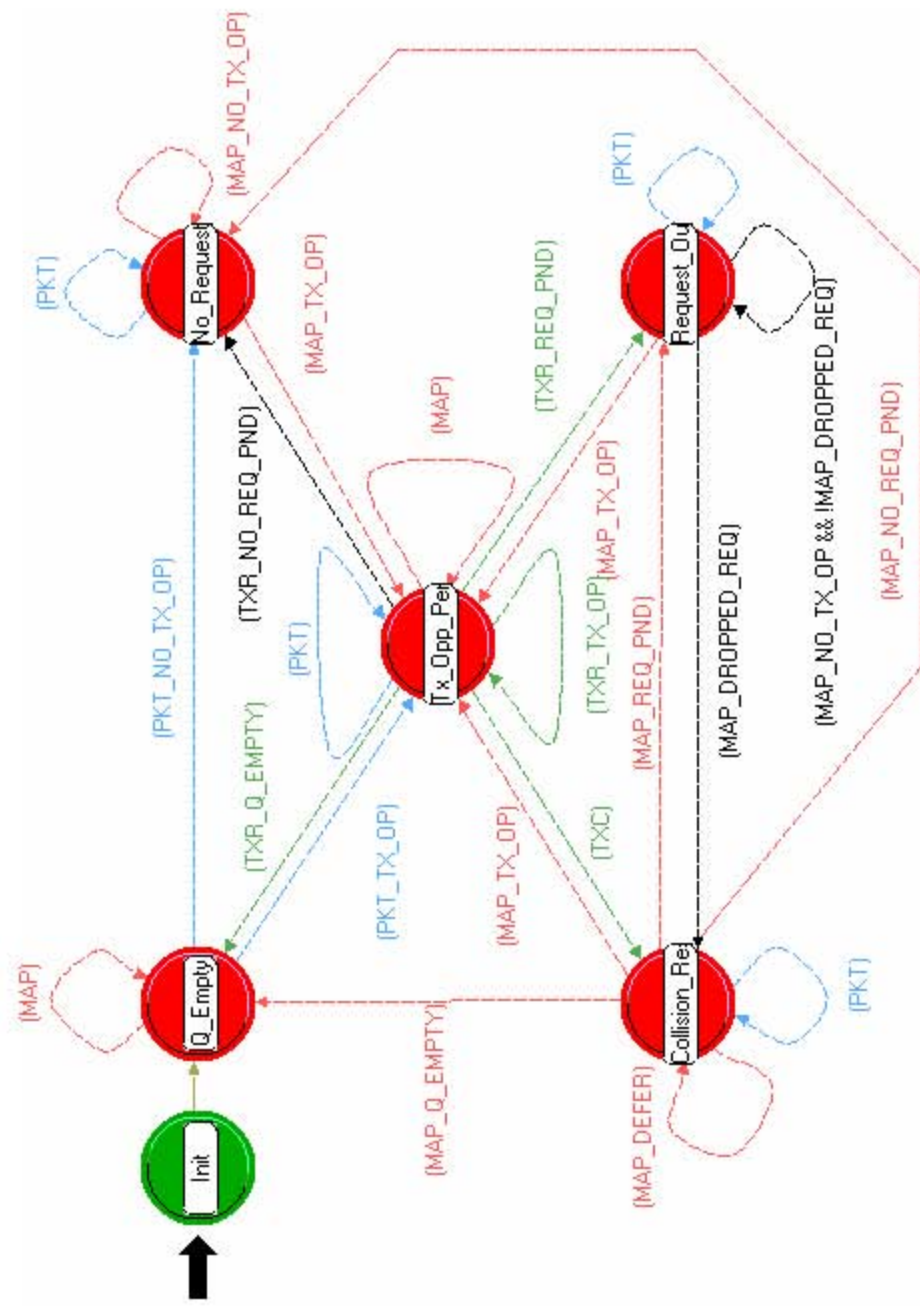


Figura 26 Proceso Bwa_wm_child.

5.4

Capítulo 6



6.1

6.2

$$PL = A + 10\gamma \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) + s$$

$$A = 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi d_0}{\lambda} \right)$$

$$\lambda = \frac{\text{vel_luz}}{f}$$

$$\gamma = a - bh_b + \frac{c}{h_b}$$

Constantes	Categorías		
	A	B	C
a			
b			
c			

Tabla 5 Parámetros del exponente de pérdida por trayectoria.

$$PL = A + 10\gamma \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) + s + C_f + C_h$$

$$C_f = 6 \log_{10} \left(\frac{f}{2000} \right)$$

$$C_h = -10.8 \log_{10} \left(\frac{h}{2} \right)$$

$$C_h = -20 \log_{10} \left(\frac{h}{2} \right)$$

--	--	--

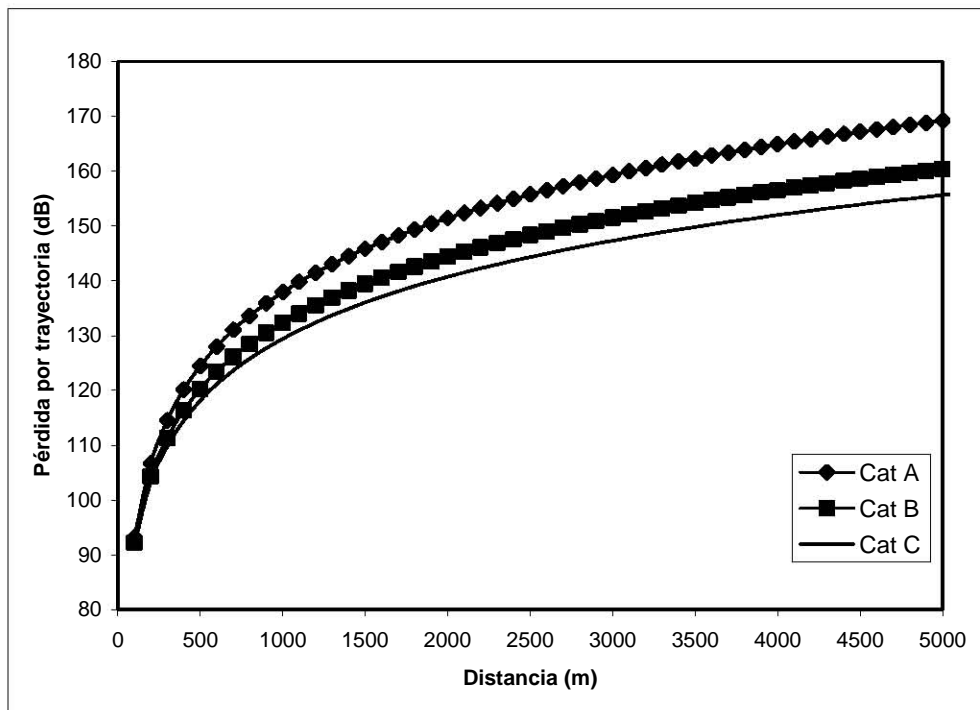


Figura 27 Gráfica de la pérdida por trayectoria en función de la distancia.

6.3

$$P_{rec} [dB] = P_{tx} + BS_G + SS_G - PL$$

$$Ruido_t\acute{e}rmico = 10\log(290 * noise_figure * BW * 1.379 * 1x10^{-23})$$

$$SNR = P_{rec} - Ruido_t\acute{e}rmico$$

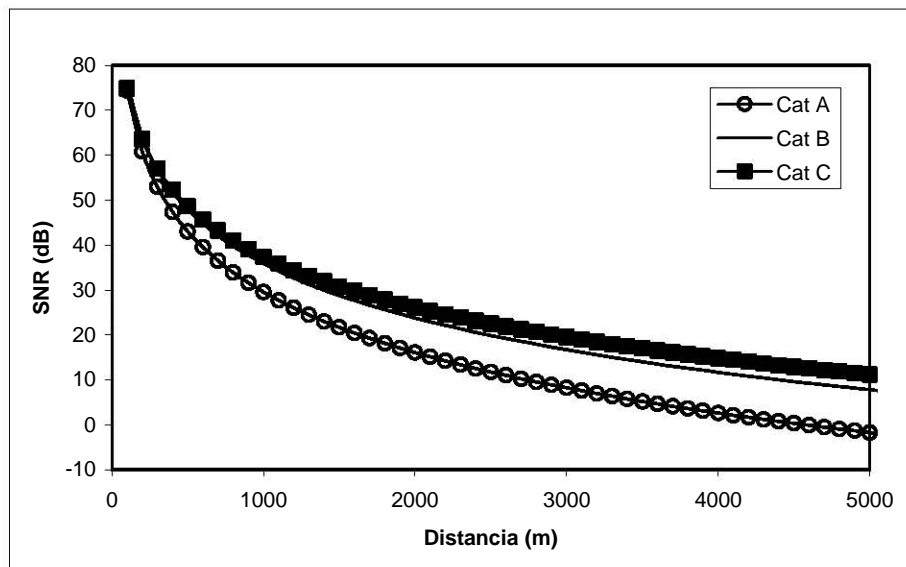


Figura 28 Gráfica del SNR en función de la distancia.

$$BER_{16-QAM} = \frac{3}{8} \operatorname{erfc}\left(\sqrt{\frac{2}{5} SNR}\right) + \frac{1}{4} \operatorname{erfc}\left(3\sqrt{\frac{2}{5} SNR}\right) - \frac{1}{8} \operatorname{erfc}\left(5\sqrt{\frac{2}{5} SNR}\right)$$

$$BER_{64-QAM} = \frac{7}{24} \operatorname{erfc}\left(\sqrt{\frac{1}{7} SNR}\right) + \frac{1}{4} \operatorname{erfc}\left(3\sqrt{\frac{1}{7} SNR}\right) - \frac{1}{24} \operatorname{erfc}\left(5\sqrt{\frac{1}{7} SNR}\right) \\ + \frac{1}{24} \operatorname{erfc}\left(9\sqrt{\frac{1}{7} SNR}\right) - \frac{1}{24} \operatorname{erfc}\left(13\sqrt{\frac{1}{7} SNR}\right)$$

$$\operatorname{erfc}(x) = \exp\left(\frac{-x^2}{\sqrt{\pi x}}\right)$$

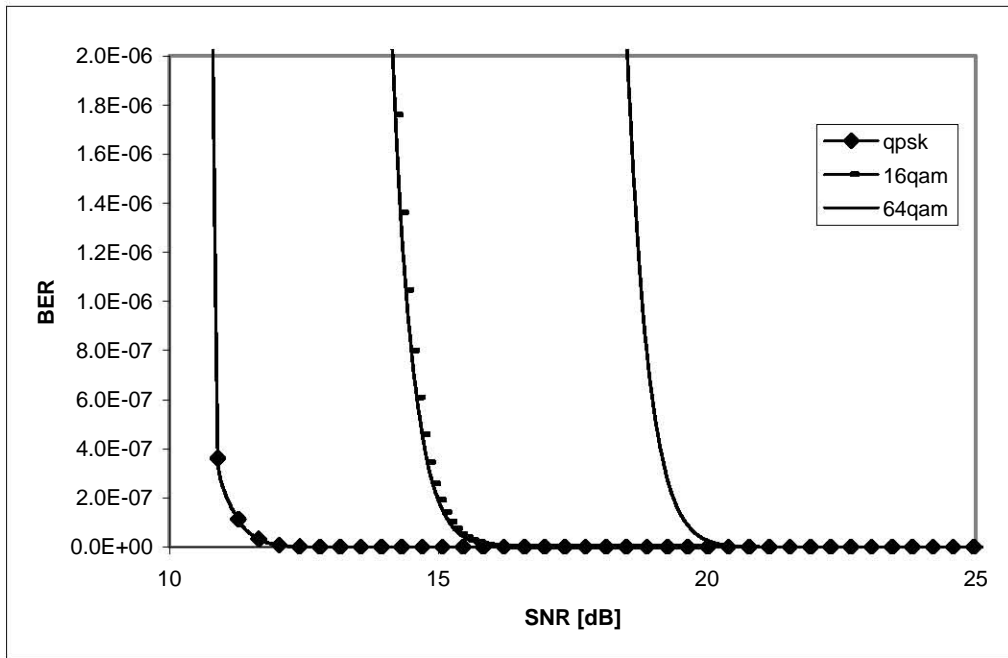


Figura 29 Gráfica del BER en función del SNR.

Modulación/mínSNR	Distancia [km]		
	Cat A	Cat B	Cat C
QPSK/12dB			
16-QAM/16.4dB			
64-QAM/22.7dB			

Tabla 6 Rango de alcance para cada modulación.

6.4

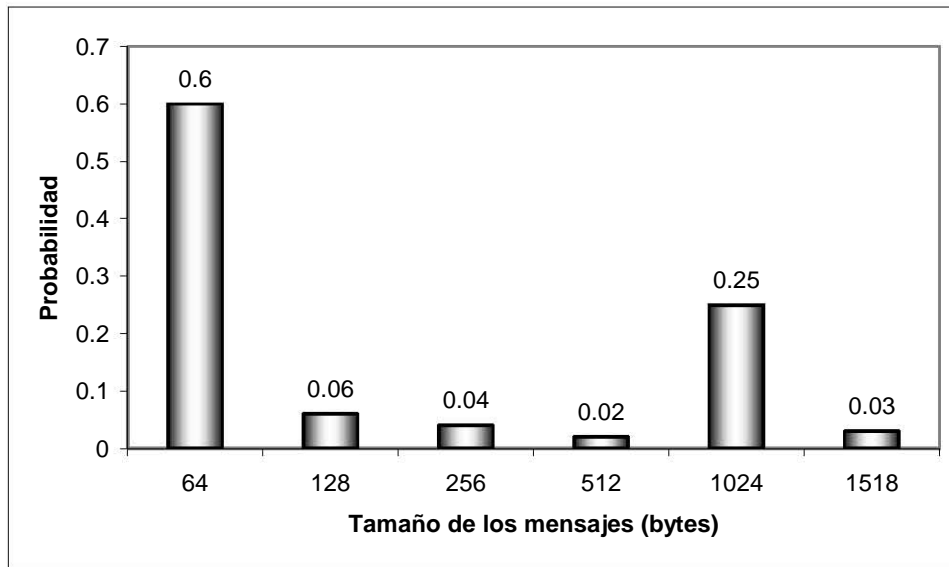


Figura 30 Distribución de probabilidad en los mensajes.

Tamaño del paquete (bytes)	Slots requeridos	Probabilidad de ocurrencia

Tabla 7 Slots requeridos para cada paquete.

$$\begin{aligned} \text{Tamaño} &= (64 * 0.6) + (128 * 0.06) + (256 * 0.04) + (512 * 0.02) \\ &+ (1024 * 0.25) + (1518 * 0.03) = 368.1 \text{ bytes} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Tamaño(slots)} &= (7 * 0.6) + (11 * 0.06) + (19 * 0.04) + (35 * 0.02) + \\ &(69 * 0.25) + (101 * 0.03) = 26.6 \text{ slots} \end{aligned}$$

$$\text{Packet_Interarrival_time} = \frac{368.1 * 8 \frac{\text{bits}}{\text{paquete}}}{32000 \frac{\text{bits}}{\text{seg}}} = 0.092 \frac{\text{seg}}{\text{paquete}}$$

$$\text{Packet_Interarrival_time} = \frac{368.1 * 8 \frac{\text{bits}}{\text{paquete}}}{64000 \frac{\text{bits}}{\text{seg}}} = 0.046 \frac{\text{seg}}{\text{paquete}}$$

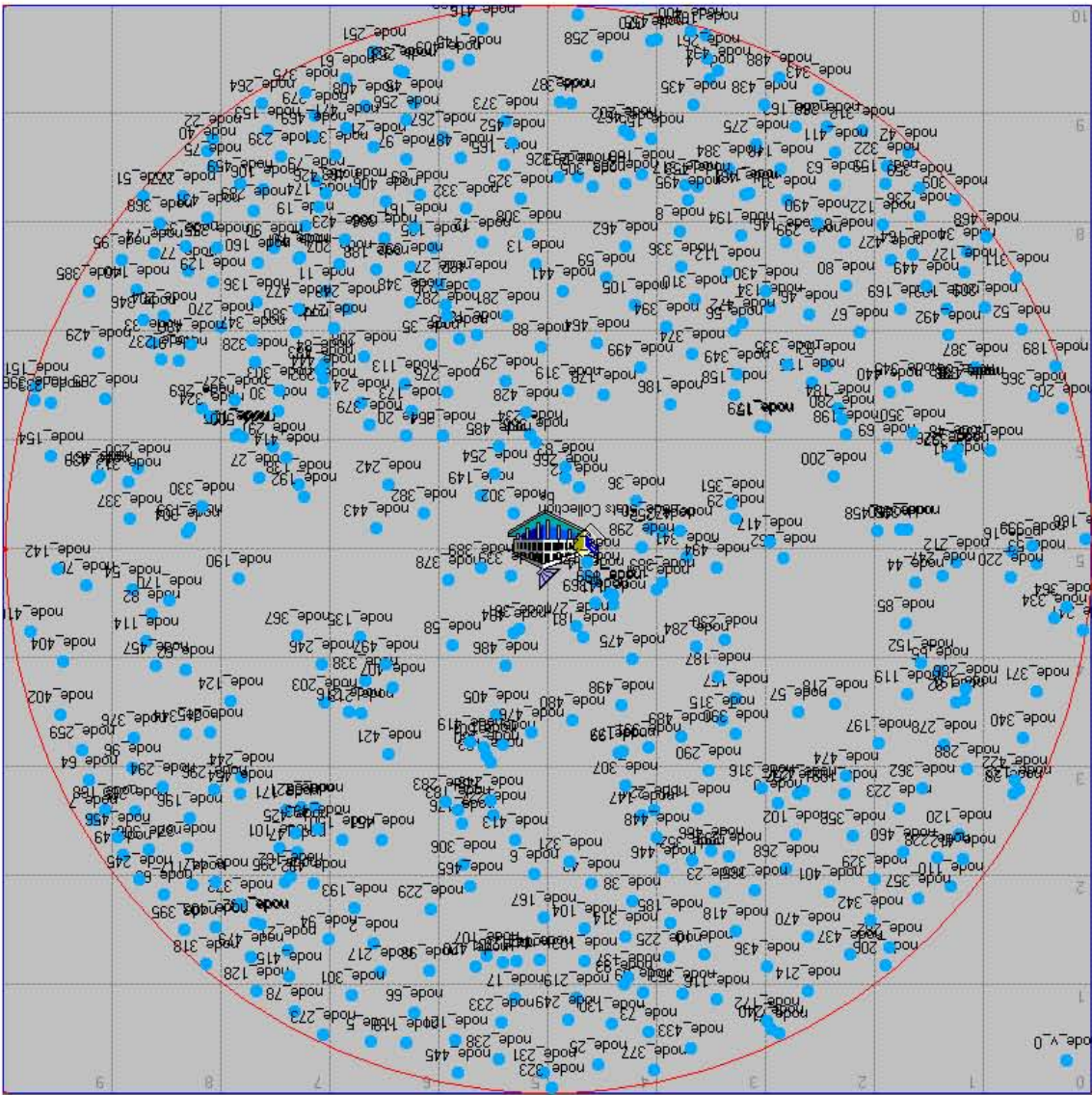
$$bw = No_SS_por_modulación \left(\frac{Tamaño_del_paquete \left(\frac{slots}{paq} \right)}{Packet_interarrival_time \left(\frac{seg}{paq} \right)} \right) = bw \left(\frac{slots}{seg} \right)$$

$$bw = \frac{bw \left(\frac{slots}{seg} \right)}{\frac{1mapa}{0.002seg}} = bw \left(\frac{slots}{mapa} \right)$$

$$Map_time(seg) = 16 * 8 * \left(\frac{bw_{QPSK}}{9.6Mbps} + \frac{bw_{16-QAM}}{19.2Mbps} + \frac{bw_{64-QAM}}{28.8Mbps} \right)$$

$$Throughput (kbps) = No_SS * tráfico_generado (kbps)$$

Figura 31 Red BWA de 500 nodos



$$Duración_de_un_slot(seg) = \frac{16 * 8(bits)}{vel_tx_qpsk \left(\frac{bits}{seg} \right)}$$

$$Tiempo_de_petición(seg) = Duración_de_slot(seg) * No_slots$$

Usuarios	Slots	Throughput (kbps)	Tiempo de petición	Slots de contención	Tiempo de contención	Map_time

Tabla 8 Cálculos teóricos para QPSK.

Usuarios	Slots	Throughput (kbps)	Tiempo de petición	Slots de contención	Tiempo de contención	Map_time

Tabla 9 Cálculos teóricos para 16-QAM.

Usuarios	Slots	Throughput (kbps)	Tiempo de petición	Slots de contención	Tiempo de contención	Map_time

Tabla 10 Cálculos teóricos para 64-QAM.

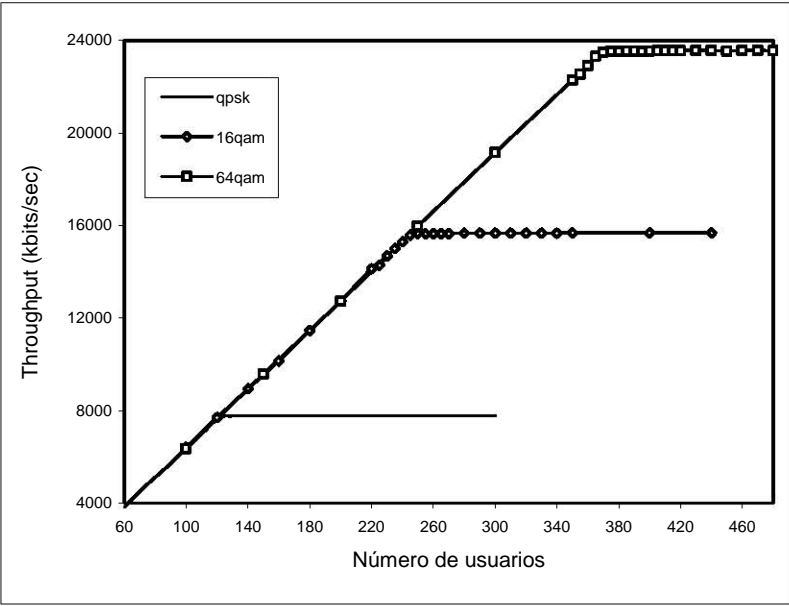


Figura 32 Throughput alcanzado sin modulación adaptiva.

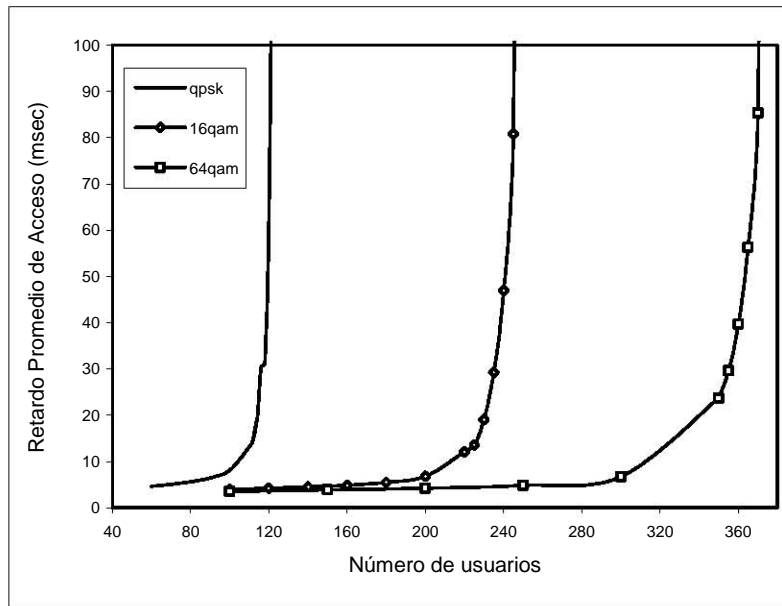


Figura 33 Retardo resultante sin usar modulación adaptiva.

6.6

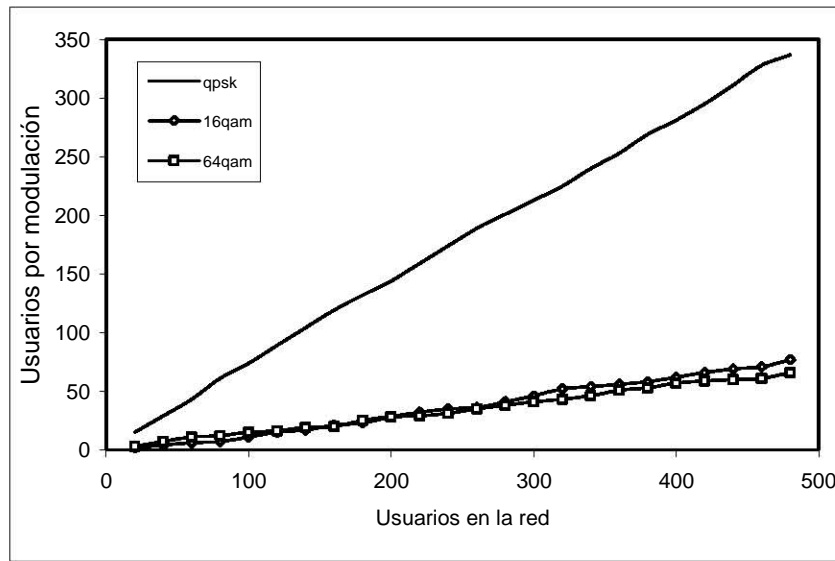


Figura 34 Número de usuarios de cada modulación en la red.

$$slots_contención = \frac{No_SS * duración_mapa}{tiempo_de_generación_paquete}$$

$$slots_contención = \frac{No_SS_{mod} * 0.002}{0.092}$$

Usuarios	Throughput (Kbps)			Slots de contención			maptime
	QPSK	16-QAM	64-QAM	QPSK	16-QAM	64-QAM	

Tabla 11 Cálculos teóricos usando modulación adaptiva.

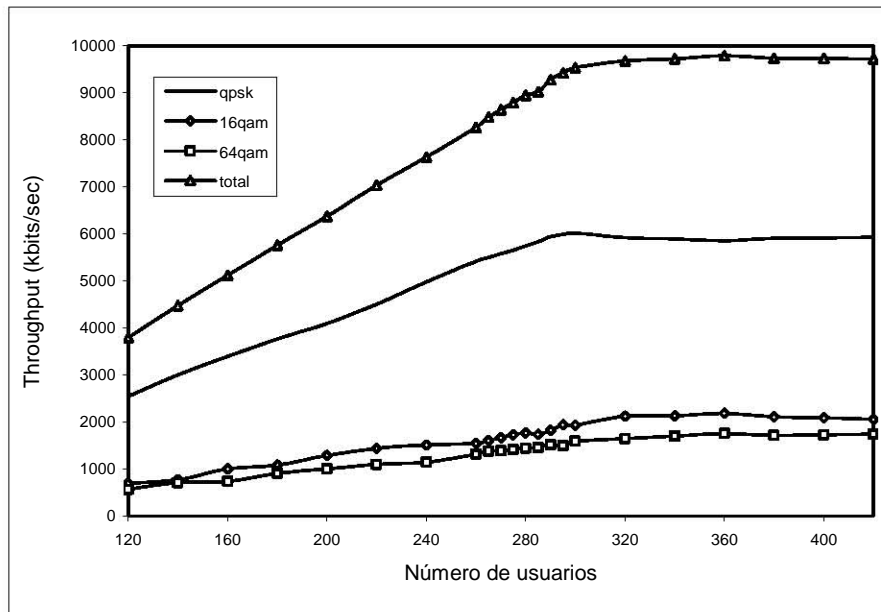


Figura 35 Throughput en la red con modulación adaptiva.

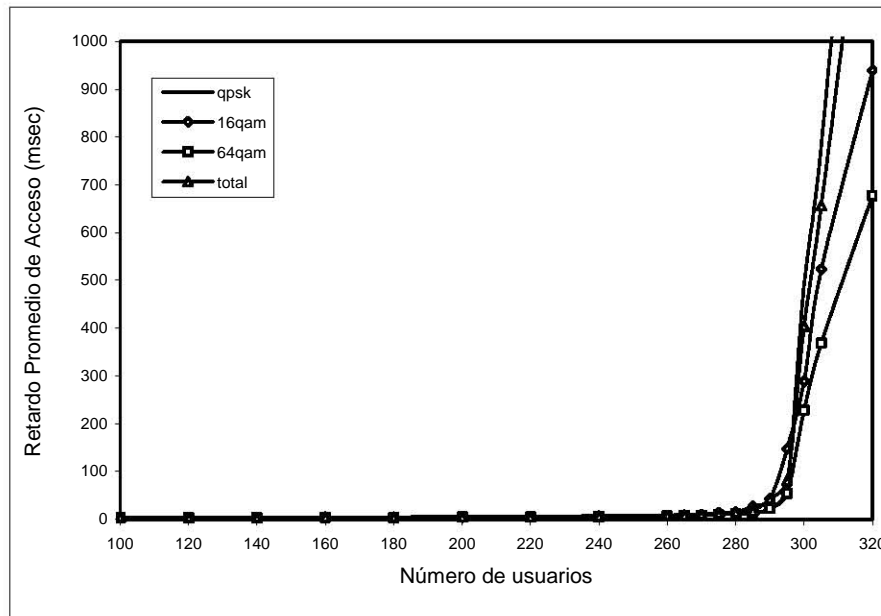


Figura 36 Retardo promedio en la red con modulación adaptiva.

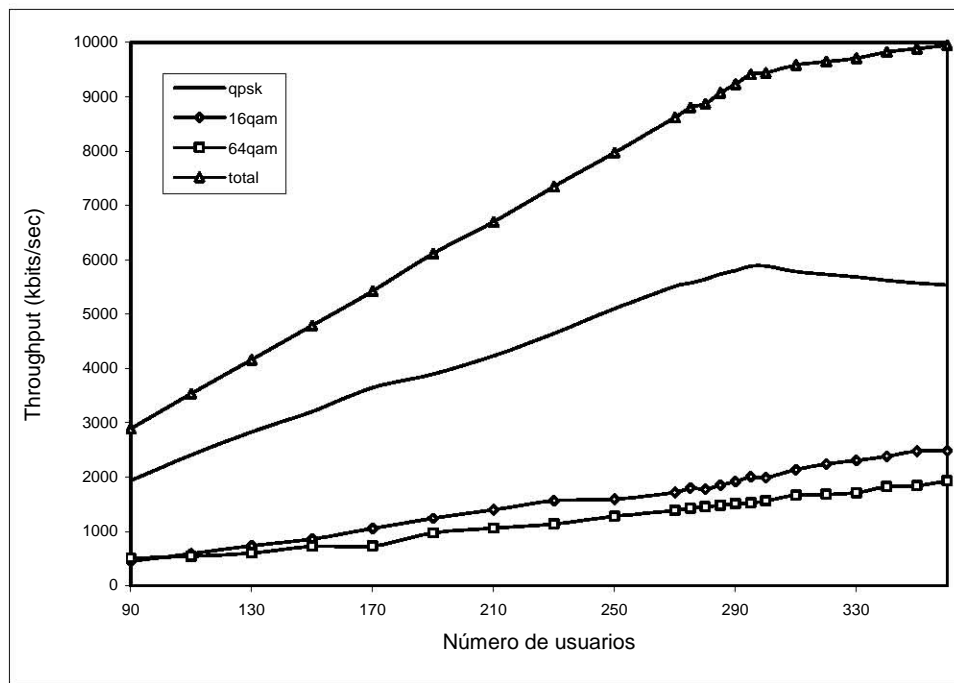


Figura 37 Throughput con modulación adaptiva atendiendo uno a uno.

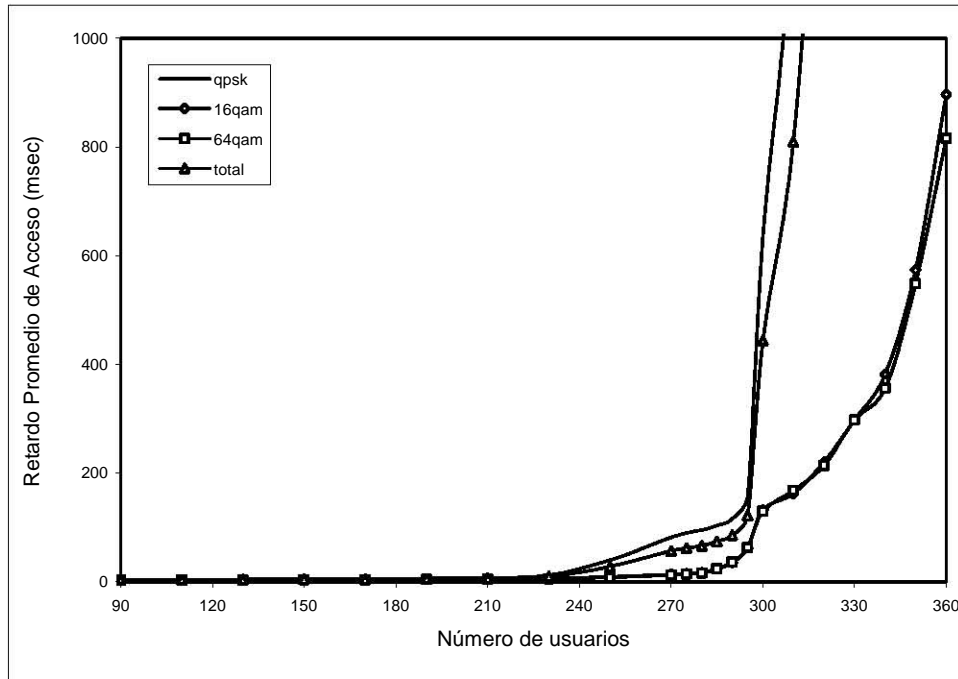


Figura 38 Retardo promedio con modulación adaptiva atendiendo uno a uno.

6.7



Capítulo 7



7.1

7.2


7.3

7.4









Análisis de Técnicas de Modulación Adaptiva
en Redes Inalámbricas de Banda Ancha
(IEEE 802.16, WiMAX)

Capítulo 1

Introducción






1.1 Tecnologías de Banda Ancha

Buscando nuevos medios y tecnologías para la transmisión de información de forma más eficiente procesándola en mayor cantidad y menores tiempos para cubrir la demanda de consumidores en el rubro residencial y de pequeños negocios, se ha creado el acceso de banda ancha para servicios de última milla. Entre ellos se encuentran tecnologías como *DSL (Digital Subscriber Line)*, la cuál provee al usuario de una alta velocidad usando dos o tres pares trenzados (*UTP, Unshield Twisted Pair*) para ofrecer servicios de datos a una velocidad de 2 Mbps en ambas direcciones, es decir, tanto en el canal *downstream* (canal de bajada) que es el enlace de la estación base al usuario, como en el *upstream* (canal de subida) el cual va del usuario a la estación base; mientras que *ADSL (Asymmetric Digital Subscriber Line)* ofrece velocidades de los 6 a los 8 Mbps para el canal de bajada y cientos de kilobits para el canal de subida. De manera similar las redes de cable coaxial fueron tradicionalmente usadas para servicios de televisión, y han evolucionado para ofrecer altas transmisiones de datos y servicios de telefonía a los usuarios. El acceso inalámbrico de banda ancha (*BWA Broadband Wireless Access*) está surgiendo como una tecnología con múltiples ventajas. Entre ellas su rápida implementación, alta escalabilidad, bajos costos de mantenimiento y actualización, además de una inversión que se ajusta al crecimiento del mercado.

Las redes inalámbricas se han convertido en el nuevo atractivo para los operadores que aún no cuentan con una infraestructura de cableado, gracias a una rápida implementación e inversión inicial pequeña. La inversión inicial es determinada por las demandas de los consumidores y no por el objetivo de la red, ya que las redes inalámbricas son fáciles de actualizar para añadir usuarios de acuerdo al crecimiento de la demanda. La inversión moderada por parte de los operadores abre la oportunidad de desarrollar esta tecnología en zonas rurales o sitios con dificultades geográficas.

En la actualidad existen dos estándares diferentes para redes *BWA*. Estos estándares son: *ETSI BRAN (European Telecommunications Standards Institute Broadband Radio Access Networks)* e *IEEE 802.16*.

El estándar *IEEE 802.16*, es mucho más robusto que el protocolo *ETSI BRAN* al ser un estándar que se deriva del protocolo americano de televisión por cable para la transmisión de datos (*DOCSIS, Data Over Cable Service Interface Specification*). Este estándar cuenta con seis tipos diferentes de reservación (*QoS, Quality of service*) y con diversos tipos de modulación (*QPSK, 16-QAM y 64-QAM*) para la transmisión de servicios en tiempo real como son video, telefonía, voz sobre *IP* así como la transmisión de video conferencias y tráfico de Internet. Las velocidades de transmisión de este protocolo oscilan entre 32Mbps y 134 Mbps aproximadamente, y se espera que lleguen al menos a los 310 Mbps en los próximos años, cuando se disponga de sistemas radioeléctricos que utilicen esquemas de modulación de orden superior.




En apoyo a la investigación de este proyecto participan más de 150 empresas bajo el nombre de *WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access)* buscando promover la adopción del protocolo *IEEE 802.16* por operadores de sistemas de acceso inalámbrico de banda ancha, certificar los niveles de interoperabilidad tanto en la red como en la celda, alcanzar aceptación mundial y promover el uso del sistema de acceso inalámbrico de banda ancha sobre los ya existentes.

WiMAX busca proveer sistemas de banda ancha inalámbricos fijos y eventualmente móviles, sin la necesidad de línea de vista directa a la estación base, con un radio típico que va desde los 3 a los 10 kilómetros, con una capacidad de más de 40 Mbps por canal para aplicaciones de acceso fijo y móvil. Este ancho de banda es suficiente para soportar simultáneamente cientos de negocios con una velocidad de conexión similar a un E1 (2.048 Mbps) y a miles de hogares con una velocidad de conexión semejante a *DSL (Digital Subscriber Line)*. Se espera que esta tecnología sea incorporada en computadoras portátiles y agendas electrónicas para el año 2006. [Error! No se encuentra el origen de la referencia.](#)

1.2 Definición del problema

La modulación es una parte importante en los sistemas inalámbricos como *WiMAX*, ya que con esto se puede controlar la cantidad de información a transmitir, su velocidad y el ancho de banda a utilizar. Para las tecnologías de banda ancha la modulación base es *QPSK (Quadrature Phase Shift Keying)*, siendo la más sencilla y la que logra mayores radios de celda, aunque una limitada velocidad de transmisión. En los sistemas basados en una modulación *QPSK* la capacidad de la celda puede ser potencialmente incrementada haciendo uso de la modulación, codificación y/o antenas adaptivas en la estación base. Mediante el uso de diferentes órdenes de modulación, *IEEE 802.16* permite el envío de mayor número de *bits* por símbolo logrando así tener altas velocidades de transmisión, rangos de alcance y alta eficiencia espectral. Sin embargo el uso de una técnica de modulación como *64-QAM (QAM, Quadrature Amplitude Modulation)* necesita de una buena relación señal a ruido (*SNR, Signal to Noise Ratio*) para evitar cualquier interferencia y así mantener un valor aceptable en la tasa de transmisión de errores (*BER, Bit Error Rate*).

Una técnica de modulación adaptiva permite a un sistema inalámbrico escoger el mayor orden de modulación dependiendo de las condiciones de interferencia en el canal. De esta forma cuando el usuario se encuentra lejos de la estación base y con mayores fuentes de ruido sólo es posible utilizar una modulación de bajo orden, en este caso *QPSK*, que permite gran alcance a velocidades de transmisión aproximadamente de 32Mbps con un ancho de banda de 20 MHz. Cuando el usuario se encuentra más cerca de la estación base es posible utilizar técnicas de modulación de mayor orden como es el caso de *16-QAM* o inclusive *64-QAM* mejorándose así la velocidad de transmisión hasta alcanzar valores de 134Mbps con un ancho de banda de 28 MHz.



Esta tesis forma parte del proyecto PAPIIT: “Técnicas de mejoramiento de capacidad de redes inalámbricas de banda ancha” y busca implementar la técnica de modulación adaptiva dentro de los estándares del protocolo *IEEE 802.16* detallando características como su arquitectura y operación. Utilizando el programa de simulación de redes *OPNET* que proporciona las herramientas necesarias para cumplir con nuestros objetivos descritos en la sección 1.4.

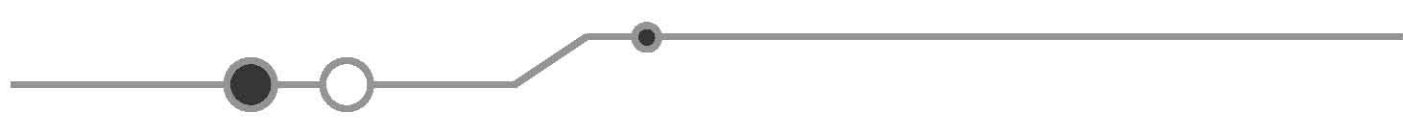
OPNET cuenta con distintas versiones dependiendo del mercado al que va dirigido, entre ellas se encuentran: *ITDecision GURU* usado en medianas y grandes empresas con redes de área amplia, el *Netbiz* usado por proveedores de servicio y vendedores de equipo en donde sus principales requerimientos incluyen completas soluciones de red y *OPNET Modeler (Software a utilizar)* un *software* de prototipos virtuales capaz de incrementar la productividad, la calidad de productos, evaluar el desempeño de cualquier red de comunicaciones ya sea fija o móvil, inalámbrica o cableada, así como el plantear distintos escenarios para implementar mejoras o visualizar los efectos de alguna modificación en ella.

1.3 Investigación realizada en el área de modelado de redes inalámbricas de banda ancha

Existe una gran cantidad de personas e instituciones realizando investigaciones en el campo de las comunicaciones de Banda Ancha Inalámbricas. En este caso nos enfocamos en aquellas dedicadas al estudio de técnicas de modulación adaptiva, a continuación presentamos tres investigaciones hechas por miembros de la IEEE (Institute of Electrical and Electronic Engineers) en el área.

La primera de ellas propone una nueva técnica de modulación adaptiva para la transmisión simultánea de voz y datos sobre canales con desvanecimiento. Utiliza la modulación *BPSK (Binary Phase Shift Keying)* en el canal de voz, y modulación *QAM* para el canal de datos. Para las condiciones favorables del canal, la mayor parte de la potencia se emplea para la transmisión de datos. Y el resto es usada para soportar la variación de la potencia en la transmisión de voz. Mientras va aumentando el desvanecimiento en el canal se reduce el *throughput* reubicándose la potencia restante para asegurar una transmisión de voz satisfactoria. El esquema se piensa para proporcionar una alta eficacia espectral para las comunicaciones de datos cumpliendo con los requerimientos de retardo para la transmisión de voz; **Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

Una segunda investigación propone una capa física que optimiza la utilización del canal permitiendo una adaptación dinámica del formato de modulación y código de corrección de errores (*FEC, Forward Error Correction*) en una comunicación entre usuarios. Si las características del canal varían a lo largo del tiempo las pérdidas por trayectoria causadas por la presencia o ausencia de obstáculos en el medio de comunicación pueden ser compensadas ajustando los parámetros de modulación y codificación.



El desarrollo de la capa física está basado en una portadora utilizando un ecualizador retroalimentado para compensar las pérdidas por multitrayectoria. Los formatos de las modulaciones usadas son BPSK, QPSK, 8 PSK, 16, 64 y 256 QAM tanto en el canal de subida como en el de bajada. **Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

Por último se trata de buscar una aplicación en software que haciendo uso de la modulación adaptiva maximice la transmisión de datos y a su vez disminuya la tasa de errores. En este caso se considera una falta de comunicación entre estación base y suscriptora en la que esta última tiene que detectar su tipo de modulación automáticamente. Esto se hace analizando métodos de reconocimiento de modulación basados en algoritmos hechos con funciones de densidad de probabilidad. **Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

1.4 Objetivos y contribuciones

Nuestro principal objetivo es implementar la técnica de modulación adaptiva en el protocolo *IEEE 802.16*, y así aumentar la velocidad de transmisión de cualquier sistema basado en este estándar sin disminuir su rango de alcance. De esta forma, a partir del análisis del protocolo *IEEE 802.16*, se buscarán las modificaciones necesarias en sus distintas capas de comunicación para lograr que el protocolo soporte la técnica de modulación adaptiva. Esto se hará basándonos en la relación señal a ruido (*SNR*) del canal, para así determinar que tipo de modulación es factible usar para la comunicación.

Una vez establecidas las modificaciones que se le realizarán al protocolo, se procederá a realizar los cambios necesarios en el modelo de simulación de *OPNET* ya desarrollado con base en el protocolo *IEEE 802.16*, para así verificar que el sistema funciona correctamente con la técnica de modulación adaptiva y corroborar que aumentó la velocidad de transmisión sin que se haya visto afectado el rango de alcance.

Ya implementado el modelo de simulación, se generarán diversos escenarios contemplando distintos tipos de tráfico (*VoIP (Voice over IP)*, video, datos, etc), número de usuarios, niveles de ruido, calidad de servicio, etc. Lo que permitirá obtener las estadísticas de parámetros diversos para evaluar el desempeño del sistema propuesto.

Entre los parámetros que se esperan obtener se encuentran:

- La distancia máxima que puede existir entre un usuario y la estación base.
- La velocidad de transmisión máxima y la velocidad promedio del sistema tomando en cuenta todos los tipos de modulación empleados.
- El retardo promedio en el envío de paquetes de información.

Con base en los resultados obtenidos se obtendrá el tipo de servicio que es posible implementar en la red *BWA*, para así ver los alcances que el uso de la técnica de modulación adaptiva permite.



1.5 Estructura de la tesis

La tesis está dividida en 7 capítulos, el primero muestra una breve introducción del tema a desarrollar.

En el capítulo 2 se presenta una descripción de la tecnología de Acceso inalámbrico de Banda ancha *BWA*, los protocolos y estándares que trabajan con ella, la arquitectura y características de las redes de comunicaciones en las cuales es usada, así como sus alcances y algunas de las tecnologías alternativas.

En el capítulo 3 se presenta una descripción general del protocolo *IEEE 802.16*, evaluando el proceso que sigue cada capa de comunicación dentro del protocolo, viendo el tipo de encabezado y la forma de transmitir la información. Se hace un análisis detallado de la capa *MAC (Media Access Control)* y la capa física del sistema, para así lograr la implementación de las técnicas de modulación adaptiva dentro del protocolo.

En el capítulo 4 se tratan las características de los distintos tipos de modulación más usados, sus ventajas de unas con respecto a las otras, la cantidad de *bits* por símbolo que necesitan y las condiciones bajo las cuales se pueden utilizar, tales como niveles de ruido, distancias e interferencias en el medio de transmisión.

En el capítulo 5 se proponen los cambios al protocolo para que pueda soportar la modulación adaptiva, especificando el tipo de información que deberá contener cada encabezado y el modo de conseguirla para lograr su implementación. Estos cambios se desarrollan tanto para la estación base como para la unidad del usuario.

Ya realizados los cambios necesarios al protocolo, se muestra la implementación al modelo de simulación de *OPNET* para observar la viabilidad de los cambios hechos al protocolo.

En el capítulo 6 haciendo uso del modelador de redes *OPNET*, se plantean y elaboran distintos escenarios con caracterizaciones distintas que nos permitan analizar el comportamiento del protocolo *IEEE 802.16* y optimizarlo a fin de obtener un modelo para entender su comportamiento.

Todas las caracterizaciones serán programadas en el simulador a fin de obtener resultados que puedan ser interpretados para la descripción del protocolo.

Finalmente en el capítulo 7 se exponen las conclusiones a las que se llegó después de haber evaluado los resultados y se plantean puntos de partida para el desarrollo de nuevos proyectos.



Análisis de Técnicas de Modulación Adaptiva
en Redes Inalámbricas de Banda Ancha
(IEEE 802.16, WiMAX)

CAPITULO 2

Descripción de la tecnología BWA



1.1 Introducción

BWA generalmente se refiere a sistemas de radio fijos usados principalmente para transportar servicios de banda ancha a los usuarios, establecimientos y redes centrales. El término de banda ancha, "*broadband*", se refiere a los rangos de velocidad de transmisión de información mayores a 1.5Mbps, aunque varias redes *BWA* soportan velocidades de transmisión significativamente más altas.

Las redes operan de forma transparente, de manera tal que los usuarios no se den cuenta que los servicios son entregados vía radio. Una típica red *BWA* fija soporta la conexión a varios establecimientos dentro de un rango que especifica el área de cobertura. Ésta provee una gran cantidad de ancho de banda que se comparte entre los usuarios. La red permite entregar el ancho de banda suficiente a varios usuarios que lo demanden con un alto nivel de eficiencia espectral. El reuso de frecuencias es muy utilizado.

La variedad de aplicaciones es muy amplia y evoluciona de forma rápida, incluye servicios de voz, datos y entretenimiento de varios tipos. Cada usuario puede requerir una mezcla distinta de servicios, esta mezcla puede cambiar rápidamente en lo que las conexiones son establecidas y terminadas. El flujo de tráfico puede ser unidireccional, asimétrico o simétrico además de ser cambiante con el tiempo. En algunos territorios, los sistemas que entregan estos servicios son conocidos como Sistemas Inalámbricos Multimedia (*MWS*, *Multimedia Wireless Systems*) para reflejar la convergencia entre los servicios tradicionales de telecomunicaciones y entretenimiento.

Estos sistemas de radio compiten con otros medios de transmisión inalámbricos y alámbricos para los servicios de conexión de primera milla. El uso de técnicas de radio o inalámbricas da como resultado numerosos beneficios, incluyendo rápido desarrollo y costos relativamente bajos.

1.2 Arquitectura del sistema

Los sistemas *BWA* fijos a menudo utilizan arquitecturas multipunto. El término multipunto incluye arquitecturas punto a multipunto (*PMP*, *point-to-multipoint*) y multipunto a multipunto (*MP-MP*, *multipoint-to-multipoint* también conocidas como redes *mesh*). El grupo de trabajo de la *IEEE 802.16* para *Broadband Wireless Access* está desarrollando estándares para sistemas *PMP* con estaciones base (*BS's*, *Base Stations*) y de abonados para establecer comunicación en una interfase específica de aire. Un estándar similar de *PMP* está siendo creado bajo el nombre de *HIPERACCESS* (*High Performance Radio Access*) **Error! No se encuentra el origen de la referencia.** por parte de la *ETSI*.

1.2.1 Sistemas PMP

Los sistemas *PMP* contienen a las estaciones base, las de abonados y en algunos casos repetidores. Las estaciones base usan antenas con un haz relativamente ancho, dividido en uno o varios sectores que proveen hasta 360° de cobertura con una o más antenas. Para alcanzar un área de cobertura completa se necesita más de una estación base. La conexión entre estaciones base no forma parte de la red *BWA* por sí misma, ya que es alcanzada mediante el uso de enlaces de radio, fibra óptica u otros medios equivalentes.

Los enlaces entre estaciones base pueden en algunas ocasiones usar parte de las mismas frecuencias destinadas para la red fija *BWA*. Enrutar la estación base apropiada es una función de la red central (*core network*). Las estaciones de abonados usan antenas direccionales, que apuntan hacia las estaciones base y comparten el uso de los canales de radio. Esto puede ser logrado por varios métodos, incluyendo la división en frecuencia, tiempo o códigos.

1.2.2 Sistemas MP (Mesh)

Los sistemas multipunto a multipunto tiene la misma funcionalidad que los punto a multipunto. Las estaciones base proveen conexiones a las redes centrales de un lado de la conexión de radio a otro lado de ésta. Una estación de abonados puede ser una terminal de radio o de forma típica un repetidor con acceso al tráfico local. El tráfico puede pasar a través de uno o más repetidores para alcanzar al abonado. Las antenas son generalmente direccionales con un ancho de haz estrecho y poseen medios para alinearlas de forma remota.

1.2.3 Componentes del sistema

Un sistema *BWA* incluye típicamente estaciones base (*BS*), estaciones de abonados (*SS*, *Subscriber Stations*) equipos terminal de abonados, equipo central de la red, enlaces inter-celdas, repetidores y posiblemente otro tipo de equipo.

En la figura 1 se muestra un sistema *BWA* fijo. Este diagrama indica la relación entre varios componentes del sistema *BWA*. Estos sistemas pueden ser más simples y contener sólo algunos elementos de la red mostrada.

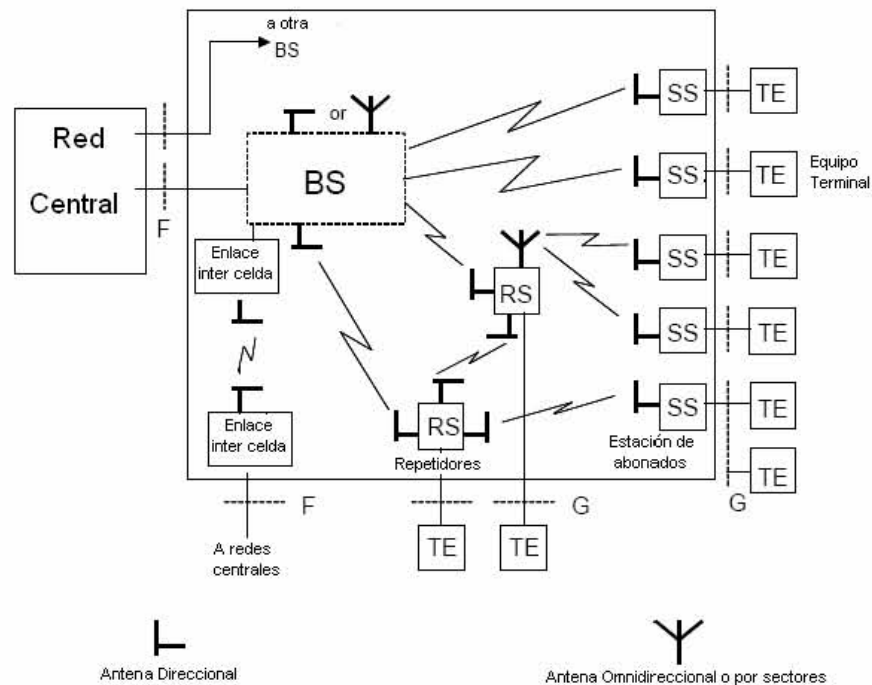


Figura 1 Sistema fijo BWA.

Los enlaces inter-celdas pueden usar el medio inalámbrico, fibra óptica o cobre para interconectar dos o más BS's, este tipo de enlaces pueden alcanzar velocidades en el rango de DS-3 (44.74 Mbps) y OC-3 (155.52 Mbps).

Pueden usarse antenas con distintos patrones de radiación. En general, una estación de abonados utiliza una antena altamente direccional. Algunos sistemas usan repetidores. En un sistema PMP, los repetidores generalmente son usados como una alternativa para extender la cobertura de una estación base más allá de su rango normal de transmisión. Un repetidor trabaja a las mismas frecuencias que una BS o a diferentes frecuencias. En un sistema MP-MP la mayoría de la estaciones son repetidores que también proveen conexión para los abonados locales.

1.2.4 Características del medio

La propagación electromagnética sobre rangos de frecuencia de 10-66GHz es relativamente no dispersiva, con atenuaciones ocasionales, aunque para un medio lluvioso se incrementa considerablemente conforme la frecuencia aumenta. La absorción de energía por parte de estructuras o terrenos es severa. En sistemas de radio bajo estas frecuencias la interferencia y el ruido es limitado y se tienen rangos operacionales de algunos kilómetros debido a las pérdidas en el espacio libre, además los sistemas son vulnerables a la interferencia por parte de las emisiones lejanas a su rango de operación.

1.2.5 Formas de interferencia

La interferencia puede ser clasificada en dos grandes categorías co-canal y fuera de canal.

En la interferencia co-canal el ancho de banda de la señal que está interfiriendo puede ser mayor o menor que el de la señal que esperamos, para el primer caso, sólo una porción de su potencia caerá dentro del filtro que recibe la señal esperada.

La interferencia fuera de canal o en un canal adyacente se produce cuando la contribución de densidad espectral de potencia emplea una determinada banda de frecuencias adyacentes que se superpone al espectro de la señal esperada.

La interferencia puede generarse en varias trayectorias, por ejemplo:

- *BS-BS*.- En la cual cada antena de las estaciones se encuentra dentro del lóbulo principal del patrón de radiación de la otra antena.
- *SS-BS*.- Como en el caso anterior las antenas solapan sus lóbulos principales. La interferencia proviene de una antena de alguna SS, ya sea de algún lóbulo de radiación lateral o posterior.
- *BS-BS*.- En este caso la interferencia por parte del lóbulo principal afecta el lóbulo lateral o posterior de la antena víctima de la interferencia.
- *BS-BS*.- La interferencia se produce por el lóbulo lateral de una antena que afecta a otro lóbulo lateral o de un lóbulo posterior a un lóbulo posterior.
- *SS-BS*.- La interferencia afecta a los lóbulos laterales o posteriores de la *BS*.

1.3 Estándares

Los estándares y las arquitecturas de acceso de radio de banda ancha son temas de interés para Europa, Japón y los Estados Unidos. Dependiendo de la región y país se usan diferentes términos cuando se refieren a estos estándares. En Europa, éstos son referidos como *BRAN (Broadband Radio Access Networks)*, en los Estados Unidos, como *LMDS (Local Multipoint Distribution Service)*; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, *IEEE 802.16* y *BWA*, además de otros términos. En Canadá y otros países, son referidos como Sistemas de Comunicación Multipunto Locales (*LMCS, Local Multipoint Communication Systems*); **Error! No se encuentra el origen de la referencia.** Sus aplicaciones, sin embargo, son variadas: fijas y móviles, locales y de área ancha, e incluyen aplicaciones prometedoras como:

- Acceso a Internet de alta velocidad.
- Dos maneras de comunicación de datos (peer-peer o cliente/servidor).
- Telefonía pública o privada.
- Dos tipos de servicio multimedia tales como videoconferencias y video comercio.
- Video *broadcast*.

1.3.1 ETSI-BRAN

La familia de estándares *BRAN* incluyen: *HIPERLAN* (*High Performance Radio Local Area Networks*) Tipo 1 (*LANs* inalámbricas de alta velocidad), *HIPERLAN* Tipo 2 (Acceso inalámbrico de rango corto a redes *IP* (*Internet Protocol*), *ATM* (*Asynchronous Transfer Mode*) y *UMTS* (*Universal Mobile Telecommunications System*) ambos operando en la banda de 5 GHz, *HIPERACCESS* (Acceso inalámbrico fijo de banda ancha punto a multipunto) e *HIPERLINK* (Interconexión de banda ancha inalámbrica) operando en la banda de 17 GHz. Esto se describe en la figura 2 en donde se indican las bandas de frecuencia en la que operan y la velocidad de transmisión en la interfase de aire.

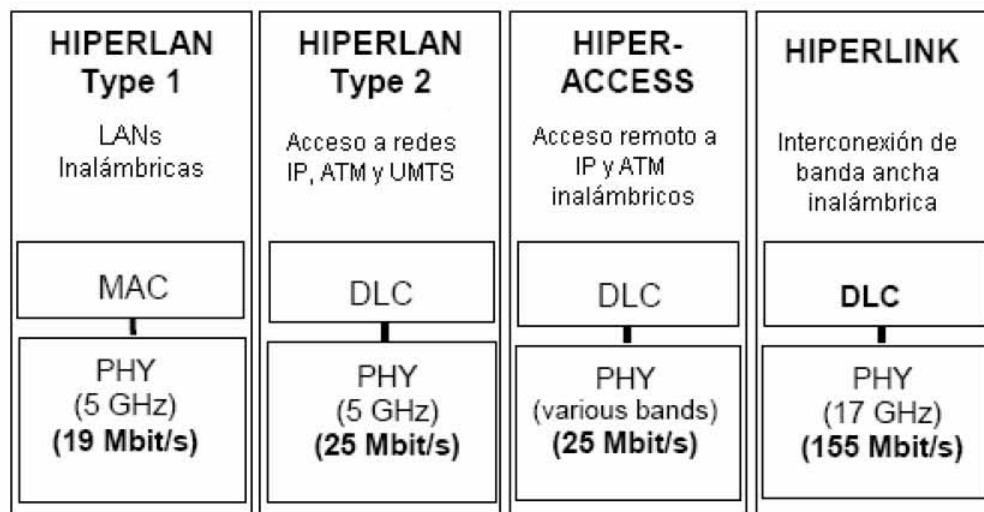


Figura 2 Estándares BRAN.

El acceso de banda ancha consiste en *HIPERACCESS*, *HIPERLAN* e *HIPERLINK* (High Performance Radio Link), como se muestra en la figura 3. En las definiciones de la ETSI, se indica una topología jerárquica distinta, en ella es posible que las LAN's inalámbricas se conecten directamente con cualquier parte de la red central o de las terminales *HIPERACCESS*.

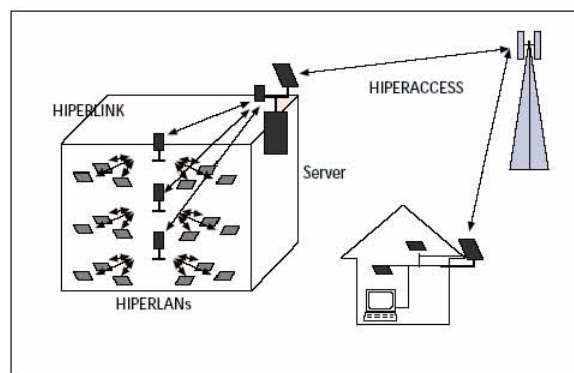


Figura 3 Acceso inalámbrico de banda ancha.

Los sistemas *HIPERACCESS* conectados principalmente a residencias, oficinas, y pequeñas y medianas empresas, tienen como premisa el tener acceso a una gran variedad de servicios de telecomunicaciones tales como voz, datos, y servicios multimedia con velocidades de transmisión de los 2 Mbps a los 25Mbps. Los sistemas *HIPERACCESS* serán principalmente usados como redes de acceso remoto de banda ancha. El espectro puede ser en el rango de 2-40 GHz.

La segunda aplicación a la cual se hace referencia, *HIPERLAN*, provee acceso local con una calidad de servicio controlada para aplicaciones de banda ancha a computadoras portátiles, usando principalmente la banda de 5 GHz.

La tercera aplicación de *BRAN* es llamada *HIPERLINK*, y es principalmente una interconexión red a red que podrá soportar una variedad de protocolos y todos los escenarios posibles de tráfico. Esta aplicación podrá ser usada con velocidades de transmisión arriba de 155 Mbps en partes del espectro de 17 GHz.

1.3.2 IEEE 802.16

El estándar *IEEE 802.16* cubre más aspectos que *HIPERACCESS*, incluyendo Redes *WMAN* (*Wireless Metropolitan Area Network*) y *HUMAN* (*High-Speed Unlicensed Metropolitan Area Networks*); **Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

El estándar inicial 802.16 opera en la banda de frecuencias de 10 a 66 GHz. En estas frecuencias, *IEEE 802.16*, requiere de una línea de vista directa entre los transmisores y receptores. Esto reduce la distorsión multitrayectoria, lo que aumenta el ancho de banda. Teóricamente *IEEE 802.16* puede proveer velocidades de transmisión arriba de 75 Mbps en los canales *downlink* y *uplink*. Los proveedores pueden usar múltiples canales para una transmisión simple que provee velocidades arriba de los 350 Mbps.

IEEE 802.16 divide su *MAC* en diferentes subcapas que soportan diferentes tecnologías de transporte, incluyendo *IPv4*, *IPv6*, *Ethernet* y *ATM*.

El grupo de trabajo de *IEEE 802.16* ha adoptado diferentes extensiones a la tecnología básica del protocolo; **Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

La *IEEE* ha desarrollado 802.16a para el uso de bandas de frecuencias en el rango de 2 a 11 GHz. En las frecuencias bajas, las señales pueden penetrar barreras y no se requiere una línea de vista entre el transmisor y la antena. El estándar *IEEE 802.16a* soporta un desarrollo tipo malla, en donde una *BS* puede pasar una comunicación simple a otra *BS* extendiendo así el rango de funcionamiento del protocolo.

La extensión *IEEE 802.16b* incrementa el espectro y tecnología que puede usarse en las bandas de frecuencia de 5 a 6 GHz y provee calidad de servicio (*QoS*). El proveer de calidad de servicio asegura la prioridad de transmisión para voz y video en tiempo real y ofrece diferentes niveles de servicio a diferentes tipos de tráfico.

La *IEEE 802.16c* representa para la banda de 10 a 66 GHz el perfil de sistema que estandariza más detalles de la tecnología. Esto asegura mayor consistencia para la implementación e interoperabilidad del sistema.

En *IEEE 802.16d* se incluyen pequeños detalles que ayudan a mejorar la extensión 802.16a. Esta extensión también crea los perfiles del sistema para lograr que los dispositivos basados en 802.16a sean probados.

La tecnología basada en *IEEE 802.16e* estandarizará la intercomunicación entre las estaciones base fijas y los dispositivos móviles. *IEEE 802.16e* habilitará las funciones de *hand-off* de alta velocidad necesarias para la comunicación con usuarios moviéndose sobre automóviles a altas velocidades.

La Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) inició un grupo de trabajo llamado *ITU JRG 8A-9B* para encargarse de la estandarización de los sistemas *BWA*. Este grupo recibe información por parte de *BRAN* y de *IEEE 802.16* y trata de desarrollar una conciencia global sobre esta tecnología en base al punto de vista y función de la UIT.

1.4 Tecnologías Alternativas

Wi-Fi (Wireless Fidelity), *3G (Third Generation)* y *UWB (Ultra Wideband)*, al igual que *WiMAX* son tecnologías que permiten una comunicación inalámbrica a gran velocidad.

1.4.1 Wi-Fi

Es la primera tecnología inalámbrica de gran velocidad que logró un amplio desarrollo, este desarrollo fue notable por el número de *hotspots* alrededor del mundo, incluyendo aquellos para hogares, oficinas, cafés, hoteles y aeropuertos. Esta tecnología es limitada principalmente por su zona de cobertura, ya que la conexión a alta velocidad sólo se puede brindar dentro de una distancia limitada.

1.4.2 3G.

Es una especificación de la UIT para comunicaciones inalámbricas de gran velocidad. Esta comunicación inalámbrica es compatible con *GSM (Global System for Mobile Communications)*, *TDMA (Time-Division Multiple Access)* y *CDMA (Code Division Multiple Access)*. Los servicios celulares de tercera generación prometen brindar una gran variedad de servicios de voz y video. La tercera generación crea un amplio rango de cobertura para acceso de datos a través de una amplia área geográfica, proveyendo la máxima movilidad para comunicaciones de voz y conectividad a Internet.

Los dispositivos que se están optimizando para soportar dicha tecnología comienzan a invadir el mercado, entre ellos se encuentran teléfonos celulares que pueden ofrecer conferencias de video y *PDA's (Personal Digital Assistant)* capaces de reproducir *DVD (Digital Versatile Disc)*.

Esta tecnología ha sido diseñada para brindar la máxima movilidad y está dirigida a aquellos dispositivos cuya función principal son los servicios de voz con algunas aplicaciones adicionales de datos como complementos a dichos servicios.

1.4.3 UWB

Es una tecnología futura inalámbrica diseñada para redes *WPAN's (Wide Personal Area Network)* con altas velocidades en zonas de cobertura pequeña.

También podrá utilizarse para permitir el acceso inalámbrico *USB (Universal Serial Bus)*, para conectar la computadora con sus equipos periféricos y otros artículos electrónicos.

En la tabla 1 se enlistan las distintas tecnologías con sus respectivos estándares y sus características principales, tales como: *throughput*, cobertura y frecuencia.

Tecnología	Estándar	Uso	Throughput	Cobertura	Frecuencia
UWB	802.15a	WPAN	110-480Mbps	>9m	7.5GHz
Wi-Fi	802.11a	WLAN	> 54Mbps	>91m	5GHz
Wi-Fi	802.11b	WLAN	>11Mbps	>91m	2.4GHz
Wi-Fi	802.11g	WLAN	>54Mbps	>91m	2.4GHz
WiMAX	802.16d	WMAN	>75Mbps (BW=20MHz)	6-10km	<11GHz
WiMAX	802.16e	WMAN móvil	>30Mbps (BW=10MHz)	2-5km	2-6GHz
WCDMA/ UMTS	3G	WWAN	>2Mbps	2-8km	1800,1900, 2100MHz
CDMA2000 1 x EV-DO	3G	WWAN	>2.4Mbps	2-8km	400,800,900, 1700,1800, 1900,2100MHz
Edge	2.5G	WWAN	>348kbps	2-8km	1900MHz

Tabla 1 Tecnologías inalámbricas; **Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

1.5 Conclusiones

Una tecnología como *BWA* permite a los usuarios una velocidad de transmisión apropiada para varias aplicaciones, ya que al disponer de un gran ancho de banda se pueden esperar mejores resultados en las transmisiones de voz, video y datos.

Lo importante de esta tecnología es que no está destinada a un sólo grupo poblacional, sino que dependiendo de las necesidades de los usuarios, ésta se adapta para dar servicio a hogares, oficinas, empresas, restaurantes, aeropuertos, etc.

Si bien las tecnologías de Acceso Inalámbrico de Banda Ancha aún se encuentran en crecimiento, se les ha visto un futuro muy prometedor en el mercado, donde continuamente se sigue trabajando para mejorar los estándares que las rigen y así brindar un servicio más completo que de mayor satisfacción a sus clientes.

Algunas de las tecnologías que entran en esta clasificación aún no están totalmente desarrolladas, tal es el caso de *WiMAX* o de los servicios que se presentan en la tercera generación, el desarrollo de cada tecnología depende en gran medida de sus patrocinadores y del lugar en donde se le está dando difusión, por ejemplo en *U. S. A.* ya se habla de servicios de cuarta generación mientras que en México la tercera generación está apenas siendo presentada a los usuarios por algunas compañías proveedoras de servicios.

De esta forma se puede ver que los servicios de banda ancha son algo que todavía promete generar nuevas y múltiples alternativas de servicios por un largo periodo de tiempo.

Análisis de Técnicas de Modulación Adaptiva
en Redes Inalámbricas de Banda Ancha
(IEEE 802.16, WiMAX)

CAPITULO 3

Descripción del protocolo de comunicaciones IEEE 802.16



1.1 Introducción

La definición de los servicios y características soportadas en el protocolo *IEEE 802.16* están establecidas mediante las especificaciones correspondientes a las capas de acceso al medio (*MAC*) y física. Establece mecanismos de calidad de servicio para el transporte de información diversa con retrasos mínimos cuando así se requiera y el máximo desempeño en la distribución de ancho de banda para cada una de las estaciones transmisoras.

El protocolo usa el mecanismo *request-grant*, en el que existe un envío periódico de mensajes de control desde las estaciones suscriptoras (*SS's*) y la estación base (*BS*) en la que se determinan las transmisiones que se realizarán en un tiempo futuro. El mecanismo *request-grant* se basa en el envío de peticiones de ancho de banda por las estaciones suscriptoras, en un espacio de tiempo predeterminado llamado región de contención. Al recibir estas peticiones la estación base concede oportunidades exclusivas de transmisión de información asignadas a alguna conexión específica. Este sistema permite estabilidad y eficiencia en la transmisión al existir una región destinada únicamente a peticiones y otra a la transmisión de la información.

Debido a la arquitectura punto–multipunto usada, la estación base transmite básicamente una señal multiplexada por división de tiempo (*TDM, Time Division Multiplexing*), con estaciones suscriptoras situadas individualmente en ranuras (*slots*) de tiempo seriadas. El acceso en el canal de subida se hace mediante *TDMA*. El estándar *IEEE 802.16* en su sección “a” permite la conexión en la banda de frecuencia para 10-66 GHz donde se requiere línea de vista; así como el uso de la banda de 2-11 GHz, en donde no se requiere de línea de vista para la comunicación. Existen tres especificaciones en la extensión 802.16a para las interfaces de aire en la banda de 2-11 GHz:

- En la primera se usa un formato con una modulación simple llamada *WirelessMAN-SC2*.
- En la segunda se usa multiplexación ortogonal por división de frecuencia con 256 puntos de transformación llamada *WirelessMAN-OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing)*. El acceso es por *TDMA* y es la interfase que se emplearía para las bandas no licenciadas.
- También se plantea el uso de acceso ortogonal múltiple por división de frecuencia (*OFDMA, Orthogonal Frequency Division Multiplexing Access*) con 2048 puntos de transformación.

Entre la capa física y la *MAC* existe una subcapa de convergencia de transmisión. Esta capa lleva a cabo la transformación de *MAC PDUs (Protocol Data Units)* en bloques fijos. Esto permite la sincronización con el siguiente *MAC PDU* en el caso de que el paquete anterior hubiera tenido errores irrecuperables. Sin esta capa, la estación suscriptora o la estación base pueden perder todo el resto de la transmisión cuando se ha perdido un *bit*. Esta capa es llamada capa *MAC IEEE 802.16*.

La proporción de servicios de conectividad es posible mediante conexiones realizadas entre la estación base y la estación suscriptor. Dichas conexiones se identifican mediante el *CID (Connection Identifier)*, que consta de 16 *bits*. Éste funciona como un apuntador hacia el destino de cada conexión y también proporciona información acerca del contexto en la que se realiza. Cada solicitud de ancho de banda que realizan las SSs está basada en el *CID*, por lo que el ancho de banda disponible será distinto para conexiones diferentes.

1.2 Formatos de los paquetes de transmisión MAC

El transporte de la información a través de la capa *MAC IEEE 802.16* se realiza mediante la adición de encabezados de control de 6 *bytes*. Existen dos tipos de encabezados: Genéricos y de Solicitud de ancho de Banda.

1.2.1 Encabezado genérico

El encabezado genérico es usado para paquetes que incluyen información de usuario o de control. Puede contener información indicando que se ha agregado un subencabezado, para el caso de los paquetes de control, o bien para cuando se emplean las funciones de fragmentación, concatenación o empaquetamiento, descritas más adelante. Su formato se muestra en la figura 4:

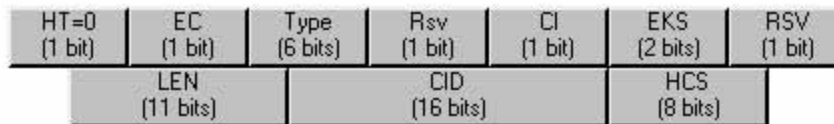


Figura 1 Formato del encabezado MAC genérico.

En donde:

- *HT (Header Type)*.- Con un valor de cero indicando que es de tipo Genérico
- *EC (Encryption Control)*.- Indica si el encapsulado se ha encriptado.
- *Type* .- Indica el tipo de carga útil incluida en el paquete.
- *Rsv y RSV (Reserved)*.- Reservados.
- *CI (CRC Indicador)*.- Indica si se ha empleado la Verificación de Redundancia Cíclica (*CRC, Cyclic Redundancy Check*) para el control de errores.
- *EKS (Encryption Key Sequence)*.- Índice de la llave de cifrado y del vector de inicialización.
- *LEN (Length)*.- Longitud del paquete con encabezado en *bytes*.
- *CID (Connection Identifier)*.- Empleado para identificar la conexión generadora del paquete.

- *HCS (Header Check Sequence)*.- Empleada para identificar errores en el encabezado.

1.2.2 Encabezado de solicitud de ancho de banda

Este encabezado es exclusivo para las peticiones de oportunidades de transmisión en el canal de subida. Su formato se muestra en la figura 5.

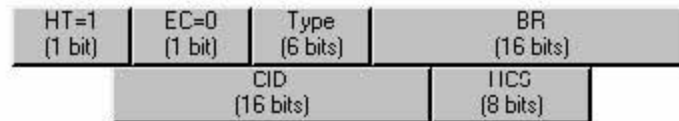


Figura 2 Formato del encabezado MAC de Solicitud de Ancho de Banda.

En donde:

- *HT (Header Type)*.- Con un valor de 1 indicando que es de tipo de Asignación de Ancho de Banda.
- *EC (Encryption Control)*.- Debe tener un valor de 0, ya que no es posible cifrar los paquetes de este tipo.
- *Type*.- Indica el tipo de solicitud que se realiza (incremental o agregada).
- *BR (Bytes requested)*.- Tamaño total de la información que desea transmitirse.
- *CID (Connection Identifier)*.- Conexión que solicita la asignación de ancho de banda.
- *HCS (Header Check Sequence)*.- Empleada para identificar errores en el encabezado.

1.3 Fragmentación, concatenación y empaquetamiento

La capa *IEEE 802.16 MAC* soporta varios protocolos de capas superiores tales como *ATM* o *IP*. Cada paquete de datos proveniente de su correspondiente subcapa de convergencia, *MAC SDUs (Service Data Units)*, son empaquetados de acuerdo al formato *MAC PDU*, antes de ser transportados sobre una o más conexiones de acuerdo con el protocolo *MAC*. Después de haber sido enviados por la interfaz de aire, los *MAC PDUs* son reconstruidos para formar el *MAC SDU* original, de esta forma las modificaciones realizadas por el protocolo de la capa *IEEE 802.16 MAC* son transparentes para el receptor.

Para optimizar el uso del canal inalámbrico, se han incluido funciones que disminuyen dinámicamente la sobrecarga agregada en las transmisiones. Se basan en la manipulación de la carga útil para conformar paquetes de longitud controlada. Estas funciones son las siguientes:

- Fragmentación. Los paquetes que exceden la longitud máxima disponible para transmitir pueden ser divididos en otros más pequeños. La capacidad para realizar fragmentaciones se indica al momento de establecer la conexión.
- Concatenación. Diversos paquetes pueden enviarse en una sola transmisión mediante la identificación de la conexión para cada uno de ellos.
- Empaquetamiento. Se emplea para enviar en un solo paquete de información de diversas fuentes provenientes de capas superiores. Está soportado el empaquetamiento de paquetes de longitud fija o variable.

La fragmentación es el proceso en el cual un *MAC SDU* es dividido en uno o más fragmentos *MAC SDUs*. La diferencia entre la concatenación y el empaquetamiento radica en el origen de los paquetes. En el primer caso, se tratan todos de *PDU*s, generados en la subcapa *MAC* e identificables por su identificador de conexión, mientras que el empaquetamiento opera sobre unidades de servicio de datos (*SDUs*), provenientes de la capa superior. Es decir, el empaquetamiento es el proceso en el cual múltiples *MAC SDUs* son empaquetados en un simple *MAC PDU*.

1.4 Paquetes de control MAC

Los mensajes de control cuentan con un campo que especifica el tipo de mensaje de control y se envían dentro de la carga útil de un *MAC PDU*. Entre los principales mensajes de control se encuentran:

□ DCD (Downlink Channel Descriptor)

Este mensaje es enviado periódicamente por la Estación Base y especifica las características del canal físico de transmisión, tales como: número de canal de radio frecuencia, tasa de transmisión de símbolos, número de configuraciones activas, inicio de la región activa en la trama y fin de la región activa en la trama.

□ UCD (Uplink Channel Descriptor)

Es transmitido periódicamente por la Estación Base, indica las características de un canal ascendente, se transmite uno por cada canal asociado al descendente. Entre la principal información que incluye se encuentra: tipo de modulación (*QPSK*, *16-QAM* o *64-QAM*), longitud de preámbulo, codificación, *bytes* de información, *bytes* de paridad.

□ DL-MAP (Downlink Access Definition)

Este mensaje define los parámetros para el acceso a la información en el canal descendente. Incluye la siguiente información: sincronización física, contador *DCD*, identificador de la estación base, número de elementos de información.

□ UL-MAP (Uplink Access Definition)

Una vez que el proceso de inicialización y registro se han completado, una estación suscriptora puede crear una o más conexiones sobre las cuales puede mandar datos a la estación base.

Las estaciones suscriptoras solicitan oportunidades de transmisión en el canal *UL*. La estación base recolecta estas peticiones y determina el número de *slots* que cada estación suscriptora tendrá para transmitir en el canal de subida. Esta información es enviada con un *broadcast* en el canal *DL* por la estación base usando un mensaje *UL-MAP* al inicio de cada trama *DL*, como se ilustra en la figura 6.

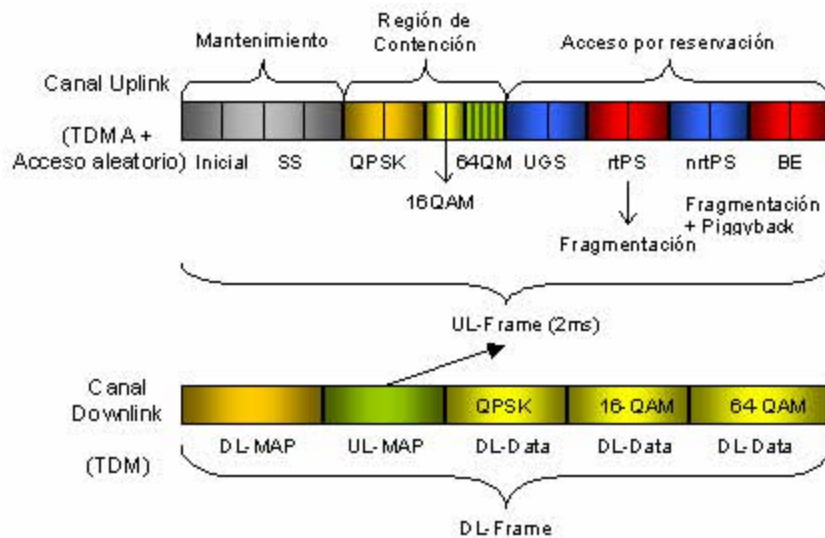


Figura 3 Estructura de los canales UL y DL.

El mensaje *UL-MAP* proporciona la información relativa al acceso del canal ascendente. Contiene la siguiente información: identificador del canal ascendente, contador *UCD*, número de elementos, tiempo de inicio de asignación (*Alloc Start Time*), elementos de información de mapa (*MAP IE, Information Elements*).

Los Elementos de Información (*IE*) son campos que definen la asignación del ancho de banda para el canal ascendente. En cada *UL-MAP* debe estar incluido al menos un *IE*, que indica el fin de la asignación de ancho de banda. Su orden es estrictamente cronológico consta de la siguiente información:

- *CID*.- Que indica si la asignación del *IE* se ha hecho hacia una dirección *Unicast*, *Multicast* o *Broadcast*.

- *UIUC (Uplink Interval Usage Code)*.- Establece el tipo de uso que tiene el ancho de banda asignado, como por ejemplo: Reservado, Solicitud, Mantenimiento, Reservación de flujo de datos, *IE* nulo o vacío.
 - *Offset*.- Indicador del intervalo en *slots*.
- Mensaje de solicitud de ranging (RNG-REQ) y respuesta del ranging (RNG-RSP)

El mensaje de Solicitud de *Ranging* es transmitido por la Estación Suscriptora durante la inicialización de la conexión, o bien periódicamente cuando lo indica la estación base, con la finalidad de realizar modificaciones en la potencia de transmisión y en los perfiles de transmisión descendentes.

Al recibir el mensaje *RNG-REQ*, la estación base contesta con *RNG-RSP*, el cual incluye información de ajuste de sincronía, potencia y frecuencia, así como del estado del proceso de *Ranging*. También puede incluir los *CID* Básico y Primario así como la dirección *MAC* de la estación suscriptora durante el *Ranging* Inicial.

- Mensaje de solicitud de registro (REG-REQ) y Respuesta de registro (REG-RSP)

El mensaje *REG-REQ* es enviado por la Estación Suscriptora durante la inicialización del servicio con la finalidad de informar a la Estación Base sobre sus capacidades particulares como el número de *CIDs* que puede soportar, así como la Secuencia Numérica de la Llave *HMAC (Hashed Message Authentication Code)*.

En respuesta, la Estación Base transmitirá el mensaje *REG-RSP* que indica si la autenticación del mensaje fue exitosa o no, el *CID* para la conexión secundaria con la estación suscriptora, la versión *MAC* empleada, el código *HMAC*, así como una enumeración de las capacidades de la estación suscriptora. Lo anterior sirve para confirmar el soporte de la estación base para las capacidades que ha informado la estación suscriptora. En la figura 7 se muestra el diagrama de flujo de mensajes de control utilizados para la comunicación entre la Estación Base y la Estación Suscriptora.

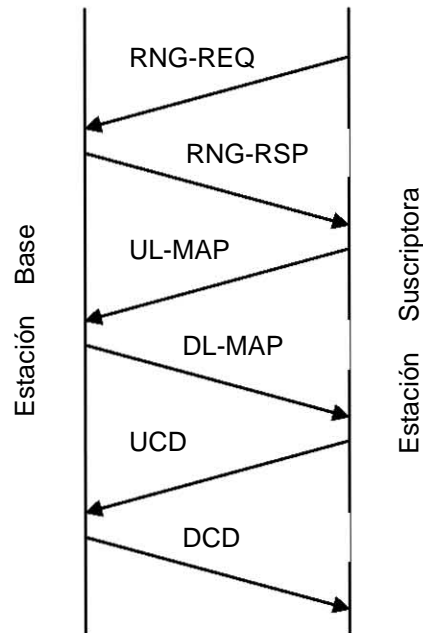


Figura 4 Descripción de los mensajes entre BS y SS.

1.5 Servicio de programación de transmisión ascendente

Para hacer que se puedan soportar diversos tipos de aplicaciones sobre la red, el protocolo *IEEE 802.16* define cuatro tipos de servicios buscando que los procesos de solicitud y asignación de ancho de banda sean eficientes, dependiendo del tipo de tráfico generado por la estación suscriptora. Los servicios son:

UGS (Unsolicited Grant Service).- Este servicio es orientado al soporte de información de servicios en tiempo real que generan paquetes de datos de longitud fija en intervalos periódicos de tiempo, tales como: T1/E1, Voz sobre *IP (VoIP)* o videoconferencias.

rtPS (Real-Time Polling Service).- Este servicio está orientado para el soporte de servicios de tiempo real que generan paquetes de datos de longitud variable en periodos constantes de tiempo, tales como: video con formato *MPEG*.

nrtPS (Non Real-Time Polling Service).- Este servicio es parecido a *rtPS*, sin embargo la consulta se realiza en espacios de tiempo más grandes y no necesariamente son periódicos. Este servicio se enfoca a aplicaciones que no requieran que sean en tiempo real pero que si necesitan un gran ancho de banda, un ejemplo es la transmisión robusta de datos vía *FTP* o aplicaciones de juegos a través de Internet.

BE (Best Effort).- Este tipo de servicio es para la transmisión de tráfico de Internet estándar en donde no son necesarias garantías de velocidad de transmisión o retraso.

Para la caracterización de los servicios de programación se utilizan tres funciones:

1. *PiggyBack Request*.- Son solicitudes de ancho de banda incluidas en los encabezados de los paquetes enviados por las estaciones suscriptoras durante una transmisión garantizada, así si la estación suscriptora tiene paquetes que enviar, ya no utiliza la región de contención para hacer sus peticiones, sino que los envía en el encabezado de la información de la cual ya recibió asignación de ancho de banda. Este proceso no es permitido para usuarios con servicio UGS.
2. *Bandwidth Stealing*.- Es el empleo de una porción del ancho de banda asignado a una estación suscriptora para solicitudes adicionales. Este proceso se realiza cuando una estación suscriptora cuenta con oportunidades garantizadas para la transmisión de paquetes. En este caso, es posible que parte de estas oportunidades, destinadas para el envío de datos, se use para realizar solicitudes adicionales de ancho de banda. Este proceso no es permitido para usuarios con servicio UGS.
3. *Polling*.- Es el proceso mediante el cual la Estación Base destina a una estación suscriptora o una conexión oportunidades específicas para el envío de solicitudes de ancho de banda. Es decir, la estación Base asigna regularmente algunos *minislots* que la estación suscriptora puede usar para hacer solicitudes de ancho de banda.

1.6 Solicitud y asignación de ancho de banda

Para que una estación suscriptora pueda tener acceso al canal inalámbrico participa en un mecanismo de solicitud a través del cual indica a la estación base sus requerimientos de ancho de banda de acuerdo con el tipo de tráfico generado.

El mecanismo mediante el cual la estación suscriptora le hace saber sus requerimientos específicos de ancho de banda a la estación base se conoce como *DAMA (Demand Assigned Multiple Access)*. Cada estación suscriptora envía mensajes para poder reservar *minislots* en el canal ascendente (*UL*); las oportunidades de transmisión están limitadas por la cantidad de tráfico existente en la red y la forma en la que se encuentran establecidos los parámetros de calidad de servicio (*QoS*).

Las estaciones suscriptoras realizan sus peticiones de los siguientes modos:

SOLICITUDES (*REQUEST*): se trata de mensajes enviados de la estación suscriptora a la estación base, especificando el ancho de banda requerido en *bytes* sin tomar en cuenta el encabezado de la capa física. Su transmisión puede ser durante el periodo de contención o en algún otro que ha sido reservado para la estación suscriptora en cuestión.

Cuando este tipo de solicitudes utiliza el espacio reservado lo hace mediante los subencabezados de solicitudes *piggyback*, ya que permiten optimizar el uso del canal reduciendo las colisiones provocadas por el envío múltiple de solicitudes de ancho de banda.

CONSULTA (*POLLING*): a través de ella la estación base establece periodos para que las estaciones suscriptoras transmitan en el *UL* enviando sus solicitudes de ancho de banda; dichos periodos se encuentran establecidos en los *IE* dentro de cada mapa.

Las oportunidades de transmisión pueden dirigirse únicamente a una estación base (*Unicast*) o a un grupo de ellas (*Multicast*). Si se trata de un grupo de estaciones base todas tendrán que contender por el envío de sus mensajes.

Para el caso de una consulta *Unicast* la estación base incluye en el mapa descriptor del canal ascendente una oportunidad exclusiva para la estación suscriptora que podrá ser empleada únicamente para la solicitud de ancho de banda.

Para el caso en el que la estación base no cuenta con el ancho de banda suficiente para proporcionarlo a todas las estaciones suscriptoras a las que atiende, utiliza consultas *Multicast*; esto se refiere a mandar oportunidades de solicitud de ancho de banda sólo a un grupo de estaciones suscriptoras que quedan determinadas porque dichas oportunidades se especifican en sus mapas de canal ascendente.

Ya que este grupo de estaciones están expuestas a colisiones utilizan el algoritmo exponencial *backoff* tanto para determinar el *minislot* a utilizar para enviar su solicitud como para reprogramarla en caso de que haya existido una colisión.

Debido a las colisiones, puede suceder que una estación suscriptora agote su número máximo de posibilidades para enviar su petición, considerándola fracasada. El éxito se obtiene cuando en un mapa del canal ascendente se incluye una reservación para la estación suscriptora en cuestión.

1.7 Resolución de colisiones

Una colisión se produce cuando al menos dos estaciones tratan de transmitir información al mismo tiempo, es decir en el mismo *minislot*. Al ocurrir una colisión toda la información que se pretendía enviar, se pierde al mismo tiempo que se desperdicia ancho de banda en el canal ascendente.

La estación base especifica a través de los mapas descriptores del canal ascendente las regiones que están sujetas a la ocurrencia de colisiones. Se trata de los intervalos de mantenimiento inicial y de solicitud, cada uno establecido mediante los elementos de información correspondientes.

Cuando ocurre una colisión las estaciones suscriptoras involucradas son las responsables de aplicar el algoritmo exponencial *backoff* binario truncado cuya operación se basa en los parámetros de ventana de *backoff* inicial y final definidos en los mensajes *UCD*.

El mecanismo de resolución de colisiones mediante el algoritmo exponencial *backoff* binario truncado es el siguiente:

Al generarse una colisión, la estación suscriptora involucrada genera un número aleatorio entre cero y el exponente binario indicado por la ventana de *backoff* inicial; es decir, si dicho parámetro tiene un valor de 3, la estación suscriptora obtendrá un valor aleatorio entre 0 y 8.

La estación suscriptora esperará la cantidad de *minislots* indicados por el número aleatorio generado anteriormente. Si el mapa actual no cuenta con esa cantidad de *minislots* tendrá que esperar el número de mapas en los cuales se acumulen la cantidad total de *minislots*.

Al transcurrir todos los *minislots* de espera, la estación suscriptora intenta retransmitir, sin estar exenta de una nueva colisión.

La estación suscriptora determina que la transmisión fue exitosa cuando:

- En el caso de las contenciones para la solicitud de asignación de ancho de banda, reciba un mapa que incluya la Reservación correspondiente al *CID* para el cual se hizo la solicitud, dentro de un periodo máximo definido mediante el mensaje Descriptor de Canal Ascendente (*UCD*).
- Reciba el mensaje *RNG-RSP* que corresponde a la respuesta de la estación base cuando la estación suscriptora ha enviado un mensaje *RNG-REQ* durante el periodo de Mantenimiento Inicial.

Al cumplirse alguna de las condiciones anteriores la estación suscriptora suspende el algoritmo exponencial *backoff* e inicia la transmisión de su información.

Si llegara a ocurrir que el tiempo de espera se agote antes de poder retransmitir, entonces se aplica nuevamente el algoritmo exponencial sólo que el valor de ventana deberá ser incrementado en uno y por consiguiente el rango de *minislots* a esperar también se incrementará al doble de su valor anterior.

La estación suscriptora repetirá el proceso anterior tantas veces como sea necesario o hasta llegar al valor final de la ventana.

1.8 Ingreso a la red e inicialización

- 1) Se realiza la búsqueda del canal descendente previamente usado o en caso de no encontrarlo se busca alguno nuevo disponible. Además se realiza la sincronización del canal mediante la capa *PHY* entre la estación suscriptora y la estación base.
- 2) Si la sincronización del canal descendente es correcta la estación suscriptora podrá recibir los mensajes *DL-MAP* y *DCD* exitosamente obteniendo así los parámetros del canal.
- 3) Comienza el procesamiento de información proveniente de los mensajes *UCD* y *UL-MAP*. Cada *UCD* cuenta con un campo identificador para poder distinguir entre canales ascendentes y seleccionar de entre ellos alguno que esté disponible. Una vez elegido

algún canal válido se espera recibir algún *UL-MAP* para encontrar las regiones disponibles para *ranging*.

- 4) Se inicia el proceso de *ranging*: es decir la sincronización de la estación suscriptora con la estación base en el canal ascendente. La estación suscriptora envía un mensaje de *RNG-REQ* hacia la estación base considerando los retrasos de la capa física, de no obtener respuesta irá incrementado gradualmente su potencia; si la estación base recibe el mensaje enviará un *RNG-RSP* incluyendo los *CID* de la conexión básica así como cualquier ajuste en la potencia o sincronización para la estación suscriptora.
- 5) El proceso se repite hasta que la estación base notifique que el proceso de *ranging* se ha completado exitosamente.
- 6) La estación suscriptora avisa a la estación base sobre sus características particulares en la capa física mediante un mensaje *SBC-REQ* (*Subscriber Station Basic Capability-Request*) donde se da información como: números de *CID* ascendentes que soporta, demoduladores y moduladores, códigos *FEC* usados, versión del protocolo *IP*, etc.
- 7) La estación base se encarga de autenticar a la estación suscriptora por medio de llaves de autorización con la que se obtiene la llave de cifrado y las llaves de autenticación de mensajes.
- 8) La estación suscriptora envía un mensaje *REG-REQ* y recibe por parte de la estación base un *REG-RSP* que incluye el *CID* de control secundario para que la estación suscriptora pueda ser administrada centralmente e iniciar a generar tráfico en la red.

En caso de que la estación suscriptora lo haya solicitado en el *REG-RSP* se puede incluir la versión del protocolo *IP* que se está utilizando; el proceso de registro se considera terminado cuando la estación suscriptora recibe un mensaje de configuración de archivo completada (*TFTP-CPLT*).

- 9) La estación base asigna una dirección *IP* a la estación suscriptora a través del canal secundario mediante el protocolo *DHCP* (*Dynamic Host Configuration Protocol*).
- 10) Para el registro de eventos es necesario establecer la hora y fecha del sistema.
- 11) Dada la asignación de direcciones *IP* se iniciará la transferencia de un archivo con información de la configuración hacia la estación suscriptora mediante el protocolo *DFTP* (*Distributed File Transfer Protocol*), algunos de los datos que incluyen en este archivo son: parámetros de configuración *SS MIC* (*Message Integrity Check*), de finalización y específicos referidos al fabricante; archivo de actualización de software, objeto *SNMP MIB* (*Simple Network Management Protocol Management Information Base*) y dirección del servidor de software.
- 12) Se completa el intercambio de parámetros de configuración enviando un mensaje *DSA-REQ* (*Dynamic Service Addition-Request*) hacia la estación base para establecer las conexiones correspondientes e iniciar la operación normal.

En la figura 8 se muestra el diagrama simplificado de los pasos para ingresar una estación suscriptora a la red *BWA* mencionados anteriormente.

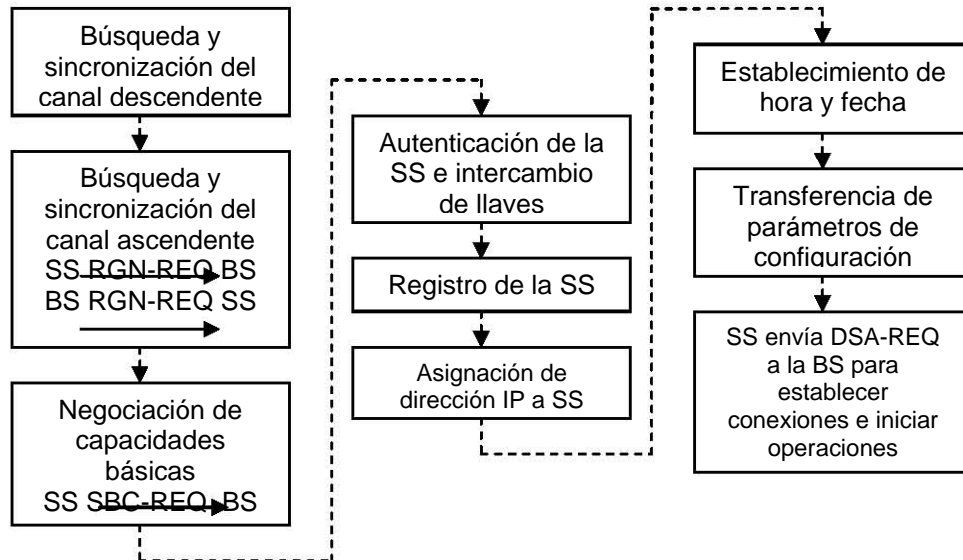


Figura 5 Ingreso a la red e inicialización.

1.9 Conclusiones

En este capítulo se da una breve descripción del protocolo *IEEE 802.16*. La forma en la que están organizadas sus partes, los aspectos que contempla y sus versiones, para poder establecer los servicios contemplados por el estándar: *UGS*, *rtPS*, *nrtPS* y *BE*.

Se establecen los parámetros de los encabezados usados por el estándar en su capa de convergencia *MAC 802.16*.

De igual forma se establecen los mecanismos de acceso al medio utilizados para la comunicación, así como la técnica de resolución de colisiones usada en el proceso.

Se resalta la forma y secuencia en la que se encuentran organizados los mensajes establecidos entre estación base y suscriptora para poder tener acceso a la red y sincronizarse de manera que sea posible la comunicación entre ambas.

Análisis de Técnicas de Modulación Adaptiva
en Redes Inalámbricas de Banda Ancha
(IEEE 802.16, WiMAX)

Capítulo 4

Técnicas de modulación adaptiva

1.1 Introducción

La modulación es la alteración sistemática de los parámetros de una onda llamada portadora (*carrier*) en función del voltaje instantáneo de otra onda llamada mensaje o moduladora.

La portadora es generalmente una onda senoidal teóricamente pura:

$$c(t) = E_c \cos(\omega_c t + \phi) \quad (1)$$

El mensaje o señal moduladora es la información que queremos transmitir y nunca tiene una ecuación que la defina. Para fines de análisis matemático y para pruebas de equipos se usa una onda senoidal:

$$m(t) = E_m \cos(\omega_m t) \quad (2)$$

En la ecuación (1) de la portadora vemos que hay tres parámetros: La amplitud E_c , la frecuencia o velocidad angular ω_c y la fase ϕ . El mensaje puede influir en uno de ellos o en dos o en los tres al mismo tiempo. Así mismo, cada uno de los tres parámetros puede ser modificado simultáneamente por un mensaje diferente. Todo esto depende de las intenciones del diseñador del equipo.

Otro aspecto importante es que el mensaje hace variar los parámetros de la portadora en forma proporcional. Las variaciones no proporcionales no están prohibidas, pero no se utilizan.

El mensaje puede ser analógico o digital. En el caso de mensaje analógico, el parámetro alterado (amplitud, frecuencia o fase de la portadora) puede tener un número infinito de posibles valores. En el caso de mensaje digital, el parámetro alterado podrá tener tantos valores como niveles de voltaje tenga el mensaje. Si el mensaje digital tuviese cuatro niveles (cuaternario), los parámetros tendrían cuatro posibles valores y así sucesivamente.

En modulación digital hay las mismas tres variantes básicas, que se llaman variación de amplitud por interrupción, variación de frecuencia por interrupción y variación de fase por interrupción. En este caso, por costumbre, se conocen por sus nombres en inglés: *Amplitude Shift Keying (ASK)*, *Frequency Shift Keying (FSK)* y *Phase Shift Keying (PSK)*. Error! No se encuentra el origen de la referencia..

Idealmente, las señales *PSK* y *FSK* tienen una amplitud constante, como se ve en la figura 9. Esta característica hace que no tengan problemas con no linealidades en la amplitud, como los encontrados en transmisiones de radio de microondas y canales satelitales. Además, en la práctica, las señales *PSK* y *FSK*, son generalmente mucho más usadas que las señales *ASK*.

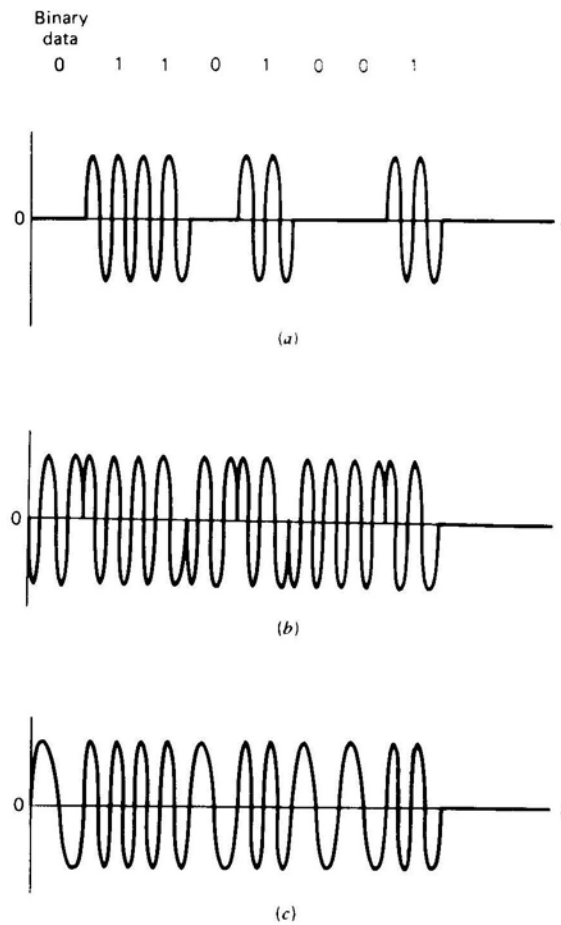


Figura 1 Formas de onda para: a) ASK, b) PSK, c) FSK.

La salida de la modulación *PSK* de un valor binario “x” cualquiera, trabaja de la siguiente manera. Asumiendo una portadora de frecuencia f , la transmisión del dígito 0 es representada por la presencia de la portadora en un intervalo específico de tiempo, en cambio, la transmisión del dígito 1 es representada por la presencia de la señal portadora con una diferencia de fase de π radianes, para el mismo intervalo. Entonces, para una señal portadora coseno de amplitud A y frecuencia f , tenemos:

$$s(t) = \begin{cases} A \cos(2\pi ft + \pi), & \rightarrow 1 \\ A \cos(2\pi ft) & \rightarrow 0 \end{cases} \quad (3)$$

Ya que en este caso existe una diferencia de fase simple, la técnica es conocida como *BPSK*. El resultado de una modulación con dos símbolos se muestra en la figura 10.

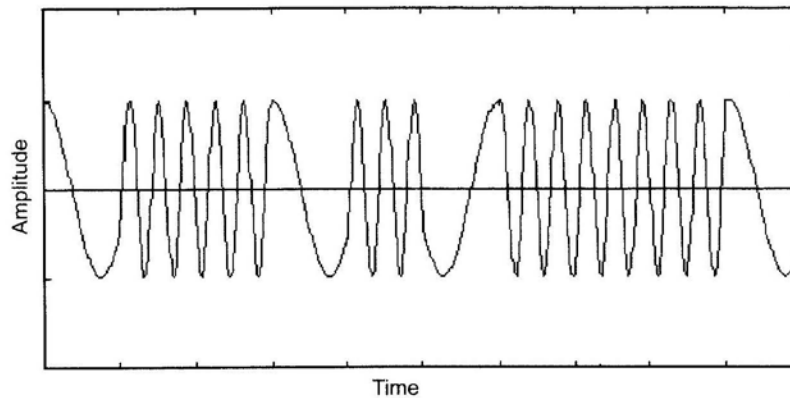


Figura 2 Modulación BPSK.

En la modulación *BPSK*, cada fase representa en código un *bit*. Para lograr una mayor eficiencia en el uso de cada cambio de frecuencia, *PSK* puede transmitir más información en cada espacio de frecuencia. Por ejemplo, *Quadrature* (cuatro niveles) *PSK* (*QPSK*) usa cuatro diferentes fases, separadas por $\frac{\pi}{2}$ radianes, figura 11.

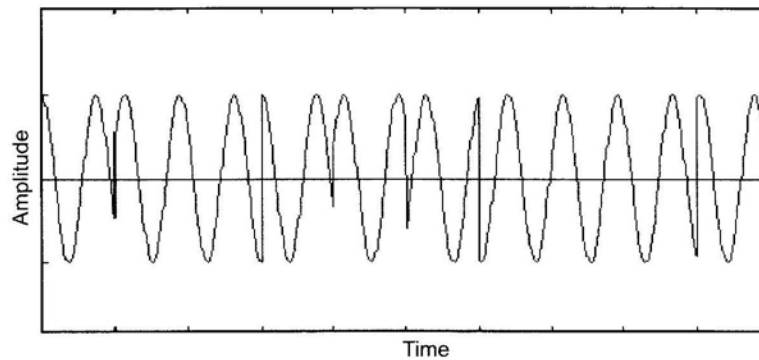


Figura 3 Modulación QPSK.

QPSK puede entonces transmitir dos *bits* por cada cambio de frecuencia. En este caso, la tasa de transmisión alcanzada es dos veces la tasa de transmisión de *bauds* ya que cada estado de la portadora codifica dos *bits*. La ventaja obvia de *QPSK* y cualquier otro esquema de modulación de cuatro niveles la hace una opción práctica para muchos entornos celulares.

En la figura 9 sólo una propiedad (amplitud, fase o frecuencia) de la portadora es modificada por el efecto de la modulación. Actualmente, se usan tipos híbridos de modulación. Por ejemplo, cambios en la portadora tanto en la amplitud y la fase son combinados para producir *QAM (Quadrature Amplitude Modulation)*.

1.2 Modulación QPSK (Quadrature Phase Shift Keying)

Las señales con una diferencia de fase de 180° proveen un nivel de desempeño alto en comunicaciones. Para este caso las señales son de la forma $\pm A\cos(2\pi ft)$. Ya que las señales seno y coseno son ortogonales (la integral de su producto es igual a cero) es posible separarlas completamente en el receptor, usando técnicas de detección coherentes. Por lo tanto es posible enviar dos señales *PSK* simultáneamente sin un incremento en el ancho de banda. La señal transmitida tiene una de 4 posibles formas:

$$\pm(\cos(2\pi ft)\pm\text{sen}(2\pi ft)) \quad (4)$$

Usando propiedades trigonométricas, los términos en el paréntesis pueden ser escritos como:

$$\cos(2\pi ft)\pm\text{sen}(2\pi ft)=\sqrt{2} \cos\left(2\pi ft\pm\frac{\pi}{4}\right) \quad (5)$$

Tal que las cuatro señales posibles pueden ser escritas como:

$$\sqrt{2} \cos\left(2\pi ft + \frac{\pi}{4}\right) \quad (6)$$

$$\sqrt{2} \cos\left(2\pi ft + \frac{3\pi}{4}\right) \quad (7)$$

$$\sqrt{2} \cos\left(2\pi ft + \frac{5\pi}{4}\right) \quad (8)$$

$$\sqrt{2} \cos\left(2\pi ft + \frac{7\pi}{4}\right) \quad (9)$$

La figura 12 muestra la constelación de QPSK:

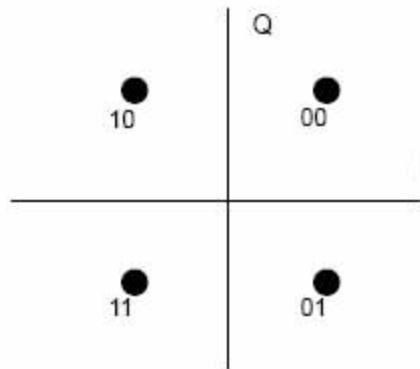


Figura 4 Constelación QPSK.

El símbolo de modulación $S(k)$ debe tomar el valor de $I + jQ$. En la tabla 2 se muestran los *bits* y las coordenadas que representan.

B(1)	B(2)	I	Q
0	0	1	1
0	1	1	-1
1	0	-1	1
1	1	-1	-1

Tabla 1 Representación de los bits en QPSK.

Por lo tanto la transmisión simultánea de señales PSK ortogonales es lo mismo que PSK con 4 posibles ángulos, esto se conoce como QPSK (*Quadrature Phase Shift Keying*).

De manera alternativa QPSK puede ser usado para enviar datos que ya están en forma cuaternaria, por ejemplo, si tenemos una señal analógica muestreada y cuantizada en cuatro niveles, cada nivel puede corresponder a una de las fases transmitidas. En el caso más general, los *bits* pueden ser combinados en pares para formar una señal de cuatro niveles.

1.3 Modulación QAM (Quadrature Amplitude Modulation)

La Modulación de Amplitud en Cuadratura o *QAM* **Error! No se encuentra el origen de la referencia.** es una modulación digital en la que el mensaje está contenido tanto en la amplitud como en la fase de la señal transmitida.

Se basa en la transmisión de dos mensajes independientes por un único camino. Esto se consigue modulando una misma portadora, defasada 90° entre uno y otro mensaje. Ya que las portadoras ortogonales ocupan la misma banda de frecuencia y difieren 90° por cada cambio de fase, cada portadora puede ser modulada independientemente, transmitida sobre la misma banda de frecuencia, y separada por demulación en el receptor.

Tomando el ejemplo de *QPSK* y asumiendo que es posible codificar cuatro fases diferentes con dos valores de amplitud diferentes, tenemos 8 diferentes combinaciones que pueden codificar tres *bits* por muestra. Mediante el uso de varios cambios de fase/amplitud y sus combinaciones la velocidad de transmisión se incrementa y con esto se puede alcanzar técnicas de modulación con un manejo del espectro más eficiente. Por lo tanto, mayores niveles de modulación *QAM* se ha desarrollado, tales como, *16-QAM*, *64-QAM* y *256-QAM* quienes usan 16, 64 y 256 números diferentes de cambios de fase/amplitud respectivamente.

Sin embargo, tales técnicas son más susceptibles al ruido, ya que un mayor número de combinaciones significa que estas combinaciones están más cercanas una de otra y por lo tanto el ruido puede cambiar la señal con mayor facilidad.

La probabilidad de error es la probabilidad de que el receptor se equivoque al identificar los unos y los ceros, esto depende primordialmente del ruido que se agrega a la señal modulada a lo largo del canal de comunicación.

Se ha visto que las señales moduladas pueden representarse en forma de vectores. Esto permite visualizar la forma en que el ruido hace que el receptor se equivoque. En la figura 13, se puede ver con línea gruesa un vector transmitido y los vectores que el receptor espera que lleguen. Con línea de trazos se ha representado la "falsificación" del vector debida al ruido. En algunos casos, el ruido debe modificar solo la fase o la amplitud de la portadora senoidal y en otros, como en *M-QAM* es necesario que el ruido modifique ambos parámetros. La probabilidad de error se minimiza con el uso de técnicas, como el uso de los códigos Gray.

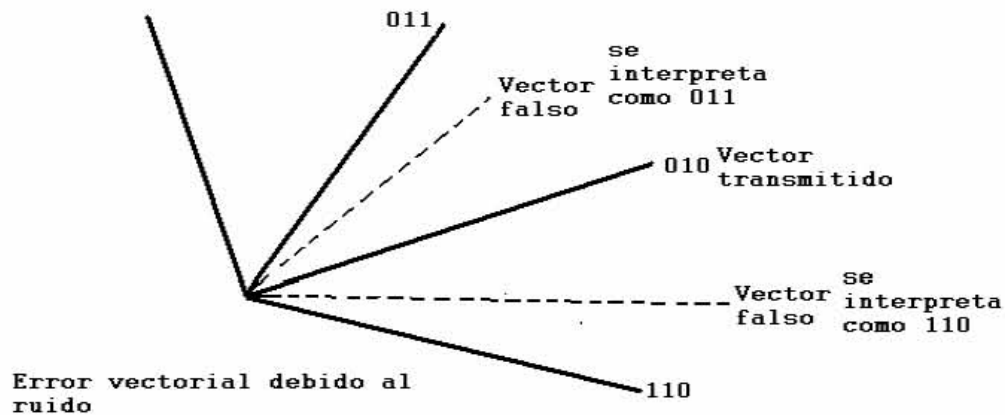


Figura 5 Representación de un error en QAM.

La importancia de este sistema de modulación se debe a la gran cantidad de aplicaciones asociadas a ella:

- Es empleada por *módems* para velocidades superiores a los 2400 bps (por ejemplo V.22 bis y V.32).
- Es la modulación empleada en una gran cantidad de sistemas de transmisión de televisión, microondas y satélites.
- Es la base de los módems *ADSL (Asymmetric Digital Subscriber Line)* que trabajan en el bucle de abonado, a frecuencias situadas entre 24KHz y 1104KHz, pudiendo obtener velocidades de hasta 9Mbps, modulando en QAM diferentes portadoras.

1.3.1 Características de la modulación 16-QAM

Como se observa en la figura 14, la constelación está codificada con base en el código Gray, de esta forma se logra que cada punto de la constelación sólo cambie en un *bit* con respecto a cualquier punto adyacente, así la probabilidad de error disminuye, ya que si se modifica el valor de amplitud, fase o ambos el símbolo sólo contendrá un *bit* erróneo. Todos los órdenes de modulación QAM vistos en este capítulo se codifican con base en el código Gray:

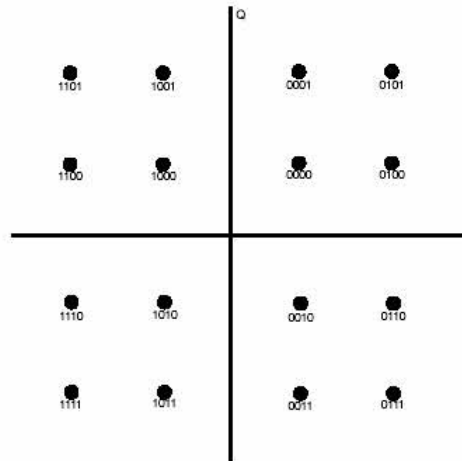


Figura 6 Constelación 16-QAM (en código Gray).

Como se puede observar en la figura 14, la señal modulada tiene variaciones en amplitud y fase. En cada cuadrante existen tres valores de fase y de amplitud diferentes. Por lo que cada punto de la constelación representa 4 *bits*, y en total existen 16 puntos, de ahí el nombre de 16-QAM. La representación de cada combinación de los 4 *bits* se presenta en la tabla 3:

B(1)	B(2)	B(3)	B(4)	I	Q
0	1	0	1	3	3
0	1	0	0	3	1
0	1	1	0	3	-1
0	1	1	1	3	-3
0	0	0	1	1	3
0	0	0	0	1	1
0	0	1	0	1	-1
0	0	1	1	1	-3
1	0	0	1	-1	3
1	0	0	0	-1	1
1	0	1	0	-1	-1
1	0	1	1	-1	-3
1	1	0	1	-3	3
1	1	0	0	-3	1
1	1	1	0	-3	-1
1	1	1	1	-3	-3

Tabla 2 Representación de los *bits* en 16-QAM.

1.3.2 Características de la modulación 64-QAM

Esta técnica de modulación digital es principalmente usada para enviar datos sobre el canal *downstream* en redes de cable coaxial. Es una técnica muy eficiente, soporta velocidades de transmisión arriba de 28 Mbps sobre un canal simple de 6 MHz. Aunque es susceptible a señales de interferencia, lo que hace que no sea usado en el canal *upstream*, ya que es muy sensible al ruido. El diagrama vectorial de la modulación 64-QAM se presenta en la figura 15.

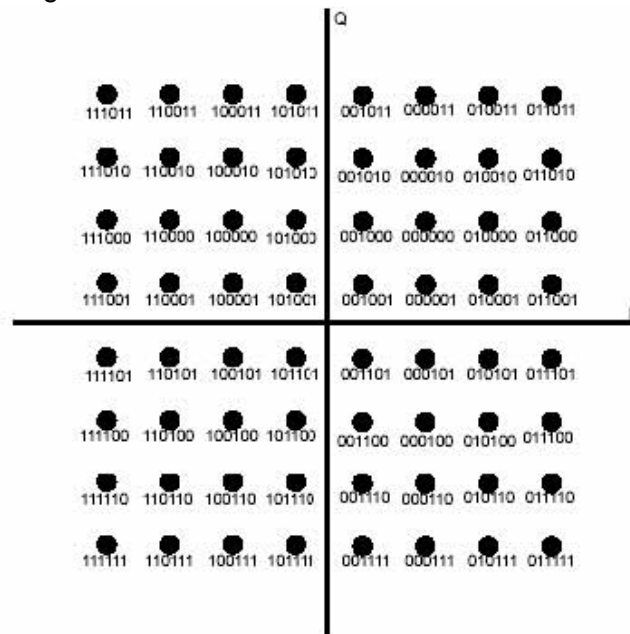


Figura 7 Constelación 16-QAM (en código Gray).

En cada cuadrante existen 16 puntos. Cada punto de la constelación representa 6 *bits*, y en total existen 64 puntos, de ahí el nombre de 64-QAM. La representación de cada combinación de los 6 *bits* se presenta en la tabla 4.

B(1)	B(2)	B(3)	B(4)	B(5)	B(6)	I	Q
0	1	1	0	1	1	7	7
0	1	1	0	1	0	7	5
0	1	1	0	0	0	7	3
0	1	1	0	0	1	7	1
0	1	1	1	0	1	7	-1

0	1	1	1	0	0	7	-3
0	1	1	1	1	0	7	-5
0	1	1	1	1	1	7	-7
0	1	0	0	1	1	5	7
0	1	0	0	1	0	5	5
0	1	0	0	0	0	5	3
0	1	0	0	0	1	5	1
0	1	0	1	0	1	5	-1
0	1	0	1	0	0	5	-3
0	1	0	1	1	0	5	-5
0	1	0	1	1	1	5	-7
0	0	0	0	1	1	3	7
0	0	0	0	1	0	3	5
0	0	0	0	0	0	3	3
0	0	0	0	0	1	3	1
0	0	0	1	0	1	3	-1
0	0	0	1	0	0	3	-3
0	0	0	1	1	0	3	-5
0	0	0	1	1	1	3	-7
0	0	1	0	1	1	1	7
0	0	1	0	1	0	1	5
0	0	1	0	0	0	1	3
0	0	1	0	0	1	1	1
0	0	1	1	0	1	1	-1
0	0	1	1	0	0	1	-3
0	0	1	1	1	0	1	-5
0	0	1	1	1	1	1	-7
1	0	1	0	1	1	-1	7
1	0	1	0	1	0	-1	5
1	0	1	0	0	0	-1	3
1	0	1	0	0	1	-1	1
1	0	1	1	0	1	-1	-1
1	0	1	1	0	0	-1	-3
1	0	1	1	1	0	-1	-5
1	0	1	1	1	1	-1	-7
1	0	0	0	1	1	-3	7
1	0	0	0	1	0	-3	5
1	0	0	0	0	0	-3	3
1	0	0	0	0	1	-3	1
1	0	0	1	0	1	-3	-1
1	0	0	1	0	0	-3	-3
1	0	0	1	1	0	-3	-5
1	0	0	1	1	1	-3	-7
1	1	0	0	1	1	-5	7

1	1	0	0	1	0	-5	5
1	1	0	0	0	0	-5	3
1	1	0	0	0	1	-5	1
1	1	0	1	0	1	-5	-1
1	1	0	1	0	0	-5	-3
1	1	0	1	1	0	-5	-5
1	1	0	1	1	1	-5	-7
1	1	1	0	1	1	-7	7
1	1	1	0	1	0	-7	5
1	1	1	0	0	0	-7	3
1	1	1	0	0	1	-7	1
1	1	1	1	0	1	-7	-1
1	1	1	1	0	0	-7	-3
1	1	1	1	1	0	-7	-5
1	1	1	1	1	1	-7	-7

Tabla 3 Representación de los bits en 64-QAM.

La modulación 64-QAM tiene una gran ventaja con respecto a modulaciones de orden inferior, está es la velocidad de transmisión que se logra al enviar 6 bits por símbolo con esta modulación. Sin embargo, al incrementar los bits por símbolo se requieren sistemas de detección más sensibles, capaces de detectar y diferenciar los diferentes valores de amplitud y fase recibidos. Otro punto que afecta a las modulaciones QAM de orden superior es la susceptibilidad que tienen al ruido.

Entre mayor es el orden de modulación más susceptible es al ruido, por lo tanto, si se quiere una transmisión con una tasa de errores pequeña se requiere una relación señal a ruido cada vez más grande a medida que el orden de modulación aumenta. En la figura 16 se muestra la probabilidad de error para modulaciones 16-QAM y 64-QAM en función a la relación señal a ruido.

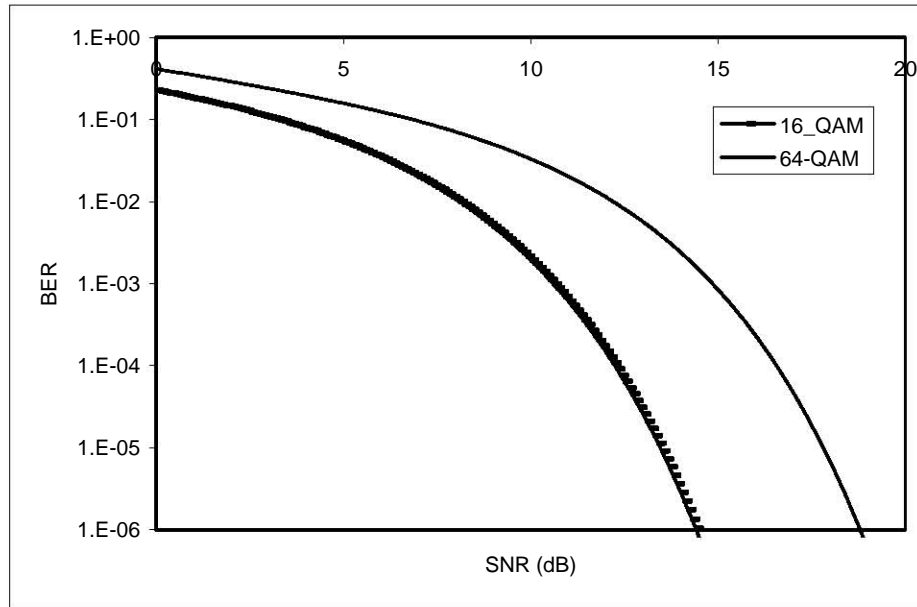


Figura 8 BER en función del SNR en QAM; *Error! No se encuentra el origen de la referencia.*

1.3.3 Características de la modulación 256-QAM

Al igual que 64-QAM, esta modulación es usada principalmente en redes de cable basadas en el protocolo DOCSIS; *Error! No se encuentra el origen de la referencia.* Aunque es la modulación que mayor velocidad de transmisión puede alcanzar, también es la más complicada ya que requiere de dispositivos electrónicos muy complejos y caros por la sensibilidad que deben tener para poder distinguir los diferentes valores de amplitud y fase transmitidos.

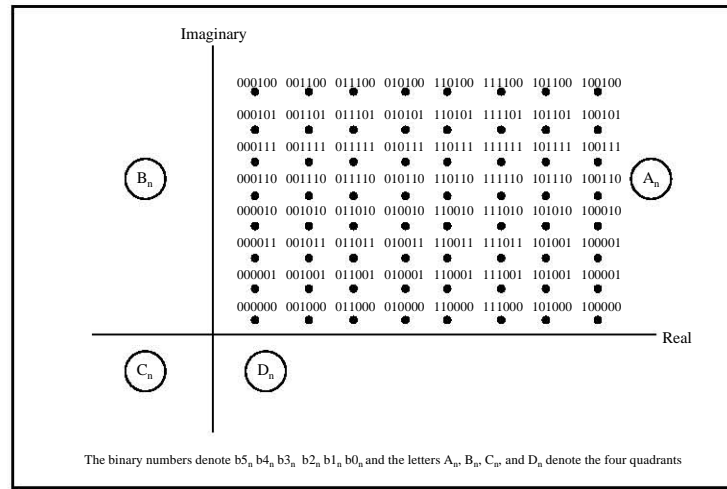


Figura 9 Constelación 256-QAM (en código Gray).

El diagrama vectorial de esta modulación se ve en figura 17. Como se puede observar, la señal modulada tiene variaciones en amplitud y fase. En cada cuadrante existen 64 puntos. Cada punto de la constelación representa 8 *bits* y en total existen 256 puntos, de ahí el nombre de 256-QAM.

1.4 OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing)

OFDM es una forma de modulación de multiportadora que extiende el mensaje a transmitir en un cierto número de partes. El espectro disponible es también extendido en un gran número de portadoras de baja velocidad y las partes del mensaje son simultáneamente transmitidas sobre un gran número de canales de frecuencia de baja velocidad.

Por lo tanto, al extender el mensaje en varias partes y mandarlas lentamente de forma paralela sobre un número de portadoras de baja velocidad, las reflexiones debido a la propagación de multitrayectorias probablemente llegará tarde en el receptor sólo por una pequeña porción de tiempo. Esto da como resultado gran capacidad, y un enlace resistente a las multitrayectorias.

Un sistema *OFDM*, Transmisión –Recepción se describe a continuación:

□ Transmisor:

- Conversión serie-paralelo. El flujo de datos a ser transmitido toma la forma de la longitud de palabra requerida para la transmisión. Por ejemplo, si se usa *QPSK* el flujo es dividido en palabras de datos de dos *bits* cada una, por lo tanto cada palabra de datos es asignada a una portadora distinta.

- Modulación de cada portadora. La palabra de datos que forma la entrada de cada portadora es modulada.
- Transformada de *Fourier* Inversa. Ya que los contenidos de varias portadoras han sido definidos, éstos se utilizarán para formar la entrada de una Transformada Inversa de *Fourier* (*IFT, Inverse Fourier Transform*) para obtener una representación de la señal *OFDM* en el dominio del tiempo. La transformada Inversa de *Fourier* puede ser implementada a un costo bajo usando la Transformada Rápida de *Fourier* (*FFT, Fast Fourier Transform*).
- Conversión Digital-Analógica. La salida de la *IFT* es convertida en una señal analógica para poder transmitirla vía radio.

□ Receptor:

Para recibir el mensaje, el receptor realiza la operación inversa a la del transmisor. Éste digitaliza la señal recibida y lleva cabo una Transformada de *Fourier* Rápida para obtener la señal en el dominio de la frecuencia.

La salida de eso es el contenido de las portadoras, que son luego demoduladas para obtener las palabras de datos transmitidas en cada una de ellas. Las palabras de datos son entonces combinadas para producir el mensaje original. En la figura 18 se muestra el sistema descrito:

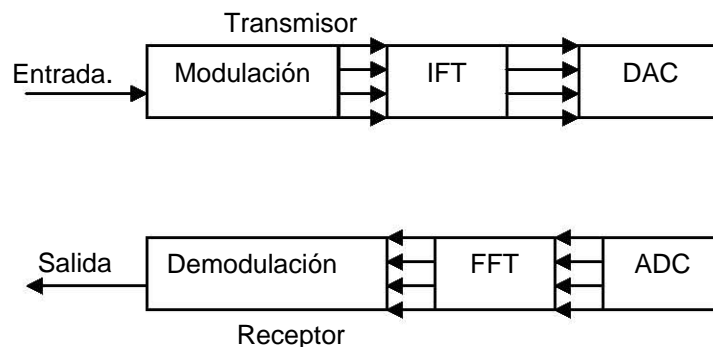


Figura 10 Sistema OFDM.

1.4.1 Usos

DAB - OFDM forma la base para la radiodifusión digital de audio (*DAB, Digital Audio Broadcasting*), un estándar del mercado Europeo.

ADSL - OFDM forma la base del estándar *ADSL*.

Wireless Local Area Networks – su desarrollo está en curso para configuraciones punto a punto y punto a multipunto usando tecnología *OFDM*

Como un suplemento al estándar *IEEE 802.11*, el grupo de trabajo de dicho estándar publicó el *IEEE 802.11a*, que señala el uso de *OFDM* en la banda de los 5-8 GHz.

1.4.2 MIMO-OFDM

Multiple Input, Multiple Output Orthogonal Frequency Division Multiplexing se trata de una tecnología desarrollada por *Lospan Wireless* que usa varias antenas para transmitir y recibir señales de radio. *MIMO-OFDM* permitirá a los proveedores de servicio el desarrollo de redes *BWA* que no requieren línea de vista. Específicamente *MIMO-OFDM* toma ventaja de las propiedades de multitrayectoria en distintos ambientes usando antenas en las estaciones base que no tienen línea de vista.

El sistema *MIMO* usa varias antenas para transmitir datos simultáneamente, en tramas pequeñas al receptor, el cual puede procesar los flujos de datos y colocarlos juntos. Este proceso, llamado multiplexaje espacial, incrementa proporcionalmente la velocidad de transmisión con un factor igual al número de antenas transmisoras. Además, al enviar toda la información en la misma banda de frecuencia esta técnica utiliza el espectro de manera eficiente.

1.4.3 Otras versiones de OFDM

VOFDM (Vector OFDM) usa el concepto de la tecnología *MIMO* y está siendo desarrollada por *Cisco Systems*.

WOFDM - Wideband OFDM, desarrollado por *Wi-LAN*, utiliza un espaciado entre canales lo suficientemente grande tal que, los errores de frecuencia entre el transmisor y el receptor no afectan su desempeño.

Flash OFDM - Flarion (Lucent/Bell Labs spinoff) ha desarrollado esta tecnología, también llamada *fast-hopped OFDM*, el cual utiliza tonos múltiples y *fast hopping* para esparcir las señales sobre una determinada banda del espectro.

1.5 Conclusiones

Gracias al desarrollo y uso de nuevas tecnologías, hoy en día, es necesario disponer de sistemas cada vez más desarrollados capaces de ofrecer velocidades de transmisión altas y con un uso eficiente del espectro.

La modulación es una parte muy importante dentro de un sistema de comunicaciones digitales. Esto se debe a que en la modulación se fijan parámetros tan importantes como la velocidad de transmisión y el ancho de banda de la transmisión. El desarrollo e implementación de nuevas técnicas de modulación nos permite alcanzar velocidades de transmisión cada vez más grandes con el mismo ancho de banda.

En los inicios de la modulación digital se emplearon técnicas como *ASK*, *PSK* y *FSK* que lograron ofrecer, en su tiempo, la solución necesaria para implementar sistemas eficientes y de alta calidad. Sin embargo, estas modulaciones se han hecho obsoletas y fue necesario el desarrollo de modulaciones de orden superior e incluso el desarrollo de modulaciones híbridas, en las que se modifican varios parámetros de la señal portadora. Un ejemplo de estos tipos de modulación son *QPSK* y *QAM*.

El uso de técnicas de modulación de orden superior ha logrado aumentar la eficiencia de los sistemas de comunicación y hacer más eficiente el espectro, aunque cada vez son más susceptibles a efectos externos como el ruido. Debido a esto es necesario introducir nuevas técnicas que permitan corregir los problemas provocados por el ruido y lograr el uso de técnicas de modulación de orden cada vez mayor.

Una solución que se ha propuesto, es el uso de técnicas de modulación adaptiva en la cual se combinan diversas técnicas de modulación para lograr un aumento significativo en la velocidad de transmisión promedio del sistema.

Ya que el estándar *IEEE 802.16* contempla el uso de diferentes técnicas de modulación (como *QPSK*, *16-QAM* y *64-QAM*) para lograr velocidades de transmisión cada vez más grandes. Es posible hacer que en los sistemas basados en éste estándar se logre implementar el uso de la modulación adaptiva como solución a la necesidad de altas velocidades de transmisión. Para esto es necesario conocer los detalles de cada tipo de modulación empleado para así lograr el mayor provecho de cada modulación.

Análisis de Técnicas de Modulación Adaptiva
en Redes Inalámbricas de Banda Ancha
(IEEE 802.16, WiMAX)

Capítulo 5

Modelo de simulación

1.1 Introducción

En el siguiente capítulo se describen las características principales de los nodos que simulan la estación base y las estaciones suscriptoras, así como sus enlaces en el modelo de simulación hecho en *OPNET*.

Cada módulo contenido en estos nodos especifica parámetros de operación para una correcta comunicación entre estaciones y la posibilidad de generar estadísticas a partir de las cuales se puedan construir modelos que representen el comportamiento de la red.

Estos módulos siguen procesos en los que se programan las funciones básicas en la comunicación propuestas en el estándar *IEEE 802.16*, tales como: *ranging*, asignación y solicitud de ancho de banda, envío de mensajes descriptores de canal, mapas de mantenimiento, envío de datos, detección y resolución de colisiones; **Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

1.2 Estación base (BS, Base Station)

En la figura 19 se muestra el nodo de la estación base:

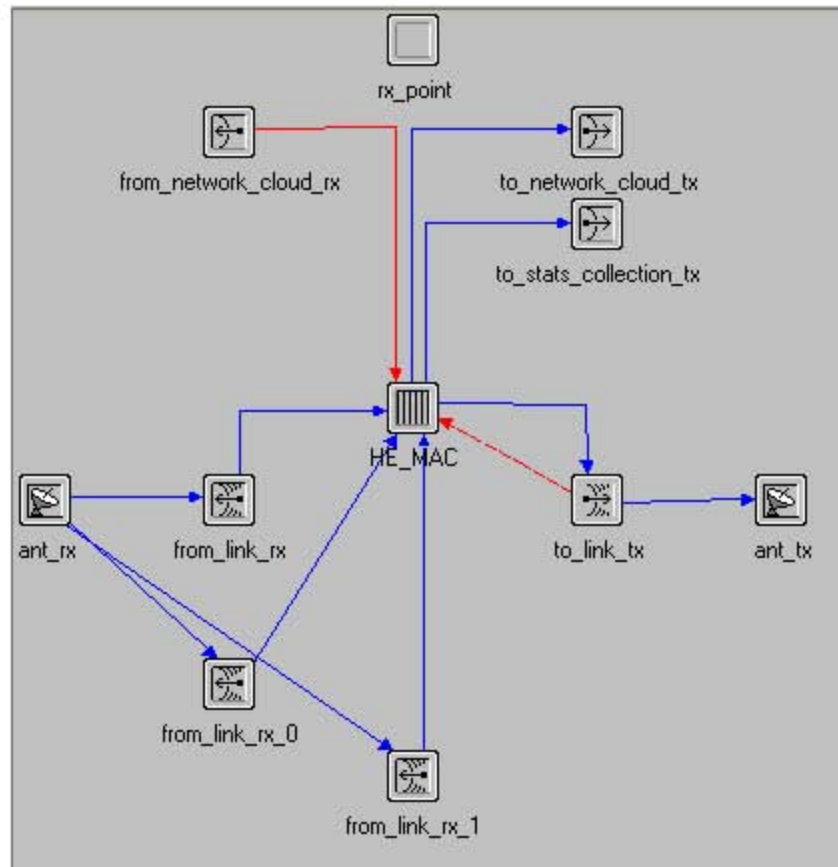


Figura 1 Representación de la estación base.

El nodo está conformado por módulos como: *from_network_cloud_rx*, *to_network_cloud_tx*, *rx_point*, *to_stats_collection_tx*, *HE_MAC*, *ant_rx*, *ant_tx*, *from_link_rx*, *from_link_rx_0*, *from_link_rx_1* y *to_link_tx*. Cada uno de estos módulos establece distintos tipos de conexiones con otros módulos para poder realizar las acciones de las cuales son responsables.

1.2.1 Rx_point

Este módulo es el encargado de la identificación de los nodos, la red a la que pertenecen y su ubicación en el espacio.

1.2.2 From_network_cloud_rx

Este módulo es usado para conexiones punto a punto y sirve como la puerta de entrada al nodo para los paquetes que son recibidos a través del canal, que puede ser uno sólo o varios, a una tasa de 1024bps.

1.2.3 To_network_cloud_tx

Al igual que el módulo anterior se utiliza en la transmisión de paquetes para conexiones punto a punto y para este caso el módulo se convierte en la puerta de salida de los mismos. También puede contener varios canales especificándose su velocidad de transmisión, que en este caso es de 100Mbps para la transmisión, mismo que tendrá que ser compatible con el del receptor.

1.2.4 To_stats_collection_tx

Este módulo es el encargado de recolectar estadísticas, cuenta con las mismas características que el *to_network_cloud_tx*.

1.2.5 From_link_rx

Se trata del canal de enlace con la estación base que se encarga de recibir los paquetes provenientes de las estaciones suscriptoras. Existen tres de ellos debido a que en el modelo se implementó modulación adaptiva; de esta forma *from_link_rx* es el encargado de recibir las transmisiones provenientes de estaciones suscriptoras que se encuentren trabajando con modulación *QPSK*, *from_link_rx_0* de aquellas que utilizan *16-QAM* y finalmente *from_link_rx_1* de estaciones con *64-QAM*.

Cada módulo cuenta con diversos atributos como los que se muestran en la figura 20

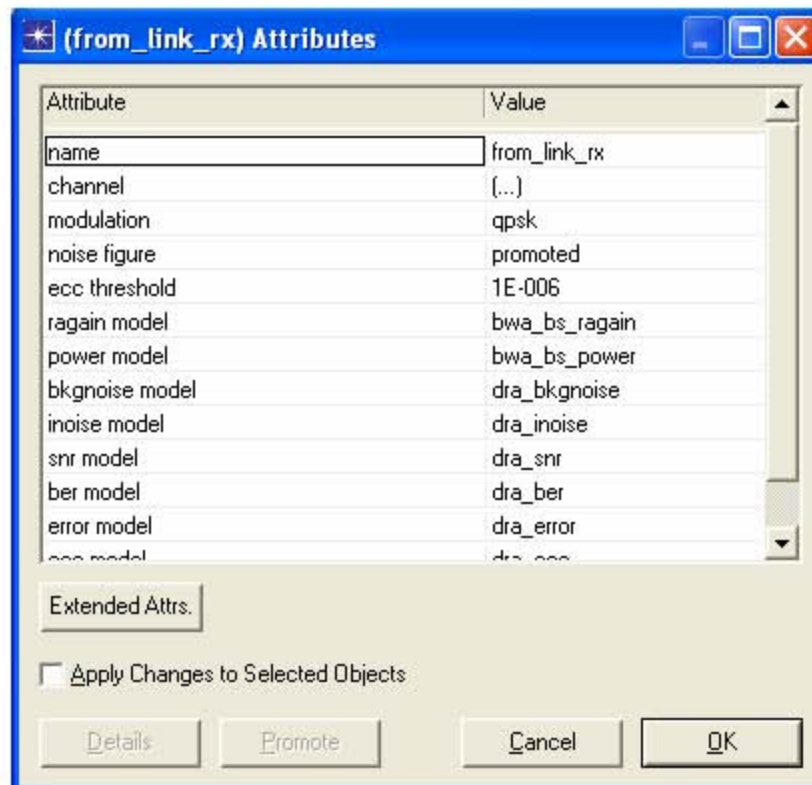


Figura 2 Atributos del canal de subida.

Aquí se puede ver la descripción del canal correspondiente a la modulación *QPSK* los modelos a los cuales apunta en cada proceso y valores como el *BER* o el *data rate* establecido en el canal.

1.2.6 Ant_rx

Es el dispositivo mediante el cual se recibe información proveniente de las estaciones suscriptoras en forma de una onda electromagnética. Por comodidad se especificó una sola antena que está conectada a todos los canales de subida. Es posible especificar el patrón de radiación de la misma a través de valores angulares en coordenadas esféricas, para este caso se eligió una antena isotrópica.

1.2.7 To_link_tx

En este caso se trata del canal de bajada, a través de él se envía información a las estaciones suscriptoras con *16-QAM* que es la única modulación disponible para la transmisión de la estación base según el estándar *IEEE 802.16*. La estación suscriptoras cuenta con moduladores y demoduladores para poder recibir la información correctamente.

1.2.8 Ant_tx

Por comodidad y entendimiento del diagrama gráfico de nodo se especificaron dos antenas, una de transmisión y otra de recepción, aunque prácticamente podría ser el mismo dispositivo el que realizara dichas funciones. En este caso es la antena quien manda la información en forma de señal electromagnética a la estación suscriptora y se encuentra por otro lado enlazada al módulo *to_link_tx* mediante un enlace de flujo de datos.

1.2.9 HE_MAC

Es el encargado de reunir los datos provenientes de los canales tanto de subida como los de bajada. Además de estar conectado al módulo de estadísticas que recibe a través de este procesador el flujo de datos que recibe de los módulos, se comporta como una cola y se conecta con el *bwa_bs_mgr* que es el encargado de realizar, a través de varias funciones, los procesos necesarios para establecer regiones de contención en el mapa, canalizar el tipo de petición de acuerdo al tipo de servicio, etc.

1.2.9.1 Proceso Bwa_bs_mgr

El diagrama de estados del proceso *Bwa_bs_mgr* se muestra en figura 21

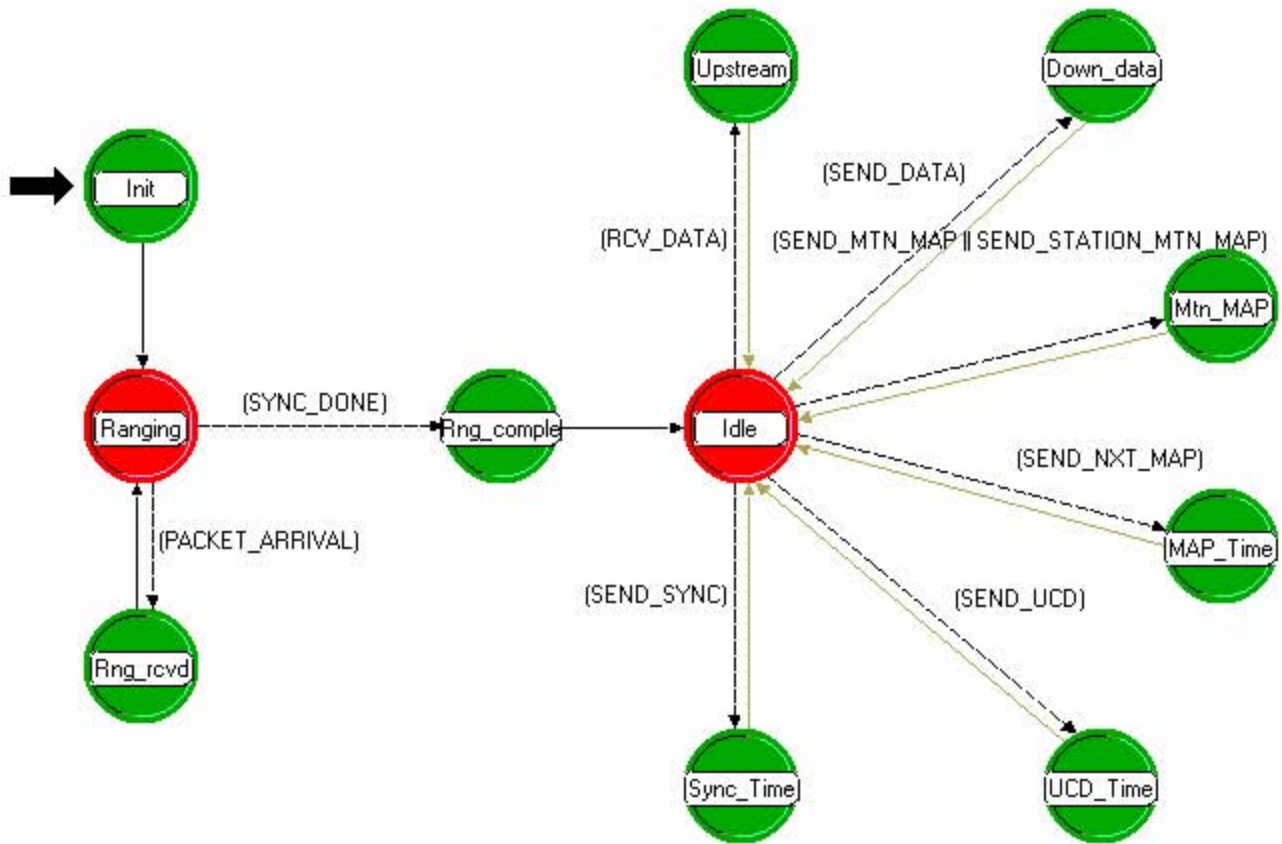


Figura 3 Proceso Bwa_bs_mgr.

□ Init

Comienza con la ubicación de la estación base en coordenadas del tipo “x” y “y”, se encarga de aceptar las interrupciones que provienen del inicio de la simulación e invoca procesos para permitir la inicialización.

También es responsable de dar las interrupciones necesarias para poder recolectar estadísticas, crear las listas de *IE*s y aquellas que pertenecen a peticiones de ancho de banda.

Finalmente se dan los valores iniciales de algunos parámetros como el retardo de propagación, contadores de estaciones, arreglos, etc. y se mandan a llamar los valores de otros como son: la duración de un slot, del mapa y la obtención de los parámetros de simulación.

□ Ranging

Terminadas las funciones del estado *Init* este proceso tiene dos interrupciones que son activadas de acuerdo a dos parámetros, si se ha terminado con el proceso de sincronía la

interrupción nos lleva al estado *Rng_complete*, si se trata de la recepción de un paquete de información el estado al que es canalizado ese paquete es *Rng_rcvd*.

□ Rng_Rcvd

Este estado se encarga de la recepción de los mensajes *RNG_REQ* de las estaciones suscriptoras. Cuando recibe un paquete determina su formato, la potencia con la que es recibida y la distancia entre el nodo receptor y el transmisor.

Lee el encabezado *MAC*, obtiene la información de *QoS* de la estación suscriptora, el mensaje proveniente del tipo de paquete y verifica los valores de retardo de propagación máximos. Ya que obtuvo los parámetros regresa un mensaje *RNG_RSP* a la estación suscriptora que originó el mensaje.

□ Rng_complete

Es el encargado de enviar los primeros mensajes *UCD* y agendar los siguientes. Emite el mapa inicial donde se encuentran solamente los *IE*s de los *slots* de contención y calcula los tiempos de transmisión para los mapas basándose en el retardo.

Se genera el encabezado *MAC* para la preparación del mapa y se envía un *IE* para que las estaciones suscriptoras usen el espacio para la petición de ancho de banda o la transmisión de paquetes de información. El paquete es encapsulado, el envío del siguiente mapa se calcula de forma que sea posible que la estación más lejana lo reciba para transmitir a tiempo.

Calcula el número de *IE*s que se incluirán en el mapa de mantenimiento basándose en el número de estaciones suscriptoras y el tamaño del búfer circular.

□ Idle

Este estado puede permanecer inactivo o canalizar el paso otro estado dependiendo del tipo de información que reciba. En el caso de recibir un flujo de datos proveniente de una estación suscriptora ese será enviado al estado *Upstream*, si ocurre el caso contrario, es decir, que la información se envíe por parte de la estación base el estado siguiente será *Down_data*.

Las interrupciones también pueden ocurrir por la necesidad de generación de un mapa, pero éstas pueden tener distintos propósitos, si se trata de un mapa que sólo incluya funciones de mantenimiento la interrupción será canalizada a *Mnt_MAP*; en caso contrario la interrupción se dirige hacia el estado *MAP_Time* en donde se genera un mapa cada 2ms de acuerdo al estándar *IEEE 802.16*.

Por último, si se requiere generar los mensajes *UCD* o de sincronía las interrupciones se programan para saltar a los estados *UCD_Time* o *Sync_Time* respectivamente.

□ Upstream

Recibe paquetes provenientes de la estaciones suscriptoras, determina el nivel de potencia y la relación señal a ruido de los mismos, incrementando el contador de paquetes recibidos.

Se determina si el paquete entrante contiene una petición de ancho banda, si es así, se obtiene su *CID*, el número de *minislots* solicitados y un historial de cuantas peticiones previas han sido atendidas para esa estación suscriptora. La petición se almacena en una cola y es atendida mediante el criterio de *QoS* establecido.

Se analiza el encabezado del paquete para ver de qué tipo de información se trata, si está fragmentado o incluye peticiones *piggyback*. En el caso de que el paquete esté fragmentado puede ser identificado por su formato, obteniéndose así la longitud total y su carga útil.

El módulo encargado de las estadísticas recibirá una copia de cada paquete para procesar su información, en caso de que el paquete haya solicitado en su encabezado confirmación de envío, dicha petición también se pone en cola de espera para que una vez atendida se destruya el paquete.

□ Down_data

Cuando se recibe un paquete busca la dirección destino del mismo o en caso de no encontrar ese dato la estación suscriptora genera una aleatoriamente con base en su número dentro de la red. Se le asigna un apuntador al paquete, se añade su encabezado *MAC* y se encapsula dentro de una trama la cual también contará con un apuntador.

□ Mtn_MAP

Aquí se mandan *IE*s por cada estación suscriptora que se encuentre operando en la red, más un *IE* nulo para completar una serie que será enviada en un Mapa de mantenimiento utilizado exclusivamente para esta función.

□ MAP_Time

Ver apéndice A

En este estado se crean mapas nuevos y se establecen las condiciones en que dichos mapas están organizados. Los mapas están divididos en regiones que contemplan las de contención para cada tipo de modulación, peticiones y *padding*.

Como se explicó existen regiones de contención asignadas para cada tipo de modulación, éstas se encuentran alojadas en el inicio del mapa y de manera consecutiva; es decir, una vez asignada la región de *QPSK* en el slot siguiente comienza la de *16-QAM* y cuando esa termina se asigna *64-QAM*.

Al terminar esa región se asigna la de peticiones, que es la mayor de todas y finalmente la de *padding* (usada como región de contención) que sin dividirse se reparte completa entre todos los tipos de modulaciones sin establecerse zonas específicas para cada tipo de modulación, lo cual puede provocar colisiones.

Dependiendo de que clase de servicio se esté atendiendo se ejecuta una rutina, en este caso es la que se refiere a *Best Effort*. Comienza indicando el inicio de un slot y si el mapa presente en el que se requiere enviar la petición está lleno, se autentica la petición y se borra de la cola una vez que ha sido atendida, se verifica el espacio que se requiere para transmitir y se acomoda en una o más mapas dependiendo de la longitud del mensaje emitido por la estación base.

En casos especiales es posible que la longitud del mensaje genere una fragmentación ya que ésta puede ser mayor que el límite establecido, para esos casos se fragmenta el mensaje y los paquetes resultantes de la fragmentación son atendidos checando el espacio disponible en cada mapa.

□ UCD_Time

Aquí se prepara el formato de este tipo de mensaje y su contenido. Se incluye la tasa de transmisión del canal ascendente, el tamaño del *minislot* en *bytes*, parámetros de códigos de corrección de errores, localidades de contención, envío de información, mantenimiento inicial y mantenimiento final.

Se asigna la longitud total al paquete y se crea su encabezado de control, finalmente se encapsula y envía a todas las estaciones suscriptoras de la red.

□ Syn_Time

Se da formato, encabezado, encapsulado y programación del envío del paquete de sincronía hacia todas las estaciones suscriptoras de la red.

1.3 Estación Suscriptora (SS, Subscriber Station)

El nodo creado para representar la estación suscriptora está representado en la figura 22

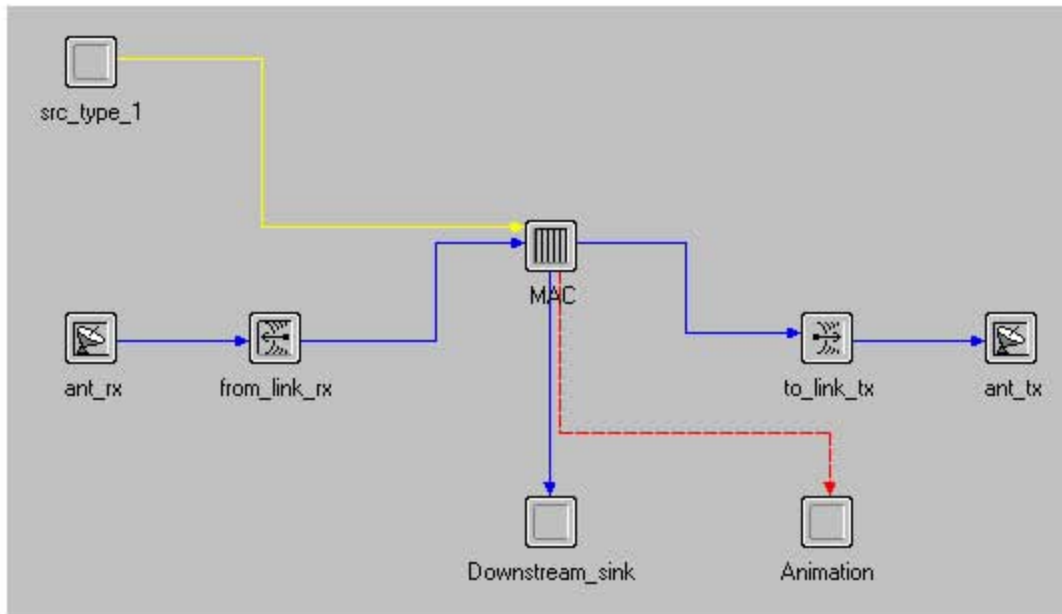


Figura 4 Estación suscriptor.

Este nodo está implementado de tal forma que cumpla con todas las funciones de una estación suscriptor común. Está conformado por módulos encargados de la generación y eliminación de paquetes de información, del envío y recepción al y desde el canal inalámbrico, del cumplimiento de las funciones propias de la subcapa *MAC*, así como de animaciones que permiten la obtención de resultados.

Este proceso se hace por medio de los módulos: *Animation*, *src_type_1*, *Downstream_sink*, *ant_rx*, *ant_tx*, *from_link_rx*, *from_link_tx* y *MAC*. Cada uno de ellos encargado de una función específica de la estación suscriptor.

Cada uno de estos módulos están conectados por medios de enlaces que simulan una conexión física o lógica para continuar con los procesos realizados por la estación. Simulando un flujo de paquetes entre los módulos o una conexión para el manejo de estadísticas independientes a las funciones de la estación suscriptor.

1.3.1 Módulo *src_type_1*

Este módulo se encarga de la generación de paquetes de información, está encargado de generar el tráfico en la red, genera paquetes de longitud variable dependiendo del tipo de tráfico que se desee generar, puede generar tráfico de Internet, voz basado en *codecs* como: G711 y G723, además de tráfico de video.

En este módulo se puede especificar el período medio en el cual se va a generar un paquete y con qué distribución se generan tanto en su tamaño como en el tiempo. Esto se especifica en la figura 23.

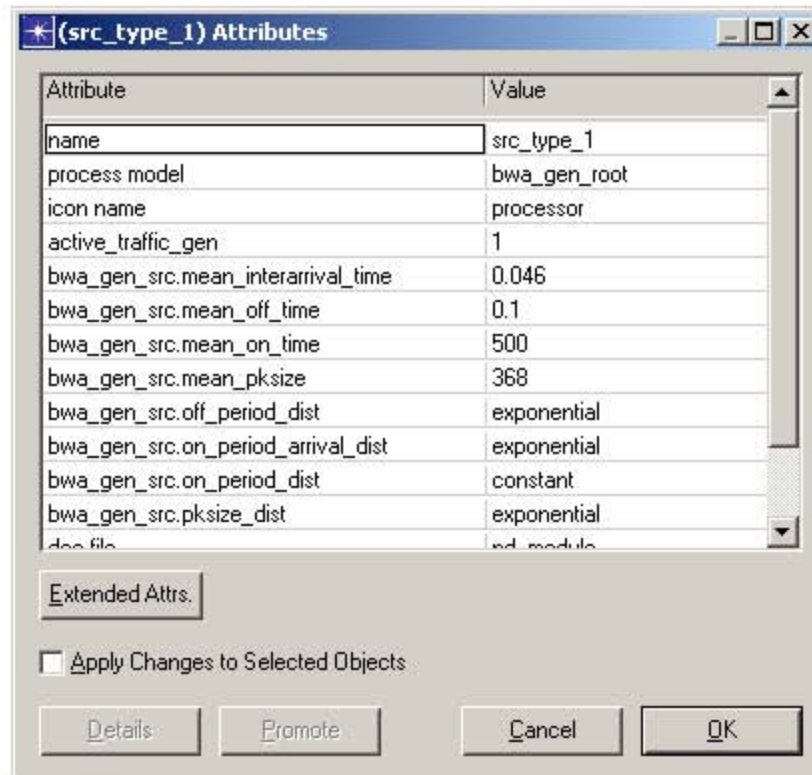


Figura 5 Atributos del generador de tráfico.

Los paquetes generados por este módulo son enviados al modelo de proceso *bwa_wm_child*, el cual procesa el paquete para su envío.

1.3.2 Downstream_sink

Este módulo se encarga de la eliminación de los paquetes recibidos de la estación base ya que fueron procesados por el módulo *MAC*. Esto para que la cola no se llene y no se pierdan paquetes.

Además este módulo se encarga de la recolección de estadísticas para el tráfico de bajada, de la medición del retardo, tamaño de los paquetes y el tipo de mensajes que contenía cada uno de ellos.

1.3.3 Ant_rx y ant_tx

Estos módulos representan la antena de la estación suscriptora, para facilitar la simulación se pone una antena para recepción (*ant_rx*) y otra para la transmisión (*ant_tx*).

1.3.4 From_link_rx y from_link_tx

Estos módulos establecen las características principales de los canales de subida y bajada. El módulo *from_link_rx* recibe todos los paquetes detectados por la antena y si sus parámetros coinciden con los del paquete recibido, los paquetes son aceptados por el simulador para así ser enviados hacia el módulo *MAC*, el cual procesa los paquetes.

Los parámetros que puede soportar este paquete se establecen en la figura 24.

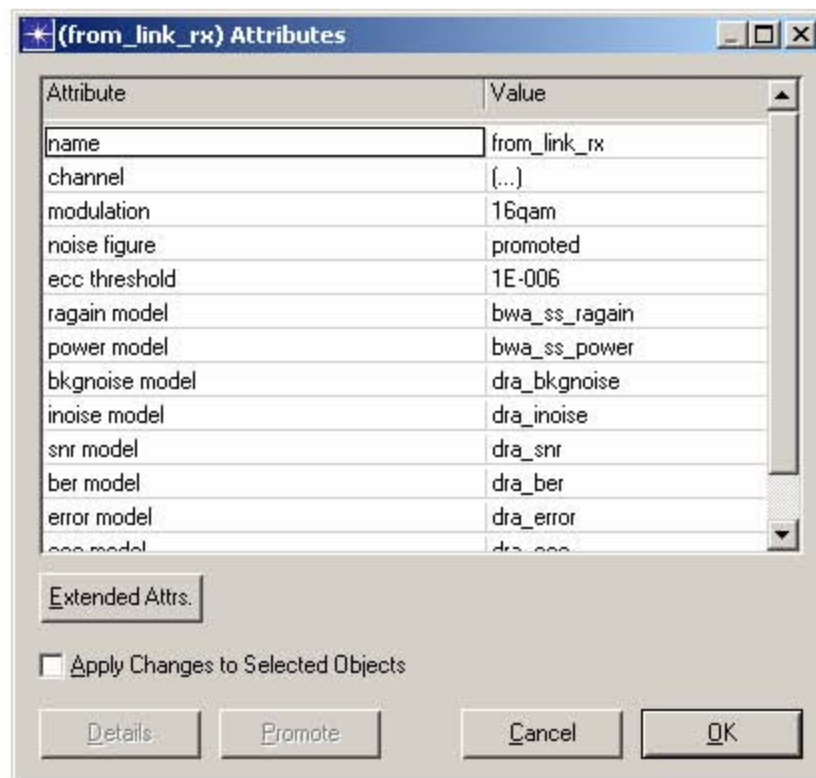


Figura 6 Atributos del canal de bajada.

Entre los principales parámetros que se pueden modificar están: modulación, modelos de propagación a usar y las características de cada uno de canales de bajada utilizados. Para cada canal de bajada se pueden establecer parámetros, tales como: velocidad de transmisión, ancho de banda, frecuencia central, codificación y los formatos de paquetes aceptados.

En los modelos de propagación se establecen las condiciones a establecer para medir características de los paquetes recibidos, como por ejemplo: relación señal a ruido (*SNR*), tasa de *bits* erróneos (*BER*), ruido, potencia y ganancia.

El módulo *from_link_tx* recibe los paquetes enviados por el módulo *MAC* para su transmisión, aquí se establecen las características y la forma en que se van a enviar los

datos. Se establecen parámetros como: modulación, velocidad de transmisión, ancho de banda, frecuencia central y codificación utilizada. Después de pasar por este módulo, los paquetes son enviados a la antena (*ant_tx*) para su envío al medio inalámbrico con las características mencionadas anteriormente.

1.3.5 MAC

El módulo *MAC* es el más importante, éste es una cola que lleva a cabo el procesamiento de los paquetes de información recibidos desde capas superiores en la estación suscriptora así como de aquellos provenientes del canal de transmisión inalámbrico descendente. Este procesamiento incluye: agregar encabezados a los paquetes, programar oportunidades para el acceso al canal inalámbrico, envío de información durante oportunidades garantizadas por la estación base, así como la resolución de colisiones durante periodos de contención.

1.3.5.1 Proceso *Bwa_wm_mgr*

El módulo *MAC* se basa en el modelo de proceso *Bwa_wm_mgr*, el cual realiza las funciones destinadas a la capa de convergencia *MAC* 802.16 tales como: *ranging*, recepción y procesamiento de tráfico de aplicación desde capas superiores, recepción y procesamiento de los paquetes de sincronización, *UCD*, *MAP* y tráfico en el canal descendente provenientes de la estación base.

El proceso sigue los siguientes estados mostrados en la figura 25.

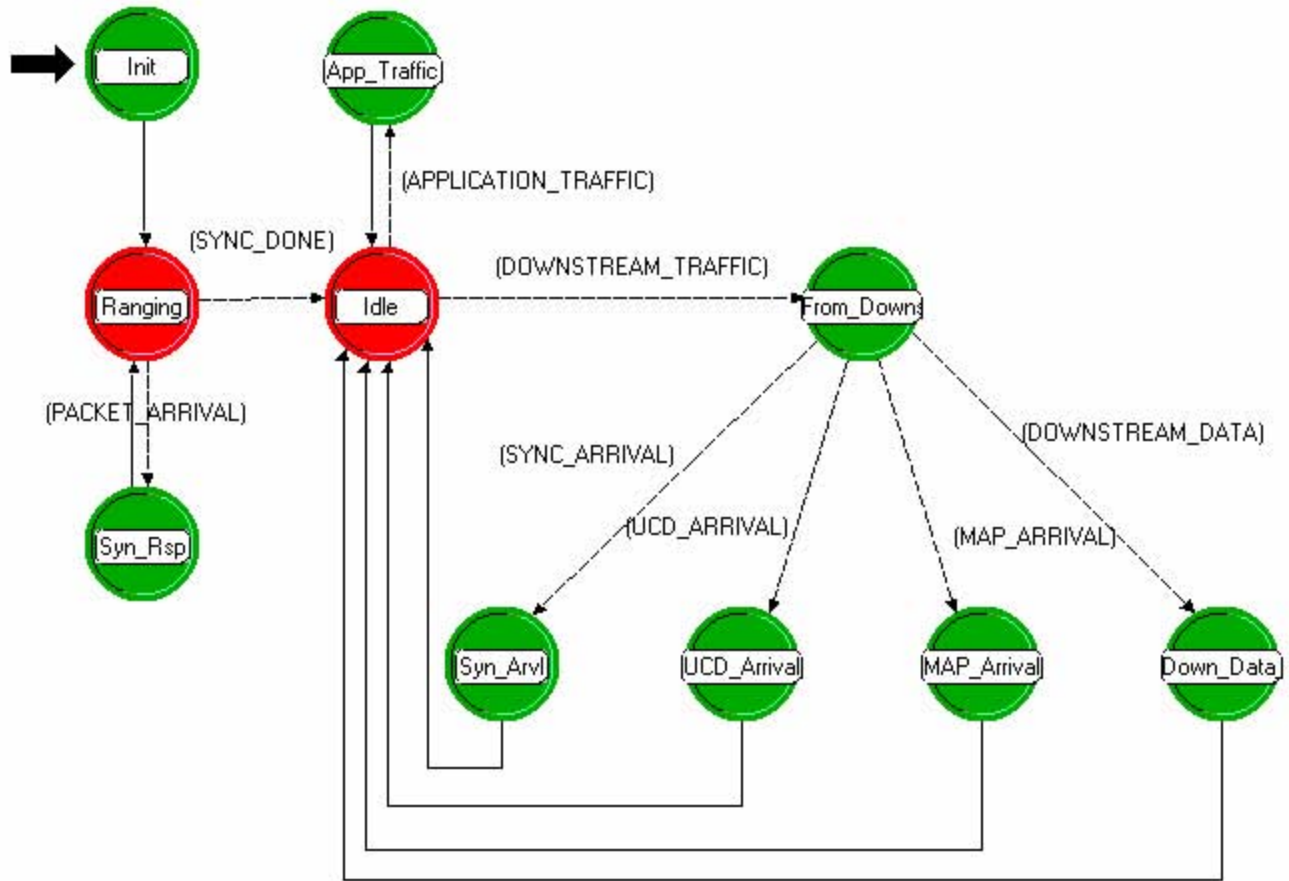


Figura 7 Proceso Bwa_wm_mgr.

□ Init

Se encarga de la obtención de los parámetros iniciales de la estación suscriptora, simula el encendido de la estación. Aquí se obtienen las características que va a tener la estación base y la simulación de la red en general. Se obtienen datos como: instante de *ranging*, tamaño de los paquetes de solicitud de *ranging* y tamaño de los paquetes de control *MAC*.

Aquí se genera el *CID* de la estación base, que es el identificador usado para mantener comunicación con la estación base. Este número es generado por cada estación suscriptora tomando en cuenta un contador que inicia en 1000, y que cada estación suscriptora va incrementando en 1 al entrar a este estado.

Se establece la potencia con la que se va a transmitir a la estación base, esto se hace obteniendo la distancia entre la estación base y la estación suscriptora. Con la distancia se hacen los cálculos del modelo de propagación, descrito posteriormente, en los que se obtiene la potencia mínima de transmisión con base en el *SNR* propuesto en el estándar *IEEE 802.16a* (12 *dB* para modulación *QPSK*, 16.4 *dB* para modulación *16-QAM* y 22.7 *dB* para *64-QAM*).

Al estar usando modulación adaptiva, en este estado se establece el tipo de modulación a usar por la estación suscriptora. Primero se hace el cálculo de la potencia tomando como base el *SNR* para la modulación *64-QAM* (22.7 *dB*), si la potencia obtenida no supera un mínimo establecido en la simulación (1 *Watt*), la estación suscriptora operará con *64-QAM*. Si supera la potencia, entonces se hacen nuevamente los cálculos, sólo que ahora se toma como referencia el *SNR* de *16-QAM* (16.4 *dB*) y de igual manera si la potencia es menor a 1 *Watt*, la estación opera con *16-QAM*. Si la potencia es mayor, entonces la estación hace los mismos cálculos para *QPSK* con 12 *dB*, sólo que aquí si la potencia es mayor a la establecida, la estación es inhabilitada para su transmisión ya que no cubriría las condiciones mínimas de calidad en la transmisión.

Ya que se obtuvieron las características del canal de transmisión se hace el envío del mensaje *RNG-REQ* hacia la estación base y se programa el tiempo de espera para que se reciba la respuesta del mensaje y así terminar con el *Ranging*.

□ Ranging

Ya que se envió el mensaje *RNG-REQ*, la estación espera una respuesta en este estado. La estación suscriptora se mantiene aquí hasta que recibe un paquete de la estación base, si es así la estación cambia al estado *Syn_rsp*.

□ Syn_rsp

Si la estación suscriptora entró a este estado se debió a la recepción de un paquete, aquí se lee el encabezado para saber si es para la estación en cuestión o es para otra. Si el paquete es para otra estación simplemente regresa al estado *Ranging* para seguir esperando, si es de tipo *broadcast* o es dirigido a la estación, se lee el mensaje.

Si el mensaje recibido es *RNG-RSP* entonces se obtienen parámetros tales como el *CID* y dirección de la estación que son guardados para su uso en el envío de futuros mensajes, también se obtiene el retardo registrado en el paquete, para así sincronizarse con la estación base ya que se tenga que enviar información en algún mapa. Ya que se leyó el mensaje se tira el paquete y la estación cambia nuevamente al estado *Syn_rsp*, sólo que ahora cambia al estado *Idle*, por lo que se entiende que el proceso de *ranging* quedó finalizado y se realizó con éxito.



- Idle

La estación suscriptora se mantiene en este estado mientras no reciba o genere un paquete de información. Si la estación recibe un paquete proveniente de la estación base en el canal *downstream*, el proceso se dirige al estado *From_downstream*, en donde es procesado el paquete. En cambio, si se genera un paquete por la estación suscriptora, el proceso cambia al estado *App_traffic* para su envío.

El proceso entra a este estado si ya terminó de hacer el *Ranging* o si ya procesó los paquetes para el canal de subida o bajada.

- From_downstream

Realiza la lectura del encabezado de la trama recibida para ver de qué tipo de paquete se trata. Si recibe un paquete de información el proceso se va al estado *Down_data_traffic*, si se trata de un mapa se va al estado *MAP_Arrival*, si es un mensaje de sincronización se dirige al estado *Syn_arvl* y si es un mensaje *UCD* se dirige a *UCD_Arrival*.

- Down_data_traffic

Este estado procesa el arribo de paquetes de información del canal de bajada. Si la dirección en el encabezado es correcta, la información es enviada a los niveles superiores. En caso contrario, el paquete es destruido.

- MAP_Arrival

Es el encargado del manejo de los mensajes *UL_MAPs*, al recibir este mensaje invoca al modelo de proceso *bwa_wm_child*, explicado posteriormente, el cual se encarga de su procesamiento.

- UCD_Arrival

En este modelo se procesa el arribo de un mensaje *UCD*, proveniente de la estación base, en donde se especifican las características del canal de subida.

- Sync_Arrival

En este modelo se procesa el arribo de un mensaje de sincronización proveniente de la estación base. En la simulación la sincronización por medio de este mensaje no es necesaria por lo que el paquete recibido simplemente se destruye.

□ App_Traffic

Aquí se procesa el arribo de un paquete de información proveniente de niveles superiores, generado por el módulo *src_type_1*. Este modelo invoca el proceso *bwa_wm_child*, ya que este proceso se encarga del procesamiento de los paquetes para su envío.

1.3.5.2 Proceso *Bwa_wm_child*

El proceso hijo *Bwa_wm_child* se encarga de procesar y redirigir los paquetes provenientes de la estación base de tipo *MAP* y los paquetes generados por las fuentes de información de aplicación. Cada vez que el módulo *MAC* de una estación suscriptora recibe alguno de estos paquetes, invoca este proceso desde los estados *App_Traffic* o *MAP_Arrival*. El proceso contempla una cola *FIFO (First In, First Out)* mediante la cual se atienden los paquetes conforme se reciben. Se incluyen funciones para la resolución de colisiones, en específico, el algoritmo *Exponential Backoff*.

La figura 26 muestra los estados que sigue el proceso:

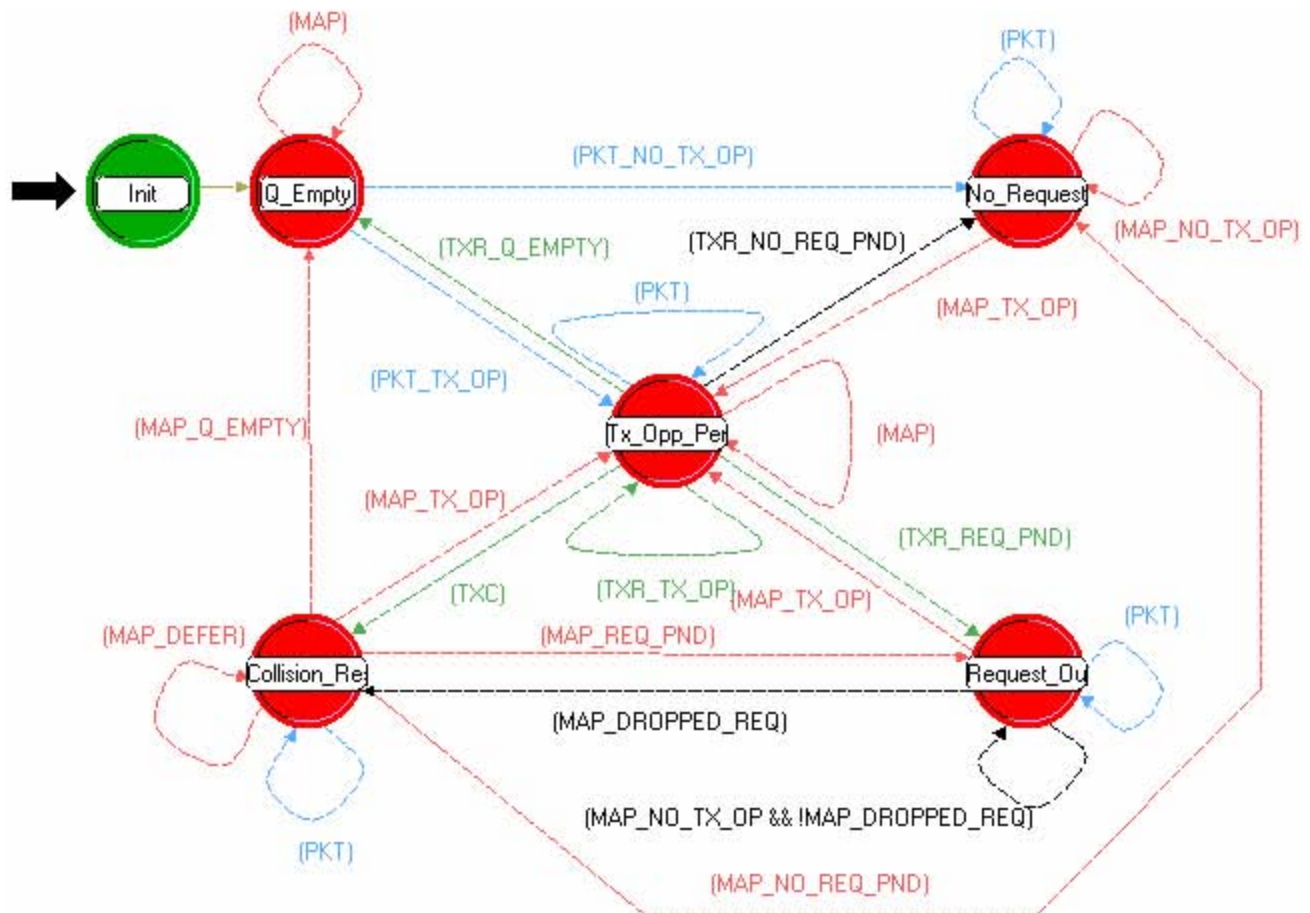


Figura 8 Proceso Bwa_wm_child.

□ Init

Es el encargado de obtener los parámetros iniciales de la estación suscriptor para la simulación, aquí se establecen variables iniciales tales como: servicio establecido para la estación, velocidad de transmisión, tiempo en segundos de cada slot, CID y tamaño de los encabezados a usarse.

Las variables establecidas en el estado son útiles para el desarrollo de la simulación.

□ Q_Empty

El proceso se mantiene en este estado mientras no tiene un paquete esperando en la cola. Permanece aquí hasta que recibe un paquete, si el paquete es un mapa de la estación base, simplemente lo lee, guarda su información y desecha el paquete, el proceso se mantiene en este estado.

Si se recibe un paquete de información proveniente de las capas superiores, cambia de estado. Si la estación suscriptor esta generando tráfico de voz y tiene habilitado UGS como calidad de servicio entonces se dirige al estado Tx_Opp_Pending.

Si la estación no tiene habilitado *UGS* o genera un tipo de tráfico distinto, como por ejemplo tráfico de Internet, entonces se dirige al estado *No_Request_Outstanding*.

□ *No_Request_Outstanding*

Aquí la estación suscriptora busca una oportunidad de transmisión en la región de contención en el mapa para enviar la petición de ancho de banda requerida para el envío de los datos. Realiza el cómputo del tamaño de la carga y sus encabezados, ya que tiene el tamaño del paquete total en *bytes* hace la conversión a *slots*, tomando en cuenta que cada slot es de 16 *bytes*, para hacer la solicitud de ancho de banda en *slots* a la estación base.

En el modelo implementado existen tres regiones de contención, una para cada tipo de modulación empleada (*QPSK*, *16-QAM* y *64-QAM*). La estación base primero busca esta región en el mapa, si todavía está a tiempo de enviar una petición en esta región, realiza el algoritmo *Exponential Backoff* para encontrar el slot en el que transmitirá su petición.

Si la región de contención ya pasó o el algoritmo produjo un número fuera de esta región, entonces la estación busca en la región de *padding* otra oportunidad de transmisión. Esta región fue habilitada como contención para todas las modulaciones, por lo que todas las estaciones suscriptoras podrán enviar solicitudes en esta región. De igual forma corre el algoritmo *Exponential Backoff* para ver si puede transmitir su petición.

Si se encontró una oportunidad de transmisión en el mapa entonces el proceso se dirige al estado *Tx_Opp_Pending*, si no encontró una oportunidad de transmisión se mantiene en este estado en la espera de nuevos mapas para intentar la transmisión.

□ *Tx_Opp_Pending*

En este estado la estación suscriptora realiza el envío de los paquetes de información *UGS* y solicitudes de ancho de banda para datos de otro tipo. Aquí la estación suscriptora pone los encabezados a los paquetes a enviarse y espera el tiempo indicado para su transmisión.

El proceso se mantiene en este estado hasta que los paquetes que ya tienen asignado un slot para su transmisión son enviados. Aquí se realizan procesos como la concatenación, en los que varios paquetes son enviados a la vez con un único encabezado. También se realizan funciones de *Piggyback*, en esta función si se requieren enviar más paquetes de información a la estación base se hace la solicitud de ancho de banda en el último paquete de información enviado.

Cada vez que se envía un paquete, la estación suscriptora inicia o actualiza un contador en el cual se establece el número de intentos que ha realizado la estación suscriptora para la transmisión del paquete.

Al terminar de enviar los paquetes el proceso se dirige al estado *Collision_Resolution*. Si en la cola todavía existen paquetes la estación ve su estado, si son paquetes que ya enviaron su solicitud de ancho de banda pero todavía no es atendida el proceso entra al estado *Request_Outstanding*, si en el proceso la estación suscriptora generó un paquete de información en las capas superiores el proceso se va al estado *No_Request_Outstanding* para la generación del mensaje de solicitud de ancho de banda.

□ Collision_Resolution

Mantiene el seguimiento de los paquetes enviados hacia la estación base, es el estado encargado de la detección y resolución de colisiones en la estación suscriptora mediante la lectura de los mapas y mensajes enviados por la estación base.

Si el paquete que se envió fue un mensaje de solicitud de ancho de banda, entonces la estación suscriptora leerá todos los mapas en busca de la asignación dada por la estación base. Si la red está saturada y la estación base recibe una solicitud de ancho de banda, que no puede ser asignado, manda un mensaje de confirmación de recepción de la solicitud hacia la estación suscriptora. Cuando recibe la confirmación de recepción o ya se concedió el ancho de banda en algún mapa, entonces los paquetes enviados son desechados, ya que se considera que la transmisión fue exitosa. Si se hizo la asignación de ancho de banda y no existen paquetes en la cola, entonces el proceso se dirige al estado *Q_Empty*; si se recibió un mensaje de confirmación indicando la recepción de la solicitud pero no la asignación de ancho de banda, entonces el proceso se dirige al estado *No_Request_Outstanding*.

Si no se recibió la asignación de ancho de banda y no existió un mensaje de confirmación de recepción enviado por la estación base, la estación base repetirá la búsqueda en cada mapa recibido hasta que encuentre la asignación o el mensaje, si esto no ocurre y se vence el tiempo de espera para su recepción, entonces la estación suscriptora determina que ha ocurrido una colisión, por lo que buscará una nueva oportunidad de transmisión del mensaje mediante el uso del algoritmo *Exponential Backoff*. Si esto ocurre entonces el proceso se dirige al estado *Tx_Opp_Pending* para el nuevo envío del paquete.

□ Request_Outstanding

Al entrar a este estado una solicitud de ancho de banda ha sido previamente hecha, pero aún no ha sido atendida, en este estado la petición se mantiene en una cola y se espera una confirmación dentro de un mapa por parte de la estación base para su transmisión.

Cada mapa enviado por parte de la estación base es analizado para obtener información de las peticiones que ya están esperando en la cola, si algún dato corresponde con el *CID* de la estación suscriptora que envió el mensaje, se analiza la información almacenada y

demás parámetros para calcular el tiempo de propagación entre la estación base y la suscriptor y así programar el tiempo justo de transmisión.

En caso de que no se encontrara la información necesaria en alguno de los mapas para procesar la información y el tiempo máximo para la recepción de confirmación fuera excedido por aquel que se registró en la petición de ancho de banda, se asume una colisión y se inicia el algoritmo *Exponential Backoff* para reenviar la solicitud.

1.4 Conclusiones

En este capítulo los parámetros que se le asignan a cada módulo están basados en el comportamiento descrito en el estándar *IEEE 802.16* y programados de manera tal que reflejen los aspectos contemplados en él y permitan modificaciones que busquen mejorar su desempeño.

Nuestro proyecto considera técnicas de modulación adaptiva para optimizar el uso de ancho de banda e incrementar el número de usuarios en la red sin que el rango de cobertura se vea afectado. Ya que el estándar considera varias técnicas de modulación (*QPSK*, *16-QAM* y *64-QAM*), hacemos uso de ellas para obtener los beneficios que cada una de ellas provee. Esto se ve reflejado en un valor de *throughput* promedio debido al uso de velocidades de transmisión distintas.

En el modelo de simulación no se contemplan todas las funciones establecidas en el estándar *IEEE 802.16*, únicamente hace referencia a aquellas que permiten la comunicación entre las estaciones suscriptoras y la estación base, así como el intercambio de información entre ellas; lo que permite que los resultados obtenidos a partir de las simulaciones sean confiables y apegadas a la realidad en un sistema similar.

Análisis de Técnicas de Modulación Adaptiva
en Redes Inalámbricas de Banda Ancha
(IEEE 802.16, WiMAX)

Capítulo 6

Resultados





1.1 Introducción

En este capítulo se da una descripción detallada de todos los parámetros que se tomaron en cuenta para poder modelar una red *BWA* con 500 nodos fijos distribuidos aleatoriamente en un radio de 5km.

Para que la comunicación entre estación base y estaciones suscriptoras fuera posible y legible se contemplaron todos los agentes que iban a intervenir en la transmisión de una señal, entre ellos tenemos el terreno a través del cual iba a viajar, si era plano lleno de arbustos o montañoso, también se contempló el desvanecimiento de la señal, los efectos por multi trayectoria y los valores de *BER* y *SNR* adecuados.

También se presentan los resultados teóricos que pensábamos obtener sobre el comportamiento de la red, simulando tráfico de Internet en ella, los cuales son bastante aproximados a aquellos que obtuvimos mediante las simulaciones en *OPNET*.

Finamente se muestran los resultados obtenidos con la simulación en forma de gráficas que modelan el comportamiento del *throughput* y retardo para modelos con y sin modulación adaptiva implementada. Para de esta forma poder ver los beneficios de implementar técnicas de modulación adaptiva en una red inalámbrica de banda ancha.

1.2 Modelo de propagación

Un requerimiento importante para tener acceso a la tecnología *BWA* es tener una descripción precisa de los canales inalámbricos, ya que estos dependen en gran medida de su arquitectura.

El canal inalámbrico está caracterizado por:

- Pérdidas por trayectoria (*PL*, *Path loss*).
- Retraso por multitr trayectorias.
- Desvanecimiento
- Interferencia co-canal y de canal adyacente

Para construir el modelo de propagación se toman en cuenta distintos parámetros, tales como: el terreno, la densidad de los árboles, la altura de la antena y su ancho de haz, la velocidad del viento e incluso características como la estación del año en la que nos encontremos.

Existen tres categorías para simular la pérdida causada por la trayectoria. La primera de ellas es la categoría A determinada por un terreno montañoso que va de una densidad de árboles moderada a una espesa. Otra de las categorías se distingue por tener la menor pérdida en sus trayectorias es la C, ya que cuenta con características de terreno plano con una ligera densidad de árboles. Finalmente, con características de terreno

intermedias entre las dos anteriores se define la categoría B; Error! No se encuentra el origen de la referencia. y ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..

El cálculo de la pérdida por trayectoria se puede modelar para distintos valores de distancia, como se define en la ecuación (10), tomando en cuenta un valor inicial d_0 (típicamente con un valor de 100m). La pérdida está dada por:

$$PL = A + 10\gamma \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) + s \quad \text{para } d > d_0 \quad (10)$$

En donde s es el factor de sombra cuyo valor oscila entre 8.2 y 10.6 dB dependiendo del tipo de terreno y A está representado por:

$$A = 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi d_0}{\lambda} \right) \quad (11)$$

Siendo λ la longitud de onda en metros $\lambda = \frac{vel_{-}luz}{f}$ y γ el exponente de pérdida por trayectoria, con:

$$\gamma = a - bh_b + \frac{c}{h_b} \quad (12)$$


h_b es la altura de la estación base en metros (típicamente entre 10 y 80 m) y a , b y c son constantes que dependen de la categoría del terreno tal como se muestra en la tabla 5.

Constantes	Categorías		
	A	B	C
a	4.6	4	3.6
b	0.0075	0.0065	0.005
c	12.6	17.1	20

Tabla 1 Parámetros del exponente de pérdida por trayectoria.

El modelo descrito anteriormente fue diseñado para frecuencias cercanas a 2GHz y antenas receptoras de 2m de altura aproximadamente. Para poder adaptar el modelo a frecuencias mayores y antenas con alturas entre 2 y 10 m se incluyen factores de pérdida por frecuencia (C_f) y altura de la antena (C_h) en la ecuación anterior, siendo el modelo modificado:

$$PL = A + 10\gamma \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) + s + C_f + C_h \quad (13)$$



Cada uno definido por:

$$C_f = 6 \log_{10} \left(\frac{f}{2000} \right) \quad (14)$$

En donde f es la frecuencia en MHz y

$$C_h = -10.8 \log_{10} \left(\frac{h}{2} \right) \text{ para categorías A y B.} \quad (15)$$

$$C_h = -20 \log_{10} \left(\frac{h}{2} \right) \text{ para categoría C.} \quad (16)$$

donde h es la altura de la antena en metros.

En nuestro modelo de simulación tenemos los siguientes datos:

$d_0 = 100 \text{ (m)}$	$h = 1.5 \text{ (m)}$	$f = 2.55 \text{ (GHz)}$
$s = 8.2 \pm 1.6 \text{ (dB)}$	$h_b = 50 \text{ (m)}$	$\lambda = 0.1176 \text{ (m)}$

Por lo que la pérdida por trayectoria para cada categoría es mostrada en la figura 27:

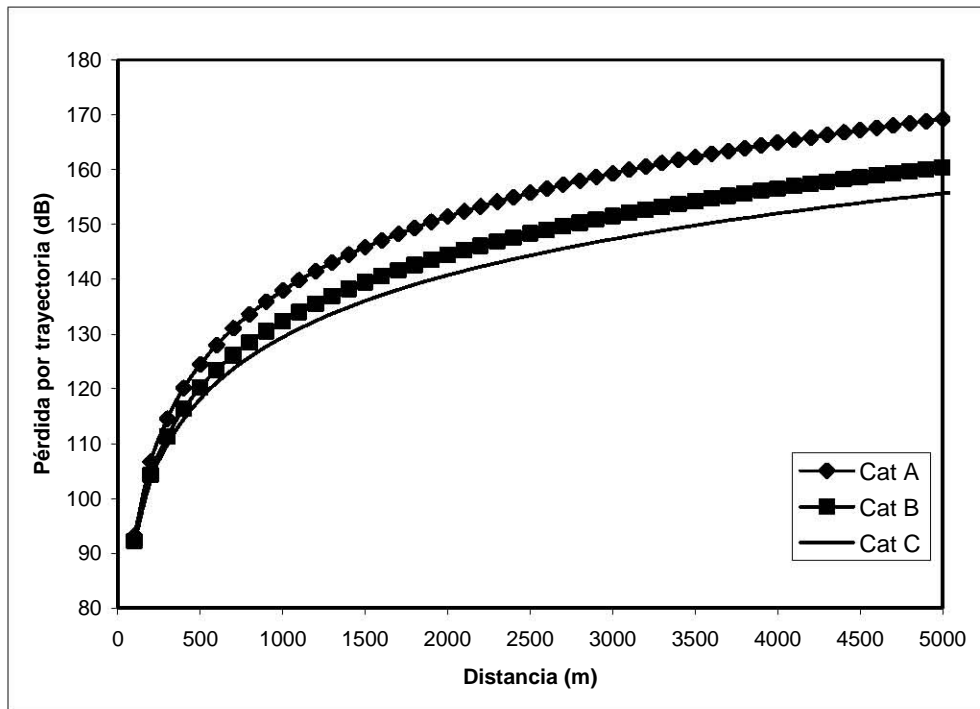


Figura 1 Gráfica de la pérdida por trayectoria en función de la distancia.

1.3 Cálculo del SNR

Para calcular el SNR es necesario tomar en cuenta varios parámetros en el canal de transmisión, en los que se incluyen las ganancias de las antenas transmisora y receptora, la potencia de transmisión y recepción, la pérdida por trayectoria y el ruido existente.

La potencia de recepción está dada por:

$$P_{rec} [dB] = P_{tx} + BS_G + SS_G - PL \quad (17)$$

Donde P_{tx} es la potencia de transmisión, BS_G es la ganancia de la antena de la estación base (15dB), SS_G la ganancia de la antena de la estación suscriptora (18dB) y PL que es la pérdida por trayectoria, dada por la ecuación (13).

Además de estos factores interviene otro parámetro definido como ruido térmico.

$$Ruido_térmico = 10\log(290 * noise_figure * BW * 1.379 * 1x10^{-23}) \quad (18)$$

BW se refiere al ancho de banda y $noise_figure$ al valor de figura de ruido empleada.

Finalmente la relación señal a ruido se define como:

$$SNR = P_{rec} - \text{Ruido}_{\text{térmico}} \quad (19)$$

El *SNR* mínimo obtenido con una potencia de transmisión de 1 Watt en función de la distancia para cada terreno está representado en la figura 28:

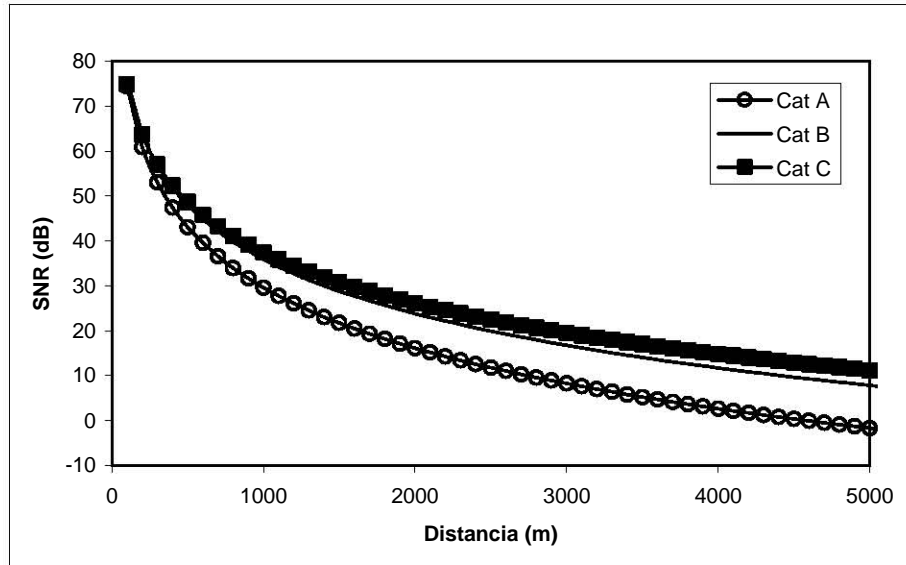



Figura 2 Gráfica del *SNR* en función de la distancia.

El *SNR* determina el valor de *BER* para cada modulación usada en la transmisión. Para que ésta cuente con una buena calidad se necesita que el valor del *BER* sea menor a 1×10^{-6} .

Para que cada modulación pueda tener características de transmisión óptimas sus valores en el *SNR* deben cumplir con la condición anterior del *BER*, pero debido a que el tipo de modulación asignada a cada usuario depende en gran medida de su distancia con respecto a la estación base, el *SNR* es cambiante para cada una de ellas. Se elaboraron gráficas que representan el comportamiento del *BER* contra el *SNR* para cada modulación.

El modelo elaborado en *OPNET* ya contenía una tabla de modulación que representaba el comportamiento de *QPSK*; sin embargo no existían para las modulaciones *16-QAM* y *64-QAM*.

Para elaborar el modelo que representara su comportamiento nos basamos en las ecuaciones (20) y (21):



$$BER_{16-QAM} = \frac{3}{8} \operatorname{erfc}\left(\sqrt{\frac{2}{5} SNR}\right) + \frac{1}{4} \operatorname{erfc}\left(3\sqrt{\frac{2}{5} SNR}\right) - \frac{1}{8} \operatorname{erfc}\left(5\sqrt{\frac{2}{5} SNR}\right) \quad (20)$$

$$BER_{64-QAM} = \frac{7}{24} \operatorname{erfc}\left(\sqrt{\frac{1}{7} SNR}\right) + \frac{1}{4} \operatorname{erfc}\left(3\sqrt{\frac{1}{7} SNR}\right) - \frac{1}{24} \operatorname{erfc}\left(5\sqrt{\frac{1}{7} SNR}\right) \quad (21)$$

$$+ \frac{1}{24} \operatorname{erfc}\left(9\sqrt{\frac{1}{7} SNR}\right) - \frac{1}{24} \operatorname{erfc}\left(13\sqrt{\frac{1}{7} SNR}\right)$$

En donde:

$$\operatorname{erfc}(x) = \exp\left(\frac{-x^2}{\sqrt{\pi x}}\right) \quad (22)$$

Las gráficas se presentan en la figura 29:

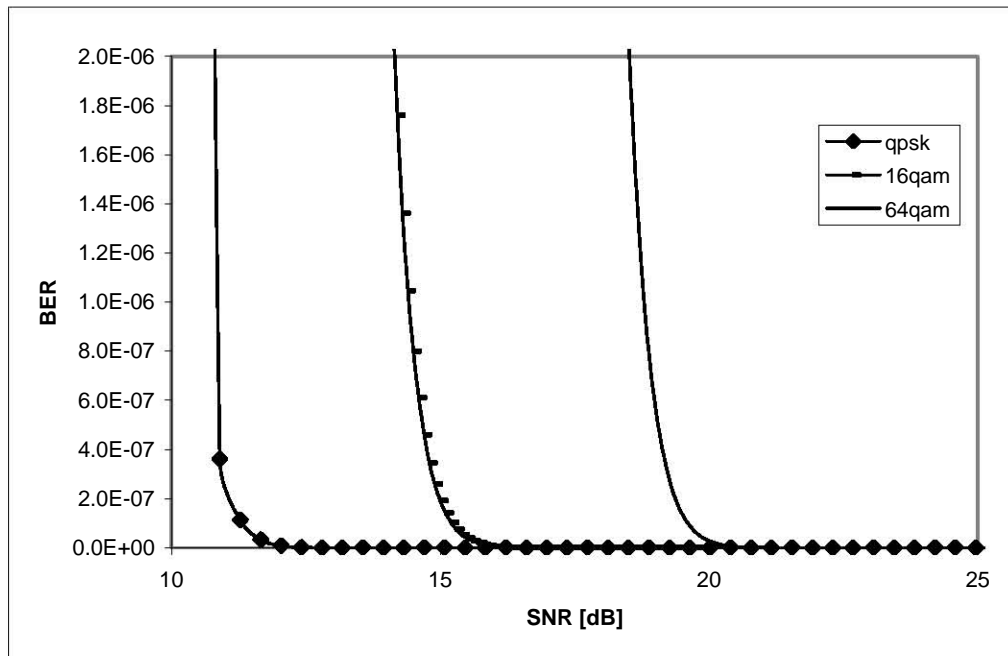


Figura 3 Gráfica del BER en función del SNR.

Si tomamos como referencia el valor de 1×10^{-6} como el valor mínimo aceptado para el BER tenemos que para cada modulación la distancia máxima existente entre un usuario y la estación base en la red se muestra en tabla 6:

Modulación/mínSNR	Distancia [km]		
	Cat A	Cat B	Cat C
QPSK/12dB	2.5	3.8	4.9
16-QAM/16.4dB	2	2.9	3.7
64-QAM/22.7dB	1.6	2.3	2.9

Tabla 2 Rango de alcance para cada modulación.

Una vez implementadas las técnicas de modulación QPSK, 16-QAM y 64-QAM en el modelo de OPNET (ver apéndice A) se corrieron las simulaciones necesarias para obtener los resultados del comportamiento de la red, enfatizando parámetros como el throughput y el retardo que va íntimamente ligado al número máximo de usuarios soportados.

1.4 Modelo de simulación

En el modelo de simulación vemos el desempeño de la red empleando tráfico de Internet, este tráfico ya ha sido modelado con base en el tamaño de los paquetes y su probabilidad de ocurrencia. Esta distribución se muestra en la siguiente figura 30.

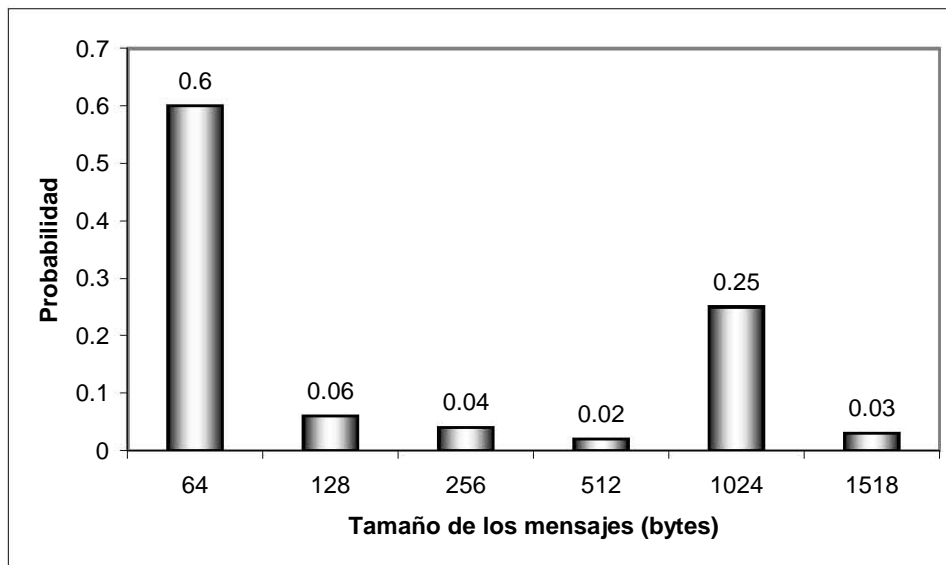


Figura 4 Distribución de probabilidad en los mensajes.

El tamaño de los mensajes mostrado en la gráfica corresponde al *frame* en la capa *MAC*, en la capa de convergencia *IEEE 802.16 MAC* se agrega un encabezado de 6 *bytes* por lo que el tamaño del paquete a enviar por el medio físico es mayor y es el que se toma en cuenta para el envío de peticiones a la estación base.

La estación suscriptora hace la conversión del tamaño del paquete de *bytes* a *slots*, ya que la solicitud de ancho de banda se hace en *slots*. En el estándar se manejan diferentes tamaños como 2, 4, 8, 16, 32, 64 y 128 para el tamaño de cada *slot*, pero el más utilizado es el de 16 *bytes*. A continuación se presenta la tabla 7 que muestra el número de *slots* correspondientes al número de *bytes* de cada paquete generado, utilizando el tamaño de 16 *bytes* para cada *slot*.

Tamaño del paquete (bytes)	Slots requeridos	Probabilidad de ocurrencia
64	7	0.6
128	11	0.06
256	19	0.04
512	35	0.02
1024	69	0.25
1518	101	0.03

Tabla 3 Slots requeridos para cada paquete.

Con base en la tabla 7 podemos hacer una estimación del tamaño promedio de los paquetes a enviar por cada estación suscriptora. Este promedio es:

$$\begin{aligned} \text{Tamaño} &= (64 * 0.6) + (128 * 0.06) + (256 * 0.04) + (512 * 0.02) \\ &+ (1024 * 0.25) + (1518 * 0.03) = 368.1 \text{ bytes} \end{aligned} \quad (23)$$

$$\begin{aligned} \text{Tamaño(slots)} &= (7 * 0.6) + (11 * 0.06) + (19 * 0.04) + (35 * 0.02) + \\ &(69 * 0.25) + (101 * 0.03) = 26.6 \text{ slots} \end{aligned} \quad (24)$$


Ya que la estación suscriptora puede enviar paquetes fragmentados hay que tomar en cuenta dos *slots* más por cada fragmentación. Aproximadamente sólo la mitad de los paquetes generados en la red se fragmentan, podemos considerar un *slot* más por cada uno. Así el tamaño promedio de cada paquete es de 27.6 *slots*.

El tráfico generado para cada estación puede ser de 32 o 64 kbps. En *OPNET*, esto se puede establecer mediante el tiempo de arribo entre cada paquete (*Packet interarrival time*), si sabemos el tamaño promedio de cada paquete y el tráfico generado, tenemos que el tiempo de arribo entre cada paquete es:

$$\text{Packet_Interarrival_time} = \frac{368.1 * 8 \frac{\text{bits}}{\text{paquete}}}{32000 \frac{\text{bits}}{\text{seg}}} = 0.092 \frac{\text{seg}}{\text{paquete}} \quad (25)$$

$$\text{Packet_Interarrival_time} = \frac{368.1 * 8 \frac{\text{bits}}{\text{paquete}}}{64000 \frac{\text{bits}}{\text{seg}}} = 0.046 \frac{\text{seg}}{\text{paquete}}$$

Para saber el número máximo de usuarios que soporta la red nos basamos en el tiempo utilizado en cada mapa. Sabemos que un usuario genera un paquete cada 0.092 o 0.046 segundos, según sea el caso, sabemos que este paquete va a ocupar en promedio 27.6 *slots*. Por lo que el ancho de banda consumido por cada tipo de usuario es:



$$bw = No_SS_por_modulación \left(\frac{Tamaño_del_paquete \left(\frac{slots}{paq} \right)}{Packet_interarrival_time \left(\frac{seg}{paq} \right)} \right) = bw \left(\frac{slots}{seg} \right) \quad (26)$$

Si queremos ver el ancho de banda consumido en cada mapa, sabiendo que un mapa se genera cada 2 milisegundos, entonces:

$$bw = \frac{bw \left(\frac{slots}{seg} \right)}{\frac{1mapa}{0.002seg}} = bw \left(\frac{slots}{mapa} \right) \quad (27)$$

Debido a que cada tipo de modulación cuenta con una velocidad de transmisión distinta (9.6 Mbps para QPSK, 19.2 Mbps para 16-QAM y 28.8 Mbps para 64-QAM), el tiempo que ocupan para enviar datos de la misma longitud en el mapa es distinto para cada una de ellas. Así que el tiempo consumido para transmitir información está dado por:

$$Map_time(seg) = 16 * 8 * \left(\frac{bw_{QPSK}}{9.6Mbps} + \frac{bw_{16-QAM}}{19.2Mbps} + \frac{bw_{64-QAM}}{28.8Mbps} \right) \quad (28)$$

El cálculo del *throughput* en la red en la capa MAC se obtiene mediante:

$$Throughput (kbps) = No_SS * tráfico_generado (kbps) \quad (29)$$

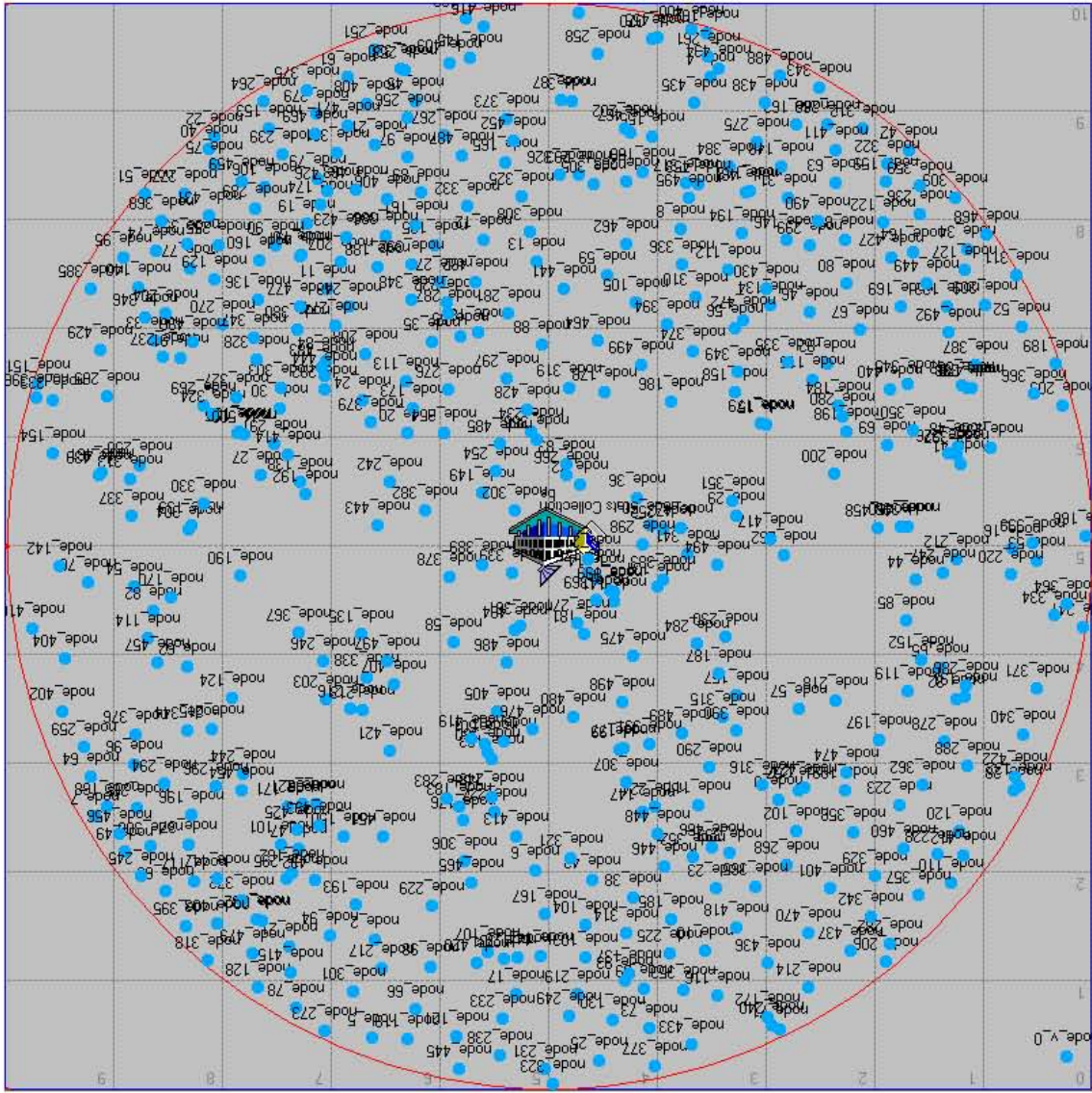
1.4.1 Diseño de la Red

Se generó una red con 500 usuarios fijos, atendidos por una estación base que cubría un radio de 5km. La distribución de los usuarios a lo largo de la red se hizo de manera aleatoria, para así tratar de simular una red apegada a la realidad. El tipo de terreno usado para todas las simulaciones fue de categoría C.

Una de las primeras simulaciones de donde obtuvimos resultados es aquella en la que se implementaron las técnicas de modulación adaptiva, simplemente se tenían redes en donde todos los usuarios generaban tráfico de Internet y pertenecían a un sólo tipo de modulación.

1.5 Resultados obtenidos sin utilizar modulación adaptiva

Figura 5 Red BWA de 500 nodos.



La red generada es la mostrada en la figura 31.



En las gráficas siguientes podemos observar que dependiendo del tipo de modulación usada el *throughput* máximo obtenido varía en proporciones definidas; entre *QPSK* y *16-QAM* esta relación es el doble, mientras que para *64-QAM* se va al triple de lo que se obtuvo en *QPSK* debido a la velocidad de transmisión usada en cada caso.

Para la modulación *QPSK* tenemos una velocidad de 9.6 Mbps, lo que resulta en un total de 150 *slots* por cada mapa, en donde 7 de ellos son de contención; para *16-QAM* se tiene una velocidad de transmisión de 19.2 Mbps, con 300 *slots* por mapa, 14 de ellos usados para contención. Finalmente para *64-QAM* se tiene una velocidad de transmisión de 28.8 Mbps, generando 450 *slots* por mapa, 21 de ellos de contención.

Al ver el número de *slots* por mapa podemos ver que la capacidad es mayor dependiendo del tipo de modulación usada, lo que genera mayor capacidad de usuarios en la red. Como el tiempo usado para contención en cada caso es siempre el mismo (93.33 μ s), la capacidad de la red queda determinada por el tiempo usado para la transmisión de datos.

Teóricamente los resultados son:

□ Modulación *QPSK*

En la tabla 8 podemos observar que el número máximo de usuarios soportados por la red es de 119 (momento en el que se acaba el mapa ya que su duración es sólo de 2ms) con un tráfico de 64 kbps por usuario, generando un *throughput* máximo de 7.808 Mbps.

El cálculo correspondiente al tiempo de petición para cierto número de *slots* se efectuó de la siguiente manera:

$$Duración_de_un_slot(seg) = \frac{16 * 8(bits)}{vel_tx_qpsk \left(\frac{bits}{seg} \right)} \quad (30)$$

$$Tiempo_de_petición(seg) = Duración_de_slot(seg) * No_slots \quad (31)$$

Usuarios	Slots	Throughput (kbps)	Tiempo de petición	Slots de contención	Tiempo de contención	Map_time
10	12	640000	0.00016	7	9.33333E-05	0.000253333
20	24	1280000	0.00032	7	9.33333E-05	0.000413333
30	36	1920000	0.00048	7	9.33333E-05	0.000573333
40	48	2560000	0.00064	7	9.33333E-05	0.000733333
50	60	3200000	0.0008	7	9.33333E-05	0.000893333
60	72	3840000	0.00096	7	9.33333E-05	0.001053333
70	84	4480000	0.00112	7	9.33333E-05	0.001213333
80	96	5120000	0.00128	7	9.33333E-05	0.001373333
90	108	5760000	0.00144	7	9.33333E-05	0.001533333

100	120	6400000	0.0016	7	9.33333E-05	0.001693333
110	132	7040000	0.00176	7	9.33333E-05	0.001853333
115	138	7680000	0.00184	7	9.33333E-05	0.001933333
118	142	7744000	0.00189333	7	9.33333E-05	0.001986667
119	143	7808000	0.00190667	7	9.33333E-05	0.002
120	144	7872000	0.00192	7	9.33333E-05	0.002013333
121	146	7744000	0.00194667	7	9.33333E-05	0.00204

Tabla 4 Cálculos teóricos para QPSK.

□ Modulación 16-QAM

Para la tabla 9 el número máximo de usuarios soportados por la red es de 238 con un tráfico de 64 kbps por usuario, generando un *throughput* máximo de 15.2Mbps.

Usuarios	Slots	Throughput (kbps)	Tiempo de petición	Slots de contención	Tiempo de contención	Map_time
120	144	7680000	0.00096	14	9.33333E-05	0.001053333
130	156	8320000	0.00104	14	9.33333E-05	0.001133333
140	168	8960000	0.00112	14	9.33333E-05	0.001213333
150	180	9600000	0.0012	14	9.33333E-05	0.001293333
160	192	10240000	0.00128	14	9.33333E-05	0.001373333
170	204	10880000	0.00136	14	9.33333E-05	0.001453333
180	216	11520000	0.00144	14	9.33333E-05	0.001533333
190	228	12160000	0.00152	14	9.33333E-05	0.001613333
200	240	12800000	0.0016	14	9.33333E-05	0.001693333
210	252	13440000	0.00168	14	9.33333E-05	0.001773333
220	264	14080000	0.00176	14	9.33333E-05	0.001853333
230	276	14720000	0.00184	14	9.33333E-05	0.001933333
235	282	15040000	0.00188	14	9.33333E-05	0.001973333
236	284	15104000	0.00189333	14	9.33333E-05	0.001986667
237	285	15168000	0.0019	14	9.33333E-05	0.001993333
238	286	15232000	0.00190667	14	9.33333E-05	0.002
239	287	15296000	0.00191333	14	9.33333E-05	0.002006667

Tabla 5 Cálculos teóricos para 16-QAM.

□ Modulación 64-QAM

En la tabla 10 el número máximo de usuarios soportados por la red es de 357 con un tráfico de 64 kbps por usuario, generando un *throughput* máximo de 22.84Mbps.

Usuarios	Slots	Throughput (kbps)	Tiempo de petición	Slots de contención	Tiempo de contención	Map_time
250	300	16000000	0.001333333	21	9.33333E-05	0.00142667
251	302	16064000	0.001342222	21	9.33333E-05	0.00143556
252	303	16128000	0.001346667	21	9.33333E-05	0.00144
253	304	16192000	0.001351111	21	9.33333E-05	0.00144444
260	312	16640000	0.001386667	21	9.33333E-05	0.00148
270	324	17280000	0.00144	21	9.33333E-05	0.00153333
280	336	17920000	0.001493333	21	9.33333E-05	0.00158667
290	348	18560000	0.001546667	21	9.33333E-05	0.00164
300	360	19200000	0.0016	21	9.33333E-05	0.00169333
310	372	19840000	0.001653333	21	9.33333E-05	0.00174667
320	384	20480000	0.001706667	21	9.33333E-05	0.0018
330	396	21120000	0.00176	21	9.33333E-05	0.00185333
340	408	21760000	0.001813333	21	9.33333E-05	0.00190667
350	420	22400000	0.001866667	21	9.33333E-05	0.00196
355	426	22720000	0.001893333	21	9.33333E-05	0.00198667
357	429	22848000	0.001906667	21	9.33333E-05	0.002

Tabla 6 Cálculos teóricos para 64-QAM.

Los resultados obtenidos a partir de la simulación (OPNET) son los mostrados en las figuras 32 y 33:

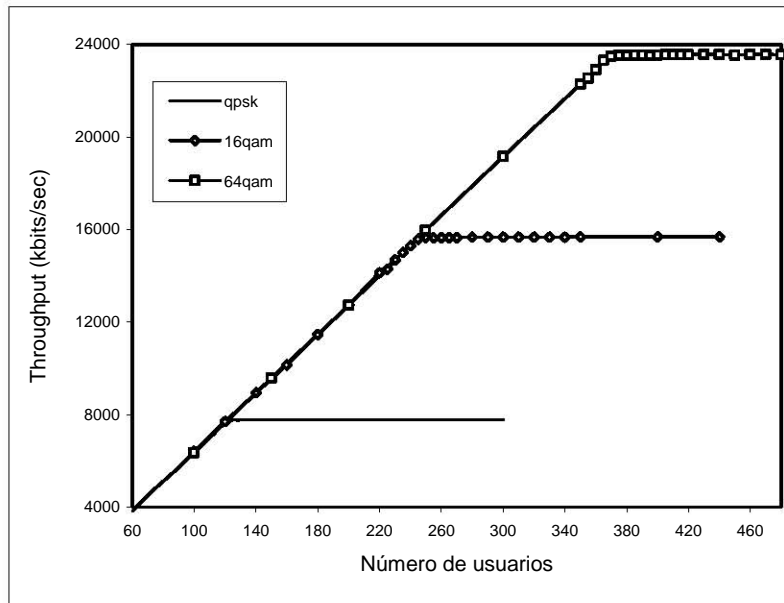


Figura 6 Throughput alcanzado sin modulación adaptiva.

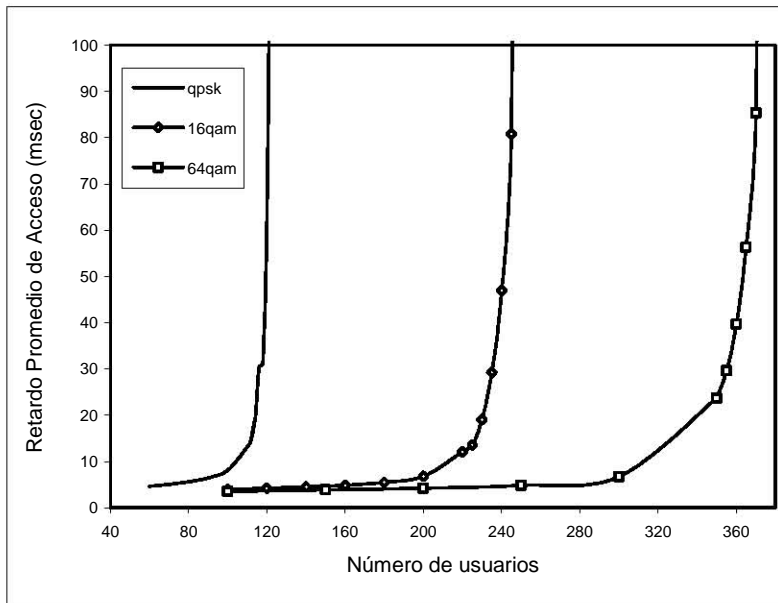


Figura 7 Retardo resultante sin usar modulación adaptiva.

Los puntos obtenidos en la simulación, difieren un poco de los valores teóricos. Una de las razones es que mientras en la teoría se considera que todas las estaciones suscriptoras siempre generarán un tráfico de 64kbps en el modelo de simulación ese valor es aleatorio con máximo de 64kps. Sin embargo, la red sigue el mismo comportamiento.

Para la modulación QPSK el número máximo de usuarios es de 120 con un *throughput* de 7.78Mbps, para el caso de 16-QAM el número máximo de usuarios fue de 250 con un *throughput* de 15.66Mbps y finalmente para 64-QAM el número máximo de usuarios fue de 380 con un *throughput* de 23.3Mbps.

Para el caso del retardo los valores de estos son imperceptibles hasta el momento en que la red se satura, punto en el cual el retardo comienza a crecer de forma exponencial una vez que se alcanza el máximo de usuarios.

1.6 Resultados obtenidos utilizando modulación adaptiva

La distribución de usuarios para cada modulación en función del número de usuarios totales se muestra en la figura 34.

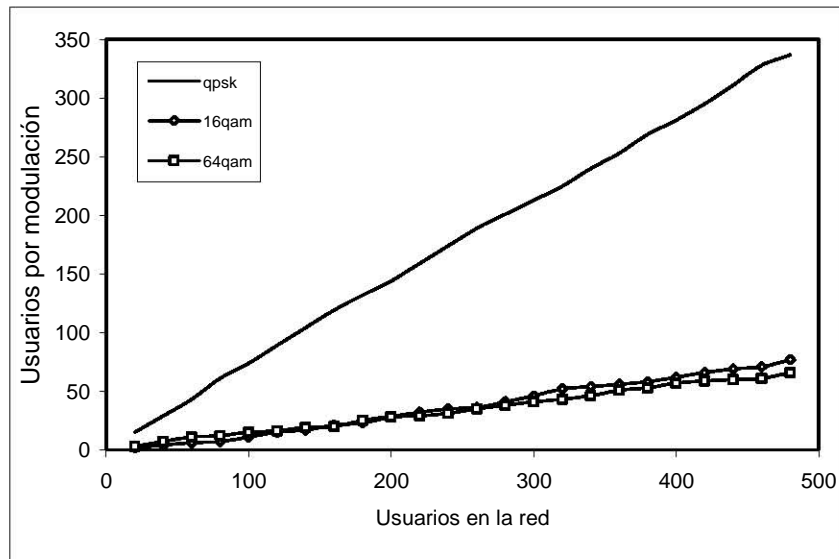


Figura 8 Número de usuarios de cada modulación en la red.

Con base en los usuarios existentes para cada modulación se realizaron los cálculos para saber el número de *slots* que se requieren para que no existan problemas de transmisión de peticiones.

Estos cálculos se hicieron tomando como base que para que cada usuario transmita una petición exitosa requiere por lo menos de $e=2.718182$ *slots* para realizar su petición, ya que se toma en cuenta que además del *slot* necesario para la petición existe la posibilidad de colisión y de que la estación base no acepte la solicitud.


Los cálculos son:

$$slots_contención = \frac{No_SS * duración_mapa}{tiempo_de_generación_paquete} \quad (32)$$

Ya que la duración del mapa es fija con un valor de 2ms, y el tráfico generado es de 32kbps generando un paquete cada 92ms, entonces la ecuación es:

$$slots_contención = \frac{No_SS_{mod} * 0.002}{0.092} \quad (33)$$

Para este caso se utilizaron 11 *slots* de contención para los usuarios con modulación QPSK, 4 *slots* para los usuarios 16-QAM y 3 para los usuarios 64-QAM, ya que son los *slots* requeridos para que la transmisión de peticiones corresponda al número máximo de usuarios en cada modulación.



Usuarios	Throughput (Kbps)			Slots de contención			maptime
	QPSK	16-QAM	64-QAM	QPSK	16-QAM	64-QAM	
100	2176000	512000	512000	5	1	1	0.00072844
120	2560000	704000	576000	5	2	2	0.00086489
140	2976000	800000	704000	6	2	2	0.00100489
160	3360000	1024000	736000	7	2	2	0.00114489
180	3744000	1120000	896000	7	3	2	0.00127289
200	4032000	1344000	1024000	8	3	2	0.00139689
220	4416000	1504000	1120000	9	3	3	0.00153867
240	4896000	1600000	1184000	10	3	3	0.00168933
260	5312000	1664000	1344000	10	4	3	0.00182133
265	5408000	1696000	1376000	10	4	3	0.001852
270	5472000	1760000	1408000	11	4	3	0.001892
275	5536000	1824000	1440000	11	4	3	0.00191867
280	5632000	1856000	1472000	11	4	3	0.00194933
285	5728000	1888000	1504000	11	4	3	0.00198
290	5792000	1952000	1536000	11	4	3	0.00200667
295	5856000	2048000	1536000	11	4	3	0.00203467
300	5952000	2048000	1600000	11	4	3	0.002064
310	6048000	2208000	1664000	12	5	4	0.00213778
320	6208000	2304000	1728000	12	5	4	0.00219511
330	6432000	2400000	1728000	12	5	4	0.00226311
340	6592000	2464000	1824000	13	5	4	0.00233244

Tabla 7 Cálculos teóricos usando modulación adaptiva.

En la tabla 11 se puede observar que el valor más grande de *throughput* corresponde a aquel tipo de modulación en la que se concentran el mayor número de usuarios, *QPSK*, seguido por *16-QAM* y finalmente *64-QAM*.

Teóricamente en el valor de la tabla 11 se observa la saturación para 285 usuarios generando un tráfico de 32kbps con valores de *throughput* de 5.72Mbps, 1.88 Mbps y 1.5Mbps para *QPSK*, *16-QAM* y *64-QAM* respectivamente, que en su conjunto dan un valor total de 9.12Mbps.

La primera simulación se hizo atendiendo las peticiones en el orden en que iban llegando a la cola de la estación base. Como se ve en la Fig. 6.8, existen más usuarios *QPSK* en la red, seguidos por *16-QAM* y finalmente los usuarios de *64-QAM*.

Al ser más usuarios *QPSK* generaban más tráfico y por lo mismo el *throughput* alcanzado por estos usuarios fue mayor comparado con el de las otras modulaciones. Cuando la red empieza a saturarse los usuarios se ven afectados ya que el retardo para todas las modulaciones aumenta de forma exponencial.

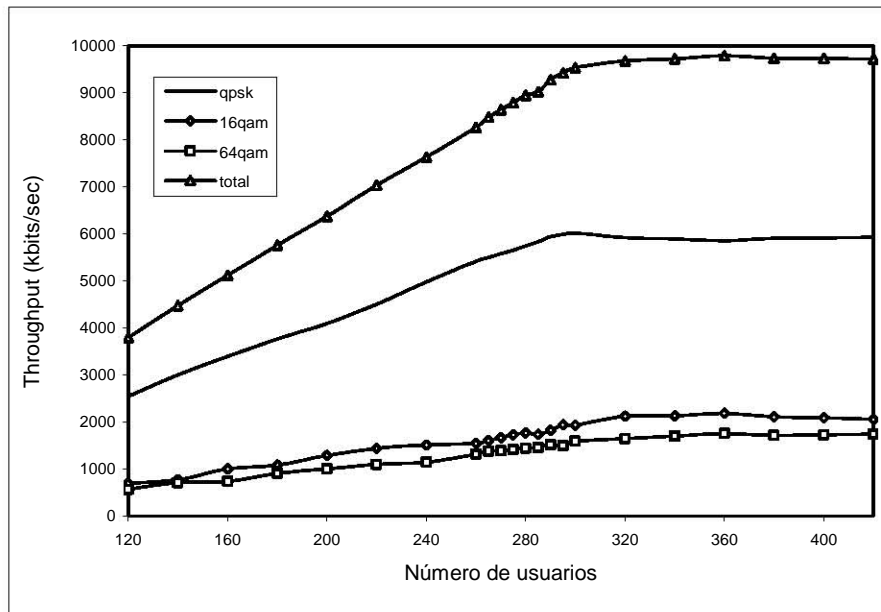


Figura 9 Throughput en la red con modulación adaptiva.

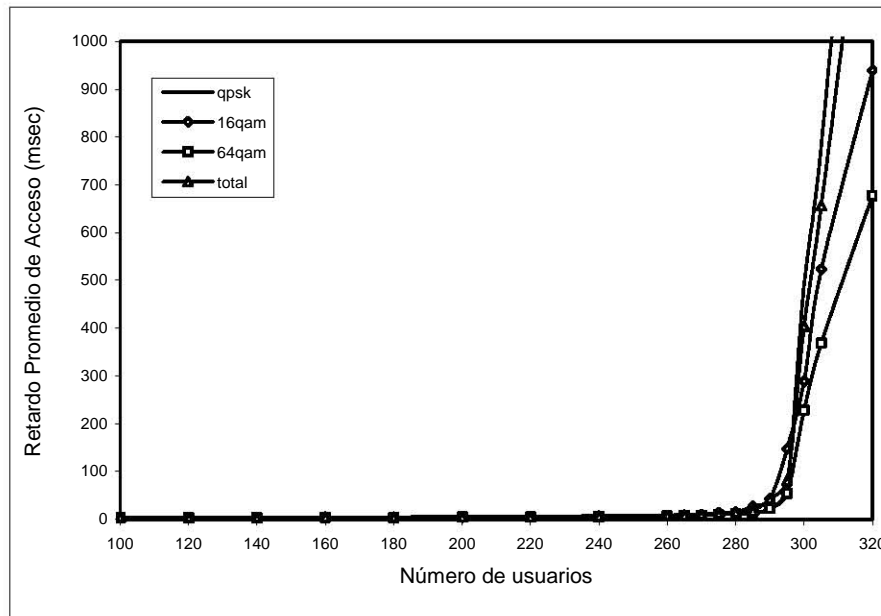


Figura 10 Retardo promedio en la red con modulación adaptiva.

En la figura 35 se observa que el punto de saturación corresponde a 295 usuarios totales con un throughput de 9.42 Mbps. Las modulaciones 16-QAM y 64-QAM son las primeras que bajan su crecimiento al saturarse la red, por lo que liberan ancho de banda que es aprovechado por la modulación QPSK que sigue creciendo.

Cuando la modulación QPSK resiente la saturación también libera ancho de banda que es aprovechado por la demás modulaciones lo que provoca un ligero aumento en su *throughput* hasta que las tres modulaciones se estabilizan en un valor de *throughput* de 9.7 Mbps.

En la segunda simulación, figuras 37 y 38, las peticiones fueron atendidas una a una sin darle prioridad a ningún usuario de determinado tipo de modulación, primero se buscaba una petición de tipo QPSK, si no se encontraba alguna buscaba 16-QAM si existía la atendía y si no buscaba alguna de 64-QAM (ver apéndice A).

Para la simulación el número de usuarios máximo alcanzados para QPSK fue de 295 con un *throughput* de 5.88Mbps, como en este punto la red alcanza su número máximo de usuarios, se satura, provocando que se dejen de atender peticiones de transmisión para esta modulación, la cual genera la mayor cantidad de paquetes. De esta forma se provoca una caída en el *throughput* de QPSK liberando el ancho de banda que se encontraba utilizando y repartiéndolo así entre las modulaciones 16-QAM y 64-QAM.

Como el nivel del *throughput* bajó para QPSK, se libera espacio en los mapas que es suficiente para que las otras modulaciones puedan transmitir sus paquetes y tengan espacio en la región de *padding* para enviar peticiones solicitando ancho de banda.

De esta forma el *throughput* sigue subiendo saturando la red nuevamente y generando, una vez alcanzado el valor máximo de usuarios, valores de retardo con un crecimiento exponencial.

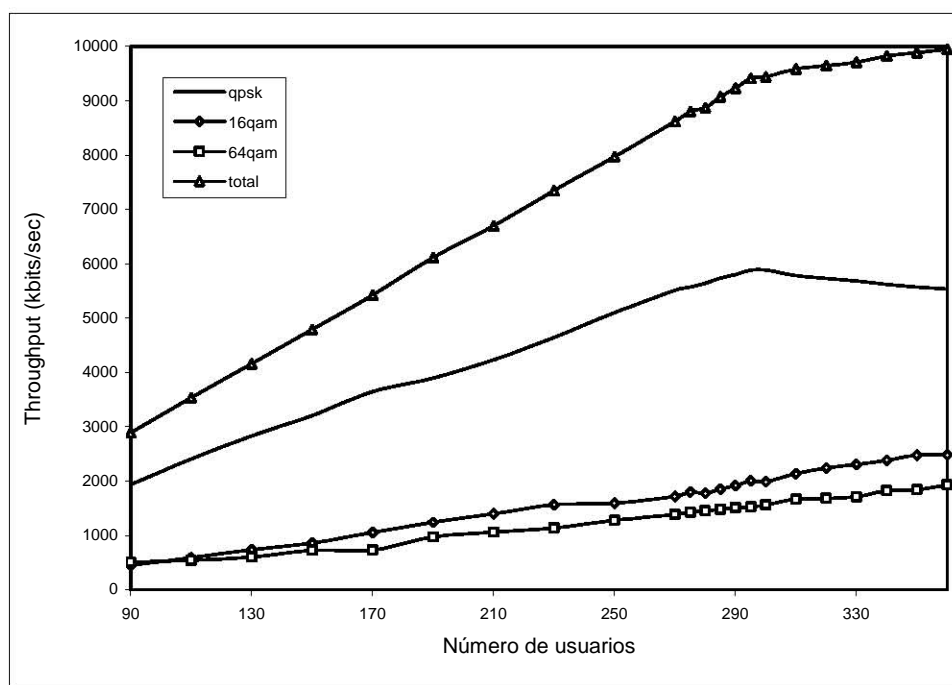


Figura 11 Throughput con modulación adaptiva atendiendo uno a uno.

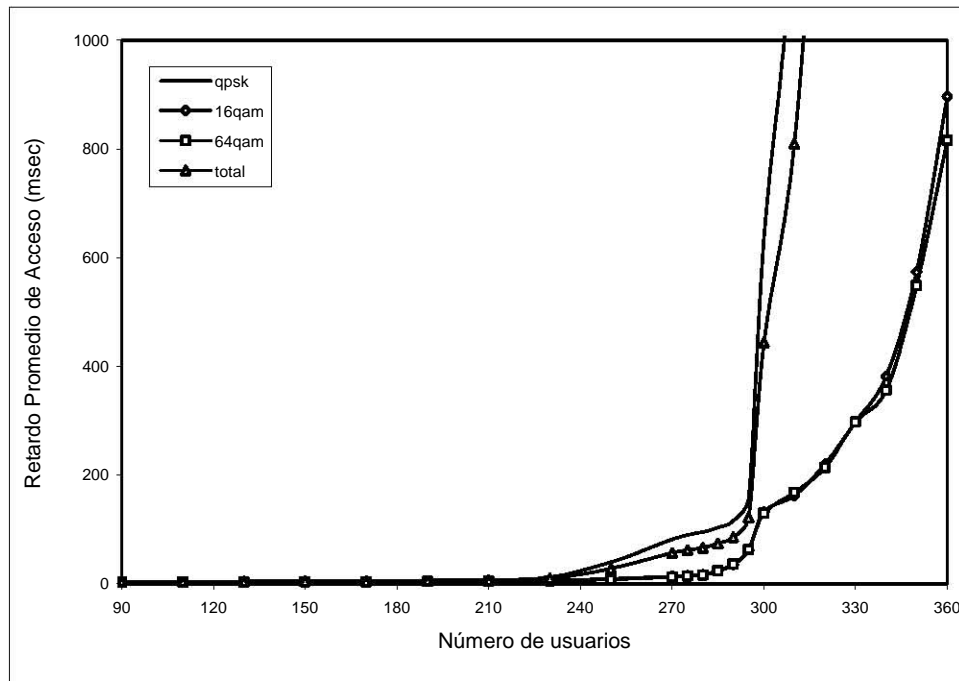


Figura 12 Retardo promedio con modulación adaptiva atendiendo uno a uno.


1.7 Conclusiones

Con los estudios teóricos y las simulaciones hechas para modelar el comportamiento de la red pudimos comprobar que los resultados son confiables, ya que por ambas vías se obtuvieron resultados muy parecidos, con una desviación menor al 5%.

Esta parte de la tesis fue de suma importancia porque finalmente se reúne todo el trabajo realizado para mostrar los elementos de mayor importancia a ser considerados cuando se pretenda generar o dar servicio a una red con este tipo de perfil.

Como en esta simulación sólo se contempló generar tráfico de Internet los valores de retardo podían ser un poco más grandes que para otros servicios, como por ejemplo voz, así que aún cuando el retardo para otros servicios hubiera afectado la calidad en las señales, para tráfico de Internet aún se mantenían buenos valores para seguir atendiendo a los usuarios.

En cada simulación podemos observar la influencia de la técnica de modulación empleada, cuando la red sólo usa usuarios con QPSK se tiene el menor *throughput* en la red ya que el número máximo de usuarios es el menor comparado con las otras modulaciones.



Sin embargo, el rango de cobertura alcanzado por la red es mayor. Cuando aumentamos el orden de la modulación a *16-QAM* o *64-QAM* el número de usuarios aumenta casi al doble y triple respectivamente, aunque el rango de cobertura disminuye considerablemente.

Al utilizar técnicas de modulación adaptiva podemos agrupar en una sola red los beneficios de todas las modulaciones, ya que podemos tener un alto rendimiento en la red sin ver afectado el rango de cobertura alcanzado por la estación base.



Análisis de Técnicas de Modulación Adaptiva
en Redes Inalámbricas de Banda Ancha
(IEEE 802.16, WiMAX)

Capítulo 7

Conclusiones



1.1 Discusiones Finales

Si bien el modelo propuesto para una red *BWA* con modulación adaptiva implementada mejora de manera considerable el número de usuarios soportados y la calidad con la que pueden transmitir, aún existen algoritmos que de ser implementados en el proyecto mejorarían dichos parámetros, tal es el caso de una asignación más efectiva de los *slots* de contención.

Por otra parte los resultados obtenidos en el proyecto van de acuerdo a las expectativas teóricas y a lo planteado por el estándar *IEEE 802.16*, es claro que para este caso en el que se han obtenido resultados para varios escenarios, aún es posible modificar los valores de algunos datos necesarios para la simulación y así crear ambientes diferentes en los que la red muestre su comportamiento y de una idea del desempeño que tendrá, por ejemplo, los valores que determinan el tipo de categoría en la que se trabaja, que en este caso por facilidad se eligió la C.

Proyectos basados una simulación que se aproxime lo más posible a la realidad permiten darnos una idea de lo viable que puede o no ser un proyecto para implementarse físicamente y así obtener avances tecnológicos.

1.2 Trabajo futuro

La modulación adaptiva es un tema que no se ha estudiado a fondo todavía, aunque existen varias tecnologías que lo usan, hay aspectos que pueden ser optimizados para tener mayores ventajas al usar esta técnica.

Uno de los aspectos que puede ser estudiado más adelante es la asignación de *slots* de contención a cada modulación. Nosotros elegimos dejar la región de contención fija sin importar el número de usuarios que existieran en la red. El número de *slots* de contención de cada modulación se escogió de tal forma que al momento de la saturación los usuarios tuvieran los *slots* suficientes para poder transmitir sus peticiones. Sin embargo, cuando existen pocos usuarios en la red existen demasiados *slots* que no son utilizados, esta región es entonces desaprovechada. Una técnica que puede mejorar esto sería una asignación dinámica de los *slots* de contención en la que se estableciera la región de contención de acuerdo al número de usuarios en la red y no de manera fija, como lo mencionan V. Rangel y R.M. Edwards **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, en la cual por cada colisión se agregan un numero variable de *slots* de contención en el siguiente mapa de asignación de recursos.

El manejo de diferentes tipos de tráfico es otro aspecto que puede estudiarse posteriormente. Las redes *WiMAX* tendrán diferentes servicios, entre ellos Internet, voz y video, por lo que el estudio de todos los escenarios de tráfico posibles nos presentará

resultados que muestren la red en su ámbito real. El manejo de calidad de servicio involucra variables que no se contemplan en nuestro proyecto.

Los usuarios que manejen servicios como *UGS* no dependen de la región de contención para enviar sus peticiones, únicamente necesitan hacer una petición al inicio de la simulación. Esto puede hacer que no se contemplen *slots* de contención para los usuarios registrados con *UGS* lo que permitiría liberar ancho de banda en el mapa y así aumentar el *throughput* promedio en la red.

En la región de *padding* existe otro punto que puede ser estudiado posteriormente. Actualmente esta región es utilizada como contención para todas las modulaciones. A diferencia de la región de contención en la que cada modulación tiene *slots* reservados, aquí todas las modulaciones pueden enviar sus peticiones en esta región lo que provoca que existan colisiones que bajan la eficiencia y aumentan el retardo en la red. Un aspecto que puede evitar esto puede ser la división de la región, en la que se asigne un espacio de transmisión a cada modulación tomando en cuenta que el tiempo de transmisión para cada modulación es diferente y que se debe hacer de tal forma que la asignación sea de acuerdo al número de usuarios de cada modulación.

La red utilizada en este momento soporta usuarios fijos. En la extensión *IEEE 802.16e* se contempla el soporte a usuarios móviles. El manejo de técnicas de modulación adaptiva con usuarios móviles es otro campo de posible estudio para el futuro, ya que es necesario implementar técnicas para que la estación base y la estación suscriptora puedan asignar dinámicamente la modulación de acuerdo a la distancia entre ellos, haciendo que el cambio de modulación sea transparente al usuario y que no afecte la calidad de la transmisión.

En estos momentos el equipo de tecnología *WiMAX*, basado en el estándar *IEEE 802.16* aún está en desarrollo, por lo que el estudio hecho hasta el momento se basa únicamente en modelos de simulación como el nuestro. Una vez que exista el equipo, las técnicas de modulación adaptiva estudiadas aquí pueden ser implementadas para que se resuelvan los problemas que puedan surgir tanto en *software* como *hardware*, lo que haría que la modulación adaptiva sea eficiente y funcional.

1.3 Contribuciones

Los resultados del proyecto arrojaron varias contribuciones para una red *BWA*. La primera de ellas se refiere a la mejora que representa el haber introducido técnicas de modulación adaptiva a la red.

Para una red sin modulación adaptiva implementada los usuarios máximos alcanzados por cada tipo de modulación son menores, excepto en el caso de *64-QAM*, a aquellos que se obtienen cuando las tres técnicas de modulación, *QPSK*, *16-QAM* y *64-QAM*, están presentes.

Dependiendo de la forma en la que se atienden las peticiones se favorece el crecimiento correspondiente a cierto tipo de modulación. Es decir, en el proyecto planteamos dos escenarios, el primero correspondía a la atención de peticiones dependiendo de la forma en la que estuvieran almacenados en la cola de la estación base, mientras que nuestra segunda forma de atención de las peticiones correspondía a la atención 1 a 1, es decir, primero se atendía un usuario correspondiente a la modulación *QPSK*, luego a uno *16-QAM* y finalmente a uno *64-QAM* para volver a empezar el ciclo, cada usuario es buscado en las colas de almacenamiento de la estación base y de no encontrarse se procede a buscar un usuario de la modulación en turno.

Con la primera forma de atención de peticiones el *throughput* de *QPSK* se veía favorecido en su crecimiento ya que existía un mayor número de usuarios correspondientes a esta modulación, mientras que el valor del *throughput* para *16-QAM* y *64-QAM* comenzaba a estancarse porque sus peticiones no eran atendidas.

En la segunda forma de atención de peticiones las modulaciones favorecidas fueron *16-QAM* y *64-QAM* ya que al buscarlas en la cola sin importar el orden en el que se encontraran, eran atendidas en la misma medida que se atendían peticiones *QPSK* sin que el número de usuarios por cada modulación se convierta en un factor determinante para la frecuencia de atención, logrando así un crecimiento en su valor de *throughput*.

El valor del retardo obtenido para una simulación con modulación adaptiva implementada o sin ella tuvo mejoras en el hecho de que para la primera el número de usuarios que se mantuvieron con un retardo en la transmisión de sus paquetes bajo los límites establecidos (100ms) para considerar una transmisión exitosa fue mayor que en el caso anterior, excepto para *64-QAM*. Aún así la posibilidad de tener varias técnicas de modulación implementadas le da un valor extra al proyecto y mientras que para el caso con modulación adaptiva implementada la potencia máxima de transmisión se fijó en 1W para el otro caso se dejó libre, así que también se puede considerar el ahorro de energía utilizada.

Si bien dimos la pauta para que existieran algunos tipos de modulaciones extras en el proyecto y que la información pudiera entregarse en condiciones óptimas bajo este esquema, existen muchos aspectos mejorables para este proyecto, algunos de los cuales ya están siendo elaborados por compañeros.

1.4 Conclusiones finales

En este proyecto pudimos mostrar las ventajas de usar técnicas de Modulación Adaptiva en Redes Inalámbricas de Banda Ancha. Logramos establecer varias características en el modelo que permiten que el uso de Modulación Adaptiva sea eficiente.

En nuestros resultados mostramos como la red puede combinar las ventajas de todas las modulaciones, alto rango para *QPSK* y alta velocidad de transmisión para *16-QAM* y

64-QAM; para así tener una red que pueda ofrecer una velocidad de transmisión alta con un alto rango de alcance.

Para que nuestros resultados sean confiables se puso énfasis en el modelo de propagación así como en las tablas de modulación. El modelo de propagación es el encargado de simular el comportamiento del medio en el que la red se va a implementar, por eso el correcto uso del modelo nos presenta resultados que pueden ser cercanos a la realidad. Las tablas de modulación establecen la calidad de la transmisión al comparar el *BER* en función del *SNR*, lo que establece que únicamente los paquetes con buena calidad, con un *BER* menor a 1×10^{-6} , sean aceptados. De nada sirve que el modelo de propagación sea el correcto si en la simulación aceptamos paquetes de baja calidad.


Los resultados más importantes que podemos obtener de este proyecto son:

- Rango de cobertura máximo para cada modulación.
- Número máximo de usuarios soportados en la red con el uso de una modulación y generando tráfico de Internet a 64 kbps.
- *Throughput* máximo en la red, con tráfico de Internet a 64 kbps, con una sola modulación.
- Número máximo de usuarios en la red usando modulación adaptiva con un tráfico de Internet a 32 kbps.
- *Throughput* promedio en la red con modulación adaptiva y un tráfico de Internet a 32 kbps.

De igual forma establecimos los detalles que quedaron pendientes y que pueden ser estudiados en un futuro cercano para que el uso de modulación adaptiva en una red *BWA* cubra todos los aspectos posibles y sea implementada en un ambiente real sin que existan detalles pendientes.

Referencias

- [1] WiMAX Forum.
<http://www.wimaxforum.org/home/>
- [2] An Adaptive Modulation Scheme for Simultaneous Voice and Data Transmission over Fading Channels. *Mohamed-Slim Alouini, Member, IEEE, Xiaoyi Tang, and Andrea J. Goldsmith, Member, IEEE*
- [3] A “Block” Adaptive Modulation and Coding PHY. *Malik Audeh, Brian Eidson, David Fisher, John Langley, David Williams*
- [4] Analysis of Probability Density Function based Adaptive Modulation Techniques in Non-Cooperative Communication Environment. W. Su and J.A. Kosinski (USA)
- [5] Broadband Radio Access Networks (BRAN), HIPERACCESS-System Overview. 2002.
- [6] Trends and Challenges in Broadband Wireless Access; Hikmet Sari.
- [7] Broadband Wireless Access; Walter Honcharenko, Jan P. Kruys, et al.
- [8] Fixed Broadband Wireless Access: State of Art, Challenges & Future Directions; Helmut Bölcskei, Arogyaswami J. Paulraj, K. V. S. Hari, et al.
- [9] Achieving Wireless Broadband with WiMAX; Steven J. Vaughan-Nichols.
- [10] Broadband Wireless: The New Era in Communications; Intel.
- [11] IEEE Standard for Local and metropolitan area networks. Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems. The Institute of Electrical and Electronics Engineers. December, 2001.
- [12] Digital Communications; Simon Haykin; Wiley, 1998.
- [13] Wireless Networks; P. Nicopolitidis, M.S Obaidat, et al; Wiley; 2003.
- [14] Digital Communication Systems; Design Martin S. Roden; Prentice Hal; 1998
- [15] Digital Communications; John G. Proakis; Mc Graw Hill; 2001
- [16] High-Speed Cable Modems; Albert Azzam; Mc Graw Hill; 1997.
- [17] A modulation Scheme for Broadband Wireless Accesss in High Capacity Networks; B.Fong, G. Y. Hong y A. C. M Fong ; Junio 2002.

- 
- [18] IEEE Standar 802.16: A technical overview of the WirelessMAN Air Interface for Broadband Wireless Access, Carl Ecklund, Roger B. Marks, Kenneth L.Stanwood.
 - [19] Channel Models for Fixed Wireless Applications IEEE 802.16 Broadband Wireless Access working group M. S. Smith, V. Erceg.
 - [20] An empirically based path model for wireless channels in suburban environments. Vinko Erceg.
 - [21] Delivery of Low Rate Isochronous stream over the Digital Video Broadcasting/Digital Audio-Visual council cable Television protocol. V. Rangel, R.M. Edwards, P.Tzerefos and K.-D. Schunke.
 - [22] Evaluation Models for Digital Bi-Directional IEEE 802.14 MAC Protocol. IEEE 802.14 Subcommitte.
 - [23] Performance evaluation of Adaptive Contention Slot Allocators for CATV Networks Based on the European Cable Communications Protocol PVB/DAVIC. V. Rangel and R.M. Edwards.

Apéndice A

Programación OPNET

```
/******  
* set_ss_tx_power  
*  
* Función en la que cada usuario reconoce el nivel potencia con el cual debe transmitir hacia la estación  
* base, tomando en cuenta la distancia entre ellos. Basándose en el SNR mínimo para cada  
* modulación, si la potencia es mayor a 1 watt busca una modulación de menor orden.  
*****/  
  
void set_ss_tx_power()  
{  
FIN (set_ss_tx_power());  
  
txch_count = op_topo_object_count (OPC_OBJTYPE_RATX);  
/* Loop through the channels and abort the transmission. */  
for (i = 0; i < txch_count; i++)  
{  
ch_id = op_topo_object (OPC_OBJTYPE_RATX, i);  
parent_id = op25_topo_parent (ch_id);  
op_ima_obj_attr_get (parent_id, "name", child_node_name);  
  
if (strcmp(child_node_name, parent_node_name)==0)  
{  
  
op_ima_obj_attr_get (parent_id, "x position", &node_x_position);  
op_ima_obj_attr_get (parent_id, "y position", &node_y_position);  
  
ss_distance = 1000*sqrt(pow(node_x_position-bs_x_position,2)+pow(node_y_position-bs_y_position,2));  
  
/******  
**** This is the Propagation Model ****  
*****/  
op_ima_obj_attr_get (parent_id, "to_link_tx.channel [0].min frequency", &ss_frequency);  
ss_frequency = ss_frequency*1000000;  
op_ima_obj_attr_get (parent_id, "to_link_tx.channel [0].bandwidth", &ss_bandwidth);  
ss_bandwidth = ss_bandwidth*1000;  
ss_frequency = ss_frequency + ss_bandwidth/2; //this is the central frequency used to get lamda  
op_ima_obj_attr_get (parent_id, "from_link_rx.noise figure", &bs_noise_figure); op_ima_obj_attr_get  
(parent_id, "power", &ss_tx_power);  
  
lamda = 300000000/(ss_frequency);  
ss_thermal_noise = 10*log10(290*bs_noise_figure*ss_bandwidth*1.379*pow(10,-23));  
  
/******/  
A = 20*log10((4*3.14159264945*Do/lamda)); // PL in free space  
  
Cf = 6*log10(ss_frequency/2000000000);  
if (Category < 2)  
Ch = -10.7*log10(ht/2); //for Cat A and B  
else  
Ch = -20*log10(ht/2); //for Cat C
```

```

n = (ABC_a-ABC_b*hr+ABC_c/hr);
PL_D = A + 10*n*log10(ss_distance/Do)+Cf+Ch;
z = gaussrand();
S_fading = Media + z*Dstd;
shadow_fading_for_station[station_address] = S_fading;
path_loss = PL_D + S_fading;

//*****MOD ADAPTIVA*****
SNR_min= 22.7; //db SNR para 64QAM con ber < 1e-6
Pr_dB = SNR_min + ss_termal_noise;
SS_min_Tx_power_dB = Pr_dB - SS_Antenna_Gain - BS_Antenna_Gain + path_loss;
SS_min_Tx_power = pow(10,(double)SS_min_Tx_power_dB/10);
potmW=SS_min_Tx_power * 1000; // potencia en miliWatts

if (potmW <= 1000) {
modulacion="64qam";
datarate = 28800000;
mod_type = QAM64;
pass_info.Modtype = QAM64;
MOD_64QAM_Cnt++; }
else {
SNR_min= 16.4; //db SNR para 16QAM con ber < 1e-6
Pr_dB = SNR_min + ss_termal_noise;
SS_min_Tx_power_dB = Pr_dB - SS_Antenna_Gain - BS_Antenna_Gain + path_loss;
SS_min_Tx_power = pow(10,(double)SS_min_Tx_power_dB/10);
potmW=SS_min_Tx_power * 1000;
if (potmW <= 1000) { modulacion="16qam";
datarate = 19200000;
mod_type = QAM16;
pass_info.Modtype = QAM16;
MOD_16QAM_Cnt++; }
else {
SNR_min = 12; //dB as in IEEE 802.16a-2003 pp 284
Pr_dB = SNR_min + ss_termal_noise;
SS_min_Tx_power_dB = Pr_dB - SS_Antenna_Gain - BS_Antenna_Gain + path_loss;
SS_min_Tx_power = pow(10,(double)SS_min_Tx_power_dB/10);
modulacion="qpsk";
datarate = 9600000;
potmW=SS_min_Tx_power * 1000;
mod_type = QPSK;
pass_info.Modtype = QPSK;
MOD_QPSK_Cnt++;} }

op_ima_obj_attr_set (parent_id, "power", SS_min_Tx_power);
op_ima_obj_attr_set (ch_id, "channel [0].power", SS_min_Tx_power);
op_ima_obj_attr_set (parent_id, "to_link_tx.channel [0].data rate", datarate);
op_ima_obj_attr_set (ch_id,"modulation",modulacion);
op_ima_obj_attr_get (ch_id,"modulation",&modulacion1);

//*****FIN MOD ADAPTIVA*****
}
}
FOUT;
}

```

```

/*****
* MAP_Time (enter)
*
*Proceso que construye el mapa asignando los slots de contención para cada modulación
* y los slots de información para los usuarios que ya hayan hecho su petición de ancho de *banda
*****/
ie_list_clean();
ld_ptr = lev_init (request_list, num_priorities + noCIR_lists, map_end_time,
                  cmts_max_map_ies, cmts_max_map_slots, cmts_max_map_grant_time,
                  (Fixed_Frame_On) ? Fixed_Frame_Duration : 0.0);
map_slots = lev_time_to_slots (Fixed_Frame_Duration);
max_slots_in_map = map_slots;
zero_slots = ld_ptr->num_slots;

//Asignamos los slots de contención (contention_slots_qpsk) al mapa
lev_ie_request_prim (ld_ptr, CM_BROADCAST_SID, contention_slots_qpsk);
cont_slots = ld_ptr->num_slots - zero_slots;
zero_slots = ld_ptr->num_slots;
cont_qpsk++;

//Asignamos los slots de contención 16-QAM(contention_slots_16qam) al mapa
lev_ie_request_prim (ld_ptr, CM_MULTICAST_SID_16QAM, contention_slots_16qam);
cont_slots = ld_ptr->num_slots - zero_slots;
zero_slots = ld_ptr->num_slots;
cont_16qam++;

//Asignamos los slots de contención (contention_slots_64qam) al mapa
lev_ie_request_prim (ld_ptr, CM_MULTICAST_SID_64QAM, contention_slots_64qam);
cont_slots = ld_ptr->num_slots - zero_slots;
zero_slots = ld_ptr->num_slots;
cont_64qam++;

if (!lev_complete(ld_ptr, OPC_FALSE)) )) //Buscamos usuarios con calidad de servicio UGS
    lev_UG_grant(ld_ptr);                //En la simulación no son considerados

if (!lev_complete(ld_ptr, OPC_FALSE)) //Buscamos usuarios con calidad de servicio rtPS
    lev_RTP_grant (ld_ptr);             //En la simulación no son considerados

if (!lev_complete(ld_ptr, OPC_FALSE)) )) //Buscamos usuarios con calidad de servicio BE
    lev_best_effort_grant (ld_ptr);
    be_slots = ld_ptr->num_slots - zero_slots;
    zero_slots = ld_ptr->num_slots;
    pad_slots = 0;

if (Fixed_Frame_On) //Asignamos la region de padding como región de contención para todas las
modulaciones
{
    pad_time = Fixed_Frame_Duration - ld_ptr->total_time;

    if (pad_time > 0) {
        ds = lev_time_to_slots_test(pad_time, CM_BROADCAST_SID);
        lev_ie_request_prim (ld_ptr, CM_BROADCAST_SID, ds);
        pad_slots = ds;
        pad_cont_qpsk++;

        ds = lev_time_to_slots_test(pad_time, CM_MULTICAST_SID_16QAM);
        lev_ie_request_prim (ld_ptr, CM_MULTICAST_SID_16QAM, ds);
    }
}

```



```

pad_cont_16qam++;

ds = lev_time_to_slots_test(pad_time, CM_MULTICAST_SID_64QAM);
lev_ie_request_prim (ld_ptr, CM_MULTICAST_SID_64QAM, ds);
pad_cont_64qam++;
}

}

total_contention_slots = total_contention_slots + cont_slots + pad_slots;

        }
    }
}
/*****

*****
* lev_bes_choose / Adaptive modulation
*
* Buscamos peticiones de ancho de banda para usuarios Best Effort, atendiendo con igual prioridad a
* todas las modulaciones.
*****/
static REQUEST_STRUCT* lev_bes_choose (lev_data *ld_ptr)
{
    FIN(lev_bes_choose());
    for (i = 0; i < ld_ptr->max_index; i++) //Buscamos una petición de la modulación correspondiente
    {
        if (ld_ptr->list_index[i] < ld_ptr->horizon_length[i])
        {
            for (c = 0; c < ld_ptr->horizon_length[i]; c++)
            {
                done = 1;
                rq_ptr = op_prg_list_access (ld_ptr->list_ptr[i], c);
                if (rq_ptr->req_mod == next_req_type)
                {
                    ld_ptr->last_index = c;
                    ld_ptr->index_ptr = i;
                    FRET(rq_ptr);
                }
            }
        }
    }

}

//Si encontramos una petición, buscamos la siguiente modulación (0-QPSK,1-16QAM,"-64QAM)
if (done == 1) { if (next_req_type < 2)
    next_req_type++;}
else
    next_req_type = 0;
}

for (i = 0; i < ld_ptr->max_index; i++) //Buscamos una petición de la modulación correspondiente
{
    if (ld_ptr->list_index[i] < ld_ptr->horizon_length[i])
    {
        for (c = 0; c < ld_ptr->horizon_length[i]; c++)
        {

```

```

done = 1;
rq_ptr = op_prg_list_access (ld_ptr->list_ptr[i], c);
if (rq_ptr->req_mod == next_req_type) {
    ld_ptr->last_index = c;
    ld_ptr->index_ptr = i;
    FRET(rq_ptr);
}
}
}
}
//Si encontramos una petición, buscamos la siguiente modulación (0-QPSK,1-16QAM,"-64QAM)

if (done == 1) {
if (next_req_type < 2)
next_req_type++;
else
next_req_type = 0; }

for (i = 0; i < ld_ptr->max_index; i++) { //Buscamos una petición de la modulación correspondiente
if (ld_ptr->list_index[i] < ld_ptr->horizon_length[i])
{
for (c = 0; c < ld_ptr->horizon_length[i]; c++)
{
done = 1;
rq_ptr = op_prg_list_access (ld_ptr->list_ptr[i], c);
if (rq_ptr->req_mod == next_req_type) {
    ld_ptr->last_index = c;
    ld_ptr->index_ptr = i;
    FRET(rq_ptr);
}
}
}
}
}

FRET (rq_ptr);
}

```

Apéndice B

Acrónimos

3G (Third Generation)
ADSL (Asymmetric Digital Subscriber Line)
ASK (Amplitude Shift Keying)
ATM (Asynchronous Transfer Mode)
BE (Best Effort)
BER (Bit Error Rate)
BPSK (Binary Phase Shift Keying)
BRAN (Broadband Radio Access Networks)
BS (Base Stations)
BWA (Broadband Wireless Access)
CDMA (Code Division Multiple Access)
CID (Connection Identifier)
DAB (Digital Audio Broadcasting)
DAMA (Demand Assigned Multiple Access)
DCD (Downlink Channel Descriptor)
DFTP (Distributed File Transfer Protocol)
DHCP (Dynamic Host Configuration Protocol)
DL-MAP (Downlink Access Definition)
DOCSIS (Data Over Cable Service Interface Specification)
DSA-REQ (Dynamic Service Addition-Request)
DSL (Digital Subscriber Line)
DVD (Digital Versatile Disc)
ETSI BRAN (European Telecommunications Standards Institute Broadband Radio Access Networks)
FEC (Forward Error Correction)
FFT (Fast Fourier Transform)
FFT (Fast Fourier Transform)
FIFO (First In, First Out)
FSK (Frequency Shift Keying)
GSM (Global System for Mobile Communications)
HIPERACCESS (High Performance Radio Access)
HIPERLAN (High Performance Radio Local Area Networks)
HIPERLINK (Interconexión de banda ancha inalámbrica)
HMAC (Hashed Message Authentication Code)
HUMAN (High-Speed Unlicensed Metropolitan Area Networks)
IE (Information Elements)
IEEE (Institute of Electrical and Electronic Engineers)
IFT (Inverse Fourier Transform)
IP (Internet Protocol)
LMCS (Local Multipoint Communication Systems)
LMDS (Local Multipoint Distribution Service)

MAC (Media Access Control)
MIMO-OFDM (Multiple Input, Multiple Output Orthogonal Frequency Division Multiplexing)
MP-MP (Multipoint-to-Multipoint)
MWS, Multimedia Wireless Systems)
nrtPS (Non Real-Time Polling Service)
OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing)
OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiplexing Access)
PAPIIT (Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica)
PDA's (Personal Digital Assistant)
PDUs (Protocol Data Units)
PL (Path Loss)
PMP (point-to-multipoint)
PSK (Phase Shift Keying)
QAM (Quadrature Amplitude Modulation)
QoS (Quality of Service)
QPSK (Quadrature Phase Shift Keying)
rtPS (Real-Time Polling Service)
SNMP MIB (Simple Network Management Protocol Management Information Base)
SNR (Signal to Noise Ratio)
SS MIC (Message Integrity Check)
SS (Subscriber Stations)
TDM (Time Division Multiplexing)
TDMA (Time-Division Multiple Access)
UCD (Uplink Channel Descriptor)
UGS (Unsolicited Grant Service)
UIT (Unión Internacional de Telecomunicaciones)
UIUC (Uplink Interval Usage Code)
UL-MAP (Uplink Access Definition)
UMTS (Universal Mobile Telecommunications System)
USB (Universal Serial Bus)
UTP (Unshield Twisted Pair)
UWB (Ultra Wideband)
VOFDM (Vector OFDM)
VoIP (Voice over IP)
Wi-Fi (Wireless Fidelity)
WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access Forum)
WirelessMAN-OFDM (Wireless Metropolitan Area Networks - OFDM)
WMAN (Wireless Metropolitan Area Network)
WOFDM (Wideband OFDM)
WPAN (Wide Personal Area Network)