

INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS
SUPERIORES DE MONTERREY

CAMPUS MONTERREY

PROGRAMA DE GRADUADOS DE MECATRÓNICA Y
TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN



**SIMULACIÓN DE UN SCHEDULER PARA EL
TRANSPORTE DE VIDEO EN WiMAX**

Por:

Manuel Alejandro Ceballos Soto

Tesis

Presentada como requisito parcial para obtener el grado académico de:

Maestro en Administración de las Telecomunicaciones

Monterrey, Nuevo León.

Noviembre de 2010.

SIMULACIÓN DE UN SCHEDULER PARA EL TRANSPORTE DE VIDEO EN WIMAX

Por:

Manuel Alejandro Ceballos Soto

Tesis

Presentado por el Programa de Graduados
de Mecatrónica y Tecnología de la Información

Este trabajo es requisito parcial para obtener el grado de
Maestro en Administración de las Telecomunicaciones

INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS SUPERIORES DE
MONTERREY

Noviembre 2010

DEDICATORIA

A mis padres

Por haberme apoyado, aconsejado y guiado durante toda mi vida.

A mis abuelos

Por ser un ejemplo a seguir de fortaleza y humildad, y por haberme dado todo su amor y sus enseñanzas.

A mis padrinos

Por siempre estar al pendiente de mí y ayudarme cada vez que fuera necesario.

A mis amigos

Por ser parte invaluable en mi estancia en Monterrey, por haberme brindado su amistad y su confianza y por ser un aliento durante el proceso de elaboración de mi tesis.

A Dios

Por brindarme salud y bienestar y por siempre estar a mi lado.

AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Ramón M. Rodríguez Dagnino

Por su gran ayuda y guía durante todo el proceso de elaboración de mi tesis, sin ella hubiera sido imposible terminarla.

Al Dr. Gabriel Campuzano y al Dr. David Alanís

Por su retroalimentación y por su respaldo para concluir este trabajo.

A mis padres

Por sus consejos y apoyo constante, y por sostenerme durante toda mi estancia en Monterrey.

RESUMEN

En la última década el incremento en la demanda de productos de video digital a nivel mundial ha ido en aumento exponencial, y esto es debido a la introducción de nuevas tecnologías más compactas, de mejor calidad y al alcance de cualquier persona; algunos de los principales usos son para entretenimiento (HDTV, DVD, Videojuegos), seguridad (CCTV) y automatización industrial. Por lo que el análisis y la mejora de la calidad de las tecnologías de difusión de video es un rubro que debe ser investigado para asegurar su éxito en la inserción en nuevos dispositivos.

WiMAX es una tecnología de acceso inalámbrico basada en el estándar IEEE 802.16, la cual tiene como objetivo el brindar un servicio inalámbrico de última milla para usuarios fijos y móviles y es una de las alternativas para servicios como DSL y acceso por cable. Para poder soportar esa demanda de servicios de video y datos que hoy en día existe, esta tecnología cuenta con 4 clases de servicio soportada, siendo la de servicios en tiempo real la que compete a ésta investigación.

El objetivo de este estudio consiste en simular el comportamiento de un agendador que sea capaz de priorizar los paquetes de video, con la finalidad de asegurar una mejor calidad del video en el receptor. Para lo cual se partió a simular la Capa MAC de WiMAX en Matlab, diseñar el sistema M/M/1 y finalmente hacer una comparación entre ambos sistemas: el priorizado y el que no posee priorización.

TABLA DE CONTENIDOS

DEDICATORIA	IV
AGRADECIMIENTOS	V
RESUMEN	VI
LISTA DE TABLAS	X
LISTA DE FIGURAS	XI
CAPÍTULO 1: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	1
1.1 Introducción	1
1.2 Situación problemática	4
1.3 Definición del Problema.....	8
1.4 Objetivo de la investigación.....	9
1.5 Metodología	9
1.6 Contribución.....	10
1.7 Organización de la Tesis	10
CAPÍTULO 2: VISIÓN GENERAL DE WiMAX.....	11
2.1 Redes Inalámbricas y acceso de banda ancha inalámbrica	11
2.2 IEEE 802.16 WiMAX	14
2.3 Capa Física IEEE 802.16.....	15
2.3.1 IEEE 802.16a.....	17
2.3.2 WiMAX Fijo IEEE 802.16-2004.....	18
2.3.3 IEEE 802.16e (WiMAX Móvil).....	19

2.3.4	Codificación y modulación adaptativa (AMC).....	22
2.4	Capa MAC IEEE 802.16.....	22
2.4.1	Formatos de PDU	24
2.4.1	Conexiones y Flujos de Servicio (SF)	28
2.4.2	Clasificación y Mapeo	30
2.4.3	CS Y QoS	30
CAPÍTULO 3: QoS en WiMAX		33
3.1	Servicios Scheduling en MAC	36
3.2	Mecanismos que soportan la QoS en WiMAX.....	38
3.2.1	QoS en la Arquitectura de WiMAX.....	39
3.2.2	Mecanismos de QoS en administración de ancho de banda.....	40
3.2.3	MECANISMOS DE QoS DE MANEJO DE TRÁFICO	44
CAPÍTULO 4: SIMULACIONES Y RESULTADOS		46
4.1	Descripción General	46
4.2	Descripción del Agendador.....	50
4.2.1	Cálculo de PDU's	50
4.2.2	Cálculo Tiempos Interarribos	55
4.2.3	Sistema M/M/1	59
4.2.4	Capa Física y Recepción de paquetes.....	64
4.3	Resultados	66
4.3.1	Escenario de 50 usuarios	67

4.3.2	Escenarios de 10 y 30 usuarios.....	70
4.3.3	Escenario de 55 usuarios	74
4.3.4	Comparativa entre sistema priorizado y sin priorizar.....	77
CAPÍTULO 5 : CONCLUSIONES		80
5.1	Trabajos a Futuro	81
APÉNDICE.....		83
REFERENCIAS.....		87
VITA		92

LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Principales estándares del IEEE 802.16	15
Tabla 2: Tasa de bits/símbolo por modulación.....	22
Tabla 3: Campos del encabezado genérico.....	26
Tabla 4: Campos del encabezado de petición de BW.....	27
Tabla 5: Aplicaciones de WiMAX móvil y QoS.....	36
Tabla 6: Modulaciones y sus tasas de codificación.....	51
Tabla 7: Tasas de datos en Mbps por modulación.....	52
Tabla 8: Cálculo de PDU's por modulación.....	54
Tabla 9: Probabilidades de la cadena de Markov.....	57
Tabla 10: Resultados para un ρ diferente en 10 iteraciones.....	61
Tabla 11: Resultados de 10 iteraciones para un $\rho=0.985$	62
Tabla 12: Resultados del sistema para 50 usuarios.....	67
Tabla 13: Resultados del sistema para 10 usuarios.....	70
Tabla 14: Resultados del sistema para 30 usuarios.....	71
Tabla 15: Resultados del sistema para 55 usuarios.....	75
Tabla 16: Comparativa entre sistema priorizado y sin priorizar.....	78

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Tecnologías inalámbricas y sus representantes.....	11
Figura 2: Modo PMP	16
Figura 3: Esquemas de Modulación OFDM y OFDMA.....	20
Figura 4: Capas de protocolos del estándar 802.16	23
Figura 5: Representación de un PDU.	25
Figura 6: Encabezado Genérico.....	25
Figura 7: Encabezado de petición de BW.....	27
Figura 8: Esquema de relación CID y SFID.....	29
Figura 9: Clasificación y mapeo de CID's.....	31
Figura 10: Esquemas de QoS más representativos de WiMAX	38
Figura 11: Componentes del sistema propuesto.	50
Figura 12: Cadena de Markov del sistema.....	56
Figura 13: Funcionamiento del buffer	63
Figura 14: Histograma de tiempos interarribos para 50 usuarios.	68
Figura 16: Histogramas de tiempos de interarribos para 10 usuarios.....	71
Figura 17: Histogramas de tiempos de interarribos para 30 usuarios.....	72
Figura 18: Histogramas de retrasos para 10 usuarios.	72
Figura 19: Histogramas de retrasos para 30 usuarios.	73

Figura 20: Histogramas de tiempos de interarribos para 55 usuarios.....	75
Figura 21: Histogramas de retrasos para 55 usuarios.	76
Figura 22: Diferencias en los errores en componentes Y y Cb-Cr	77

CAPÍTULO 1: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 *Introducción*

Desde finales de la década del siglo veinte, las redes de datos han mantenido un crecimiento constante. Después de la instalación de las redes fijas de Internet en varios lugares a través de mundo y ahora con su crecimiento, la necesidad ahora es el acceso inalámbrico (Nuaymi, 2007).

El rápido aumento en la demanda de acceso a Internet de alta velocidad y voz para el ámbito residencial y clientes de pequeños negocios ha creado una demanda de acceso de servicios de banda ancha de última milla. Las tasas típicas de datos para una línea compartida de banda ancha para clientes residenciales y de pequeñas oficinas / oficinas en hogar (SOHO) son alrededor de 5 a 10 Mbps en el canal de bajada (DL) y 0.5 a 2 Mbps en el canal se subida (UL). Esta asimetría surge de la naturaleza en la que se presenta el tráfico en la Web mientras que en los servicios de voz y videoconferencias se requieren de tasas de datos simétricos. Aunque la evolución a largo término de los servicios de Internet y los resultados de requerimientos de flujo de datos son difíciles de predecir, la demanda de tasas de datos son cada vez mayores y de mejor calidad para los servicios de última milla, y éstas mismas ciertamente se incrementarán dramáticamente en el futuro. Varios sistemas inalámbricos en diferentes bandas del espectro competirán por tener el dominio de los servicios de última milla. Los métodos considerados van desde Punto a Punto, Punto a Multipunto (PMP), y Multipunto a Multipunto para transportar la información a los hogares y proveyendo a los usuarios finales de capacidades de *networking*. El acceso de banda ancha hoy en día es ofrecido a través de líneas de suscriptor digital (xDSL), cable y acceso

inalámbrico de banda ancha (BWA). Cada una de estas técnicas tiene un costo único, rendimiento y despliegue. Aunque el cable y DSL hoy en día están siendo utilizados a gran escala, el BWA está emergiendo como una tecnología de acceso con bastantes ventajas las cuales incluyen el eliminar las limitaciones ocasionadas por la distancia de DSL y los altos costos del cable, teniendo un rápido despliegue, alta escalabilidad, mantenimiento y costos de mejoras mínimos e inversiones incrementales para convergir con el mercado creciente (Krishna y Radhamani, 2008).

“La tecnología WiMAX es en el presente uno de los sistemas globales más prometedores en las telecomunicaciones. Grandes esperanzas e importantes inversiones han sido realizadas para WiMAX, el cual es un sistema BWA que tiene varias aplicaciones, puede ser de acceso fijo o móvil inalámbrico de última milla, de “*backhaul*”, redes de telefonía celular, telemediciones, etc” (Nuaymi, 2007).

En una encuesta realizada por Tratz-Ryan B., Forsman J. y Keene I. (2006) a 16 proveedores de Internet en diferentes regiones del mundo, ven el acceso a Internet Inalámbrico de banda ancha como una gran oportunidad para WiMAX. Interesándose en servicios como VoIP (Voz sobre IP), videoconferencia y Video sobre demanda (VOD), la mayoría ve a *triple-play* (voz, video y datos) como una gran oportunidad para WiMAX en el futuro.

Según Kumar (2008), “las tecnologías de WiMAX móvil son un vehículo ideal para la nueva generación de aplicaciones web que están siendo provistas por un cambio simultáneo en los comportamientos de consumo. Este gran cambio puede ser aludido hacia un fuerte cambio asociado con la necesidad de movilidad. Esto puede relacionarse a la

disponibilidad de servicios web 2.0 incluyendo *online commerce*, blogs, comunidades online como *Myspace* los cuales son paradigmas que hacen tender a más y más gente a usar estos servicios desde sus dispositivos móviles”.

Relacionado a la movilidad WiMAX Forum (2006) mencionan que algunos de las características avanzadas de WiMAX son los sistemas de antenas adaptativas los cuales mejoran significativamente el rendimiento. La alta tasa de rendimiento de datos permite una multiplexación de datos eficiente y una baja latencia. Atributos esenciales para permitir los servicios de datos de banda ancha incluyendo “*streaming*” (difusión) de video y VoIP con alta calidad de servicio (QoS). La arquitectura escalable, la alta tasa de rendimiento y el bajo costo de difusión hacen a WiMAX móvil una solución líder para los servicios inalámbricos de banda ancha.

La QoS es una característica importante en todas las comunicaciones de transmisión de banda ancha, ya que de ellos depende un buen rendimiento y confiabilidad de la red. Generalmente este término viene asociado a la calidad en la transmisión y recepción de datos, voz y video en las redes.

Al hablar de QoS, Black (2000) explica que “el término QoS empleado en el modelo OSI (*Open Systems Interconnections*), se refiere a la habilidad del proveedor de servicios de soportar los requerimientos de las aplicaciones de los usuarios considerando al menos cuatro categorías: ancho de banda, latencia o retraso, *Jitter* y pérdida de tráfico”.

Ante esta situación, esta investigación se enfocará en cuantificar y analizar los factores que impactan directamente la QoS en las transmisiones de video a través de simulaciones en la tecnología WiMAX.

1.2 Situación problemática

En la última década el incremento en la demanda de productos de video digital a nivel mundial ha ido en aumento exponencial, y esto es debido a la introducción de nuevas tecnologías más compactas, de mejor calidad y al alcance de cualquier persona; algunos de los principales usos son para entretenimiento (HDTV, DVD, Videojuegos), seguridad (CCTV) y automatización industrial. Por lo que el análisis y la mejora de la calidad de las tecnologías de difusión de video es un rubro que debe ser investigado para asegurar su éxito en la inserción en nuevos dispositivos.

Según el autor Kumar (2008), los factores que gobiernan el crecimiento y uso de WiMAX móvil son algo variados y las arquitecturas de redes por sí mismas no serán los factores determinantes. Un resumen de dichos factores serían los siguientes:

- *Disponibilidad de Espectro:* ya que no todas las bandas de frecuencias son apropiadas. De hecho, las bandas preferidas para su implementación yacen debajo de los 3.3GHz. El ir por encima de este rango tendría un impacto en el tamaño de las células, las tasas de datos y el costo de implementación.
- *Costo del Espectro:* alto costo por el licenciamiento de una rango de frecuencias para las transmisiones.
- *Procesos Regulatorios:* los procesos regulatorios y permisos van de la mano con la asignación del espectro. En muchos países se vincula con el licenciamiento y número de usuarios. La velocidad de otorgamiento de licencias para brindar servicios WiMAX determinará su futuro crecimiento.

- *Armonización de Estándares:* para esto WiMAX Forum ha jugado un rol principal en la especificación de perfiles y certificaciones de estaciones base y de estándares de dispositivos.
- *Posicionamiento de los Operadores e Industria más importantes:* las empresas de telecomunicaciones en los países desarrollados poseen un mayor rango de frecuencias lo cual da una ventaja competitiva.
- *Innovación y Nuevos servicios:* tales como reproductores de video móviles, dispositivos de TV móvil, guías de viaje, almacenamiento personal remoto, video vigilancia, dispositivos de juego móvil, servicios de Web 2.0 entre otros más.
- *Escenarios de Inter-Conexión con otras tecnologías.*

Por otro lado WiMAX Forum (2009) menciona que el factor clave del desarrollo de WiMAX es su calidad de servicio, en donde QoS se refiere a diferentes parámetros dentro de la red que determinan el tipo de tráfico que puede ser soportado, y el tipo de experiencia que el usuario tendrá. Para cada aplicación y para cada cliente, un conjunto de requerimientos diferentes son críticos. Los parámetros de red típicos que determinan la QoS son la tasa de error de bits (*BER*), latencia, datos promedio y un mínimo de desempeño.

“*BER* está asociado con daño o pérdida de datos a las comunicaciones de voz donde la retransmisión no es una opción. Los algoritmos de detección y corrección de errores pueden ser usados para provocar una repetición de tramas de los bits previos recibidos, pero esto solo puede usado en cierta cantidad antes de que un impedimento se vuelva notable” (WiMAX Forum, 2009).

“*Jitter* es causado cuando los paquetes llegan en diferentes momentos debido a los diferentes tiempos de cola o debido a las diferentes rutas tomadas en las comunicaciones. El problema de *Jitter* puede ser típicamente resuelto con un buffer de memoria que almacene los datos que van llegando, y después concatenarlos, eso suaviza la llegada de voz en el receptor” (WiMAX Forum, 2009).

Las transmisiones a través de medios inalámbricos causan problemas de latencia o retraso algunos factores que contribuyen a esto son los retrasos en el canal de propagación, retraso de serialización, retraso de codificación de canal, y retrasos asociados al procesamiento en capa MAC. En la capa de red, encontramos retrasos de *forwarding* y *buffering*, y en la capa de aplicación se tienen retrasos de paquetización y codificación/decodificación.

Cada uno de estos parámetros de QoS tiene un efecto diferente en los tipos de tráfico. Por ejemplo, en audio y video la pérdida de bits y paquetes afecta directamente a la calidad del mismo. Por otro lado el *Jitter*, puede causar dificultades porque afecta en la sincronización de intra-trama o inter-trama la cual es necesaria para la decodificación de la señal de video. Generalmente en una transmisión de video típicamente se requiere un *Throughput* arriba de 128 Kbps, y una latencia y *Jitter* bajos.

Para las comunicaciones de voz lo más importante viene siendo la latencia, ya que es desconcertante para los que escuchan tener largar e inconsistentes pausas entre los sonidos. Finalmente para la transmisión de datos como la navegación Web o transferencia de archivos, el *Jitter* y latencia no son tan importantes excepto al trabajar con contenidos de

gráficos; lo que verdaderamente le afecta sería tener una tasa de error alta ya que afectaría a la integridad de la información.

Otro factor crítico para asegurar la QoS son los algoritmos de “*Scheduling*”, los cuales son un componente de la capa MAC para satisfacer los parámetros de calidad requeridos para las comunicaciones en red. El diseño de los mismos es una actividad compleja ya que tienen una capacidad limitada y un canal dinámico, lo cual es inherentemente una característica de los sistemas inalámbricos. Para un buen diseño de los mismos debe tomarse en cuenta el ancho de banda a utilizar, los parámetros requeridos de QoS, imparcialidad en distribución, complejidad y escalabilidad (Fattah y Leung, 2008; Zhang, 1995; Guerin y Peris, 1999).

Según Krishna y Radhamani, (2008), “un número importante de asuntos como la eficiencia espectral, escalabilidad de red, auto-instalación de equipos de antena por el cliente (CPE), y operación confiable de sistemas con no línea de vista (NLOS), se necesitan resolver antes de que las tecnologías BWA (WiMAX) pueda penetrar exitosamente en el mercado”. Por lo que no solamente estamos hablando de problemas técnicos de las comunicaciones sino también de equipos que sean capaces de trabajar en conjunto con otras tecnologías y que sean relativamente de fácil uso.

Como se puede apreciar actualmente, el impacto que tienen las tecnologías de banda ancha en las nuevas necesidades de consumo y comunicación de las personas es importante y creciente, por lo que el analizar y asegurar la calidad de servicio dentro de las mismas puede ser la diferencia entre el éxito de un servicio o su fracaso, o bien entre una comunicación eficiente o una deficiente.

1.3 Definición del Problema

La QoS es una característica importante en todas las comunicaciones de transmisión de banda ancha ya que de ellos depende un buen rendimiento y confiabilidad de la red. Generalmente este término viene asociado a la calidad en la transmisión y recepción de datos, voz y video en las redes.

Como se citó anteriormente WiMAX Forum maneja que los parámetros de red que determinan la QoS son *BER*, *Jitter*, *Latencia* y *Throughput*. Hasta la fecha estos factores siguen siendo motivo de diversas investigaciones de rendimiento para encontrar los puntos donde el sistema se vuelve más redituable y con el mejor desempeño. Por lo que para poder analizar estos factores es necesario estudiar los diversos algoritmos de *Scheduling* y sus parámetros, debido a que ellos controlan el flujo de la información y la forma en como se jerarquiza y distribuye el tráfico.

Por lo anteriormente expuesto, el análisis de dichos factores de QoS resulta de vital importancia para encontrar el punto en donde convergen redituabilidad y desempeño, por lo que ésta investigación se basará en hacer simulaciones para analizar los factores del *Scheduling* y en encontrar un algoritmo óptimo en el cual se aseguren las transmisiones de video en un entorno WiMAX.

1.4 *Objetivo de la investigación*

El presente estudio tiene como objetivo:

Diseñar un algoritmo de *Scheduling* que asegure un alto QoS en las transmisiones de video en WiMAX, tomando en cuenta el impacto de la Modulación y Codificación Adaptativa en las redes PMP.

1.5 *Metodología*

Esta investigación se basará en estudios descriptivos. Según Baptista, P., Fernández, C., Hernández, R. (2003) “pretenden medir o recoger información de manera independiente o conjunta sobre los conceptos o las variables a los que se refieren.” Pueden integrar las mediciones o información de cada una de dichas variables o conceptos para decir cómo es y cómo se manifiesta el fenómeno de interés. En este caso se analizarán las siguientes variables:

- *BER*: este factor se medirá realizando un proceso de generación de tiempos de interarribos a través de un sistema M/M/1. Dicho proceso congestionará al sistema y provocará posibles pérdidas en el sistema.
- *Retrasos de paquetes*: este factor será analizado desde el punto de vista del manejo del buffer y el agendador, debido a que dentro de éstos se presentarán los retrasos en los envíos y esto pueda significar un problema para lograr un video en tiempo real.

- *Throughput*: este factor no servirá para determinar la calidad del video al final del proceso.

1.6 Contribución

Esta tesis se enfocará en realizar un diseño de un algoritmo de *scheduling* especializado para las transmisiones de video, tomando en consideración el formato YCbCr. Para lo cual se estudiará a través de simulaciones en Matlab el comportamiento de un agendador de paquetes con priorización de paquetes y uno sin la priorización, con la finalidad de demostrar el beneficio que proporcionaría nuestro agendador.

1.7 Organización de la Tesis

Esta tesis estará organizada de la siguiente manera: el capítulo 2 consta de un marco teórico de la tecnología WiMAX, el cual nos servirá para entender el funcionamiento de la tecnología y comprender algunos conceptos técnicos de la misma. El capítulo 3 presentará la definición de QoS y los diversos conceptos relacionado a la tecnología. A su vez nos presentará un resumen de los diversos algoritmos de *scheduling* existentes a la fecha para comprender un poco el funcionamiento y las diferencias de los mismos. En el capítulo 4 se mostrará el análisis realizado para el diseño del algoritmo, las simulaciones y los resultados. Finalmente en el capítulo 5 se explicarán las conclusiones de esta investigación y trabajos a futuro.

CAPÍTULO 2: VISIÓN GENERAL DE WiMAX

2.1 *Redes Inalámbricas y acceso de banda ancha inalámbrica*

Hoy en día existe un gran número de tecnologías de transmisión inalámbricas que se encuentran vigentes, mientras que otros sistemas se siguen diseñando. Estas tecnologías pueden ser distribuidas a través de diferentes familias de redes, las cuales estarán basadas en la escala de la red a la cual pertenecen. En la Figura 1, se muestra una representación clásica de las categorías de redes inalámbricas, junto con sus tecnologías más conocidas.

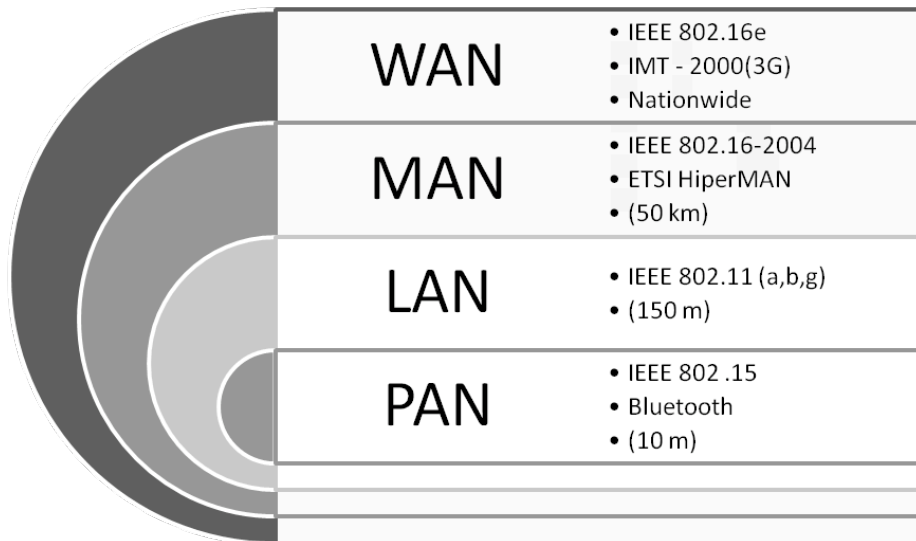


Figura 1: Tecnologías inalámbricas y sus representantes.

“Las redes de Área Personal (PAN) son redes de datos (generalmente inalámbricas) usadas para comunicaciones entre dispositivos de datos cercanos aproximadamente a una persona de distancia. El alcance de las PAN’s es de pocos metros, generalmente menos de

10 metros, aunque algunas tecnologías de WPAN (PAN's inalámbricas) pueden alcanzar distancias más grandes. Algunos ejemplos de tecnologías WPAN son Bluetooth, UWB y Zigbee” (Nuaymi, 2007).

Las redes de Área Local (LAN) son redes de datos usadas para las comunicaciones entre dispositivos de datos como: computadoras, teléfonos, impresoras y PDA's (Asistentes Digitales Personales). Estas redes cubren un área relativamente pequeña, como un hogar, una oficina o campus pequeños (o partes de campus). El alcance de las LAN's son en el orden de unos 100 metros. Las tecnologías más usadas en las LAN's son Ethernet (redes fijas) y WiFi (inalámbricas).

Las redes de Área Metropolitana (MAN) son redes de datos que puede cubrir varios kilómetros, típicamente desde un campus hasta una ciudad. Algunos ejemplos de las tecnologías empleadas son FDDI, DQDB y Ethernet basado en MAN's. WiMAX fijo puede ser considerado como una WMAN (MAN inalámbrica).

Las redes de Área Amplia (WAN) son redes de datos que cubren un área geográfica amplia, tan grande como el planeta. Las WAN's están basadas en conexiones con las LAN's y MAN's, permitiendo a los usuarios de una ubicación geográfica comunicarse con los de otra ubicación geográfica. Típicamente, una WAN consiste en un número de interconexiones de nodos de conmutación. Esas conexiones son hechas a través de líneas arrendadas y métodos de conmutación de circuitos y de conmutación de paquetes. El ejemplo más claro de un WAN es Internet. Otros ejemplos podrían ser 3G y las redes de

WiMAX móvil, que son redes inalámbricas WAN. Las WAN's a menudo ofrecen tasas de datos mucho más pequeñas que de las LAN's (Nuaymi, 2007).

Las redes inalámbricas de banda ancha hoy en día están formando un importante medio de conectividad. Prácticamente cada dispositivo, desde un MP3 hasta un dispositivo de videojuego están siendo diseñados para trabajar con redes de banda ancha inalámbricas o LAN's inalámbricas. La conectividad inalámbrica se volvió prácticamente universal debido a los esfuerzos de la Wireless Fidelity Alliance (ahora llamada WiFi), la cual fue más allá de establecer estándares para las redes inalámbricas (802.11) y empezó un programa de certificación para probar la interoperabilidad de los dispositivos inalámbricos. Dichos dispositivos que pasaron la prueba se les dió la estampa de "WiFi". Hoy en día esto se puede apreciar ya que en todas las computadoras personales y laptops, casi sin excepción, tienen chips WiFi integrados por otro lado las PDA's y *smartphones* soportan WiFi para acceder a las LAN's inalámbricas y usar el teléfono para conectarse a Internet en zonas WiFi.

Este enfoque de certificaciones hecho por la WiFi Alliance es importante ya que el mismo proceso hoy en día se está repitiendo para las redes inalámbricas de área metropolitana (WMAN representada básicamente por el estándar IEEE 802.16) con lo que es WiMAX Forum. Esto ha conseguido que los dispositivos WiMAX sean interoperables y puedan entrar al mercado, logrando de esta manera su despliegue en dispositivos personales, tales como celulares y PC's (Kumar, 2008).

2.2 *IEEE 802.16 WiMAX*

Las características principales de la tecnología IEEE802.16/WiMAX son las siguientes:

- Frecuencia de portadora < 11 GHz: Por el momento, las bandas de frecuencia están consideradas a 2.5, 3.5 y 5.7 GHz.
- OFDM: La tecnología 802.16 principalmente está construida sobre la técnica de transmisión de Multicanalización por División de Frecuencia Ortogonal (OFDM) reconocida por su alta eficiencia en el uso de recursos de radio.
- Tasas de Datos: Un número razonable son 10 Mb/s. Algunos reportes han dado datos más ambiciosos por encima de 70Mb/s o inclusive 100 Mb/s. Esos valores se deben a un muy buen estado del canal de radio y para capacidad celular muy baja.
- Distancia: Arriba de los 20 km y un poco menos para equipos de interiores.

El estándar IEEE 802.16 fue creado en 1999 y fue dividido en 2 grupos de trabajo:

- 802.16a, en el intervalo de los 2-11GHz.
- 802.16, en el intervalo de 10-66 GHz

Varios documentos fueron aprobados y publicados por los subcomités del 802.16.

Los cuales son presentados en la Tabla 1 (Nuaymi, 2007).

Tabla 1: Principales estándares del IEEE 802.16

Fecha y nombre del documento	Descripción
Dic. 2001, 802.16	10-66 GHz; línea de vista (LOS); 2-5 km; valores de canal de ancho de banda: 20,25 y 28 MHz
Ene. 2003, 802.16a	2-11 GHz; sin línea de vista (NLOS)
Oct. 2004, 802.16-2004	Revisión y consolidación del estándar 802.16 previo; reemplaza al 16a y 16; 5-50 km
7 Dic. 2005, 802.16 aprueba la enmienda 802.16e del 802.16-2004	Movilidad; OFDMA (SOFDMA)
Jul. 2006 Otras enmiendas del 802.16 son aprobadas para: 802.16f, 802.16g, etc.	

Fuente: Elaboración propia basada en Nuaymi, 2007.

2.3 Capa Física IEEE 802.16

El estándar universal comprende varios tipos de arquitectura de red, sin embargo WiMAX define 2 tipos de topología de red cada uno con su protocolo de MAC específico: El modo punto a multipunto (PMP) y el modo de malla. El modo de malla es opcional en IEEE 802.16e, donde los datos pueden ser enrutados directamente a 2 estaciones suscriptoras. En el modo PMP, una base central es capaz de manejar múltiples estaciones suscriptoras simultáneamente. Hoy en día, la mayoría de los sistemas WiMAX están equipados con el modo PMP donde el tráfico solo ocurre entre las estaciones base y las

estaciones suscriptoras (Eklund, et all, 2002; Meng, 2007). A continuación en la Figura 2 se muestra el funcionamiento de las redes PMP.

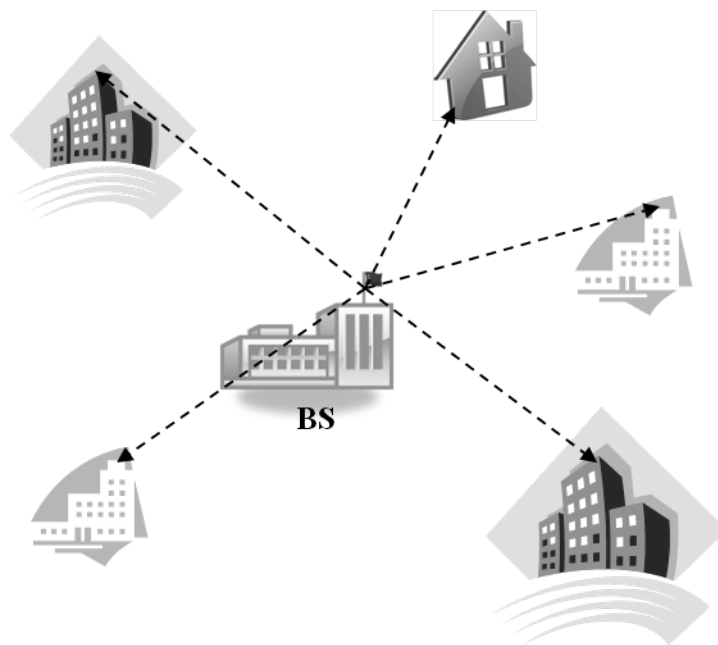


Figura 2: Modo PMP

WiMAX utiliza las bandas de frecuencias desde 10 a 66 GHz; la transmisión recomendada era usando una portadora simple con modulación por rangos desde QPSK a 64 QAM. Este sistema fue ideado para soportar tasas de datos desde 32 Mbps hasta 134 Mbps. La multicanalización estaba basada en Multicanalización por División de Tiempo (TDM/TDMA). Esta modulación se preveía para un funcionamiento en ambientes de Línea de vista (LOS) con antenas direccionales en ambos extremos para así limitar los efectos de

propagación por multitrayectoria los cuales causarían una alta interferencia de intersímbolo. El ancho de canal propuesto para esos sistemas fue de 20, 25 y 28 MHz (Nuaymi, 2007).

2.3.1 IEEE 802.16a

Esta tecnología surge debido a la necesidad de MAN's inalámbricas en ambientes NLOS (sin línea de vista) incluyendo su uso dentro de edificios. Las frecuencias seleccionadas fueron la banda de 2 a 11 GHz. Para el correcto despliegue de esta tecnología fue considerado esencial el uso de esquemas de modulación y de acceso múltiple que aseguraran que los receptores pudieran diseñar un estándar común con una interoperabilidad completa. OFDM fue introducido como uno de los esquemas de transmisión para lograr este propósito debido a sus múltiples subportadoras, y debido a que asigna una tasa baja de bits para ser transportada por una portadora simple.

El modelo de capa física seleccionado en 802.16a incluye 3 variantes:

- Capa física con una portadora simple
- Una subportadora OFDM de 256
- Una subportadora OFDM de 2048

Otras características que fueron adoptadas en la capa física fueron “anchos de canal flexibles” y “selección dinámica de frecuencia”. Por otro lado también se incluían corrección de errores de *forwarding* (FEC) concatenada con la codificación de convolución Reed Solomon (RS) para un rendimiento robusto en ambientes NLOS.

Las siguientes características son claves en la tecnología 802.16 a:

- Rango de frecuencias recomendado de 2 a 11GHz
- Antenas omnidireccionales
- Uso de NLOS y en áreas internas
- La modulación OFDM Y OFDMA para transmisiones de los enlaces de subida y bajada.

2.3.2 WiMAX Fijo IEEE 802.16-2004

En este estándar el grupo IEEE 802.16 estableció las bases de las MAN's y validó las tecnologías en varias aplicaciones, estableciendo que este estándar puede ser usado en bandas licenciadas y no licenciadas y soportando operaciones NLOS usando la modulación OFDM. Por otro lado manejaría tasas altas de bits alcanzando más de 75 Mbps dependiendo de la distancia y si el entorno es un medio rural o urbano.

Las siguientes características son claves en la tecnología IEEE 802.16-2004:

- Banda de Frecuencia: 2-11GHz
- Canales de Ancho Banda: 1.25MHz, 1.75 MHz, 3 MHz, 5 MHz, 7MHz, 8.75 MHz (WiBRO), 10 MHz, 14MHz y 15 MHz.
- *Subportadoras* OFDM: 256 o 2048.
- Esquemas Multiplexación: TDM/TDMA y Ráfagas TDM
- Esquemas de Modulación: QPSK, 16QAM o 64QAM (adaptativa)
- Esquemas de Duplexación: TDD y FDD

2.3.3 IEEE 802.16e (WiMAX Móvil)

WiMAX móvil está basado en el uso de OFDMA (Acceso Múltiple por División de Frecuencia Ortogonal). OFDMA envuelve la asignación de subcanales en ambas direcciones de subida y de bajada a varios suscriptores como un arreglo de acceso múltiple. Este método de asignación de subportadoras se debe al incremento en el rango en el que las estaciones suscriptoras pueden ser conectadas, finalmente esto ayuda a incrementar el rango de cobertura. Por otro lado OFDMA debido a sus características de división de portadoras protege potencialmente a las transmisiones de interferencias de intersímbolo.

Acorde a Kumar (2008) las características claves de este estándar son las siguientes:

- Banda de Frecuencia: 2-6GHz
- Canales de Ancho Banda: 1.75 MHz, 3.5 MHz, 5 MHz, 7MHz, 8.75 MHz (WiBRO), 10 MHz y 15 MHz.
- Subportadoras OFDM: 128, 256, 1024 o 2048
- Esquemas Multiplexación: TDM/TDMA y OFDMA (ver Figura 3)
- Esquemas de Modulación: QPSK, 16QAM o 64QAM (adaptativa)
- Esquemas de Duplexación: TDD y FDD.

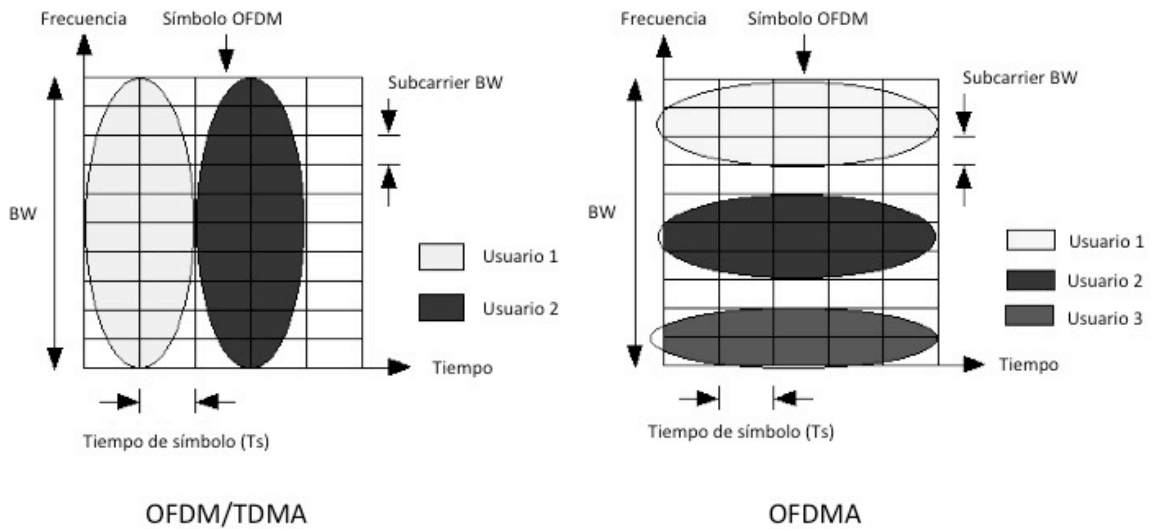


Figura 3: Esquemas de Modulación OFDM y OFDMA.

Fuente: Elaboración propia basada en Meng, 2007.

Acorde a WiMAX Forum (2006) el sistema WiMAX móvil ofrece escalabilidad tanto en la tecnología de acceso y la arquitectura de red, además de proveer una gran flexibilidad en las opciones despliegue de red y servicios ofrecidos. Algunas de las características importantes soportadas por WiMAX móvil son:

“Altas tasas de datos: La inclusión de las técnicas MIMO (*Multiple Input Multiple Output*) en las antenas junto con los esquemas flexibles de subcanalización, codificación y modulación avanzada permitieron a la tecnología WiMAX móvil soportar picos de tasas de datos en DL (*Downlink*) por encima de los 63 Mbps por sector y picos de tasas de datos en el UL (*Uplink*) por encima de los 28 Mbps por sector en un canal de 10 MHz” (WiMAX Forum, 2006).

“Calidad de Servicio (QoS): La premisa fundamental de la arquitectura MAC del IEEE 802.16 es QoS. Se definió los "*Service flows*" (flujos de servicio). Adicionalmente, la subcanalización esquemas de señalización basados en MAP para proveer un mecanismo flexible para una agendización óptima de los espacios, frecuencia y recursos de tiempo sobre la interfaz de aire basada en trama por trama (*frame by frame*)” (WiMAX Forum, 2006).

Escalabilidad: La tecnología WiMAX, está diseñada para ser capaz de escalar para trabajar en diferentes canalizaciones desde 1.25 hasta 20 MHz para así concordar con los variados requerimientos a nivel mundial y proceder a adquirir una armonización de espectro a largo término. Esto también permite a las diversas economías a conseguir los beneficios multifacéticos de la tecnología WiMAX móvil para sus necesidades geográficas específicas como lo puede ser el proveer acceso a Internet en ambientes rurales y el de mejorar la capacidad del acceso móvil de banda ancha en áreas suburbanas.

“Seguridad: Las mejoras provistas son autenticación EAP, encriptación autenticada basada en AES-CCM y esquemas de protección de mensajes basados en control CMAC y HMAC. Soporta un conjunto diverso de credenciales de usuario incluyendo: SIM/USIM, *Smart Cards*, Certificados Digitales y esquema de usuario/contraseña basados en métodos EAP” (WiMAX Forum, 2006).

Movilidad: WiMAX móvil suporta esquemas de *handover* optimizados con latencias de menos de 50 milisegundos para asegurar que las aplicaciones en tiempo real tales como *VoIP* se lleven a cabo sin degradación.

2.3.4 Codificación y modulación adaptativa (AMC)

El principal objetivo de la codificación y modulación adaptativa es el de compensar la inestabilidad del canal de aire. Los esquemas de modulación definidos para WiMAX para el canal de UL y DL son BPSK, QPSK, 16QAM y 64QAM. En WiMAX, la selección de un esquema de modulación básicamente depende de la medición del canal de aire de cada usuario (SNR) y en base éste último se selecciona la modulación más adecuada acorde a la Tabla 2:

Tabla 2: Tasa de bits/símbolo por modulación

Modulación	Tasa de codificación	Bits/símbolo	SNR Recibido (dB)
BPSK	$\frac{1}{2}$	0.5	6.4
QPSK	$\frac{1}{2}$	1	9.4
	$\frac{3}{4}$	1.5	11.2
16QAM	$\frac{1}{2}$	2	16.4
	$\frac{3}{4}$	3	18.2
64QAM	$\frac{2}{3}$	4	22.7
	$\frac{3}{4}$	4.5	24.4

2.4 Capa MAC IEEE 802.16

La capa MAC fue diseñada para soportar aplicaciones BWA punto a multipunto. Y esto se debió a la necesidad de altas tasas de datos, en ambos puntos UL y DL. Los algoritmos de acceso y de asignación de ancho de banda deben ser capaces de acomodar

cientos de terminales por canal, además de que de dichas terminales pueden ser compartidas por múltiples usuarios finales. Para poder soportar esta variedad servicios, la capa MAC debe ser capaz de acomodar el tráfico continuo y de ráfaga. Adicionalmente, a estos servicios se les es asignado un QoS dependiendo el tipo de tráfico (Krishna y Radhamani, 2008).

El propósito fundamental del protocolo MAC es el compartir los recursos del canal de radio entre los múltiples accesos de los diferentes usuarios. En WiMAX, la capa MAC esta dividida en 3 subcapas: la subcapa de convergencia de servicios específicos, la subcapa de partes comunes y la subcapa de seguridad. A continuación en la Figura 4 se muestra un esquema de las capas.

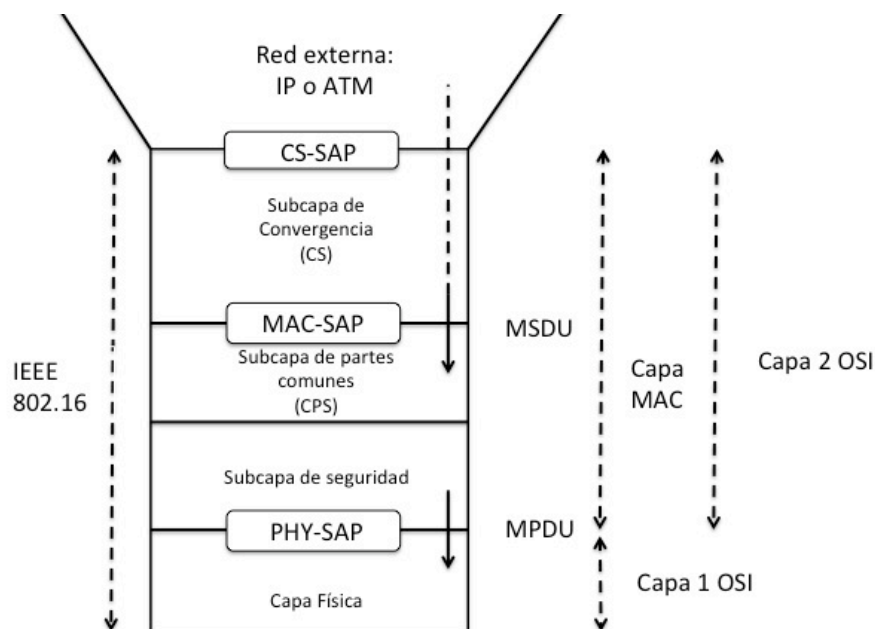


Figura 4: Capas de protocolos del estándar 802.16

Fuente: Elaboración propia basada en Nuaymi, 2007.

La subcapa de convergencia (CS) es la subcapa más alta de la capa MAC. La CS acepta los PDU's (Protocolos de unidad de datos) provenientes de las capas más altas y las transmite a la MAC CPS (Subcapa de partes comunes). La clasificación y mapeo de los MSDU's (Unidad de Servicios de Datos MAC) en CID's (Identificadores de Conexión) es realizada por la CS y es una de las funciones básicas de los mecanismos de QoS de WiMAX. Entre otras de las funciones son la PHS (Supresión de los datos de encabezados) que es el proceso de suprimir partes repetitivas de los encabezados en el transmisor y restaurándolos en el receptor. La clasificación y mapeo es un proceso que permite obtener ventajas de los diferentes atributos de la Capa Física (Nuaymi, 2007).

La subcapa de partes comunes (CPS) es independiente del mecanismo de transporte, el cual es el *kernel* relacionado con todas las características de la MAC. Esta capa es responsable de la fragmentación y segmentación de cada MAC SDU en PDU's MAC, acceso al sistema, asignación de ancho de banda, mantenimiento de la conexión, control de QoS y transmisiones agendadas (*scheduling*), etc. La capa MAC también contiene una subcapa de seguridad la cual maneja la autenticación, intercambio seguro de llaves y encriptación (Meng, 2007).

2.4.1 Formatos de PDU

Una unidad de paquete de datos típica (PDU) inicia con un encabezado genérico de 48 bits, el cual es seguido del “*payload*” (datos) y un campo de chequeo de redundancia cíclica (CRC). A continuación en la Figura 5 se muestra el formato de un PDU.

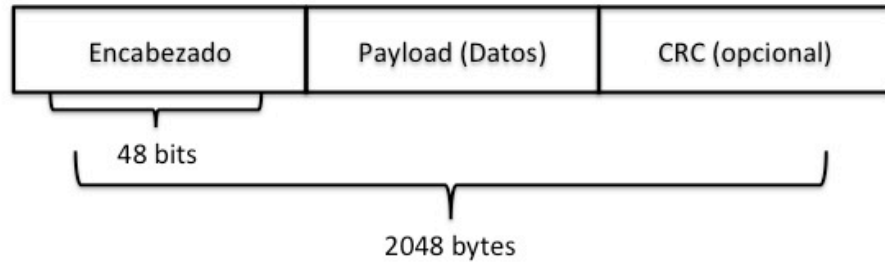


Figura 5: Representación de un PDU.

Existen 2 tipos de encabezados el genérico y el de petición de ancho de banda. Cada uno de 48 bits de longitud y contienen la información de control del PDU transmitido.

2.4.1.1 Encabezado Genérico

El encabezado genérico es representado a través de la Figura 6.

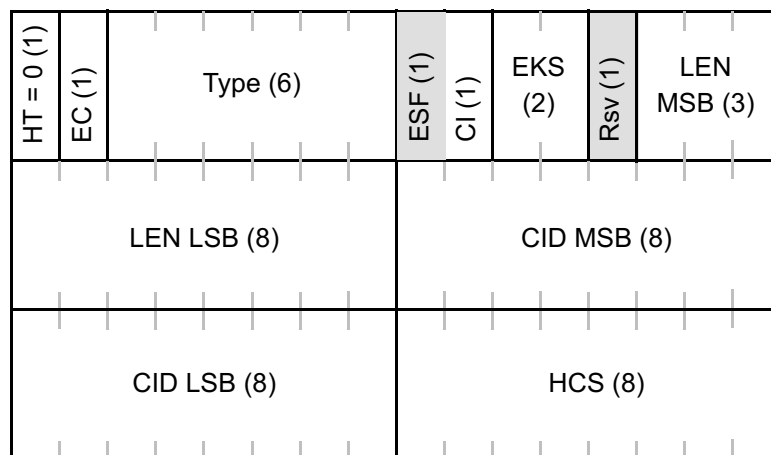


Figura 6: Encabezado Genérico.

Fuente: IEEE, 2009.

La Tabla 3 explicará cada uno de los campos del encabezado previamente mostrados por la Figura 6.

Tabla 3: Campos del encabezado genérico.

Nombre	Longitud (bits)	Descripción
CI	1	Indica si existe CRC
CID	16	Identificador de conexión
EC	1	Control de encriptación
EKS	2	Secuencia llave de encriptación
ESF	1	Indica si existen subencabezados extendidos
HCS	8	Secuencia de chequeo de encabezados
HT	1	Tipo de encabezado
LEN	11	Longitud de la carga de información
RSV	1	Reservado
Type	6	Indica la presencia de subencabezados y carga de información especiales.

Fuente: Elaboración propia basada en IEEE, 2009.

2.4.1.2 Encabezado de petición de ancho de banda

El encabezado de petición de ancho de banda es representado a través de la Figura 7.

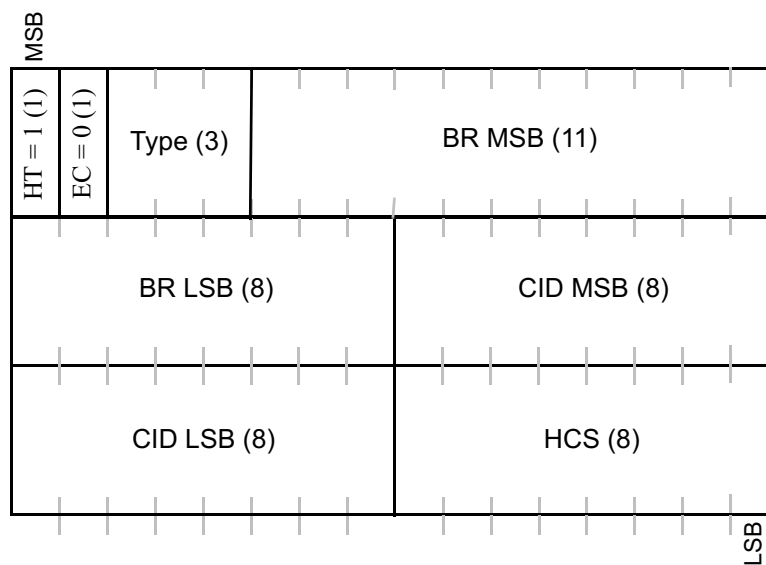


Figura 7: Encabezado de petición de BW.

Fuente: IEEE, 2009.

La Tabla 4 explicará cada uno de los campos del encabezado previamente mostrados por la Figura 7.

Tabla 4: Campos del encabezado de petición de BW.

Nombre	Longitud (bits)	Descripción
BR	19	Ancho de banda requerido
CID	16	Identificador de conexión
EC	1	Control de encriptación. Siempre en ceros.
HCS	8	Secuencia de chequeo de encabezados
HT	1	Tipo de encabezado. Siempre en 1.
Type	3	Indica la presencia de subencabezados y carga de información especiales.

Fuente: Elaboración propia basada en IEEE, 2009.

2.4.1 Conexiones y Flujos de Servicio (SF)

A través de la red la SS define 3 tipos de administración de conexiones en cada dirección. Esas 3 conexiones reflejan los diferentes requerimientos de QoS usados en cada uno de los niveles (WiMAX Forum, 2006):

- Conexiones básicas: Transfieren mensajes cortos de tiempo crítico MAC y de control de radio enlace (RLC).
- Conexiones de administración primaria: transfiere mensajes más grandes y tolerantes a retrasos, como los de autenticación y conexión. Las conexiones secundarias transfiere mensajes basados en el estándar tales como DHCP, TFTP, SNMP.
- Conexiones de transporte: son unidireccionales y sirven para facilitar a los diferentes UL y DL los parámetros de QoS y de tráfico.

La clasificación y mapeo están basadas en dos conceptos fundamentales:

- Conexiones: Una conexión se realiza entre la BS y SS e inversamente. Tiene un mapeo unidireccional. Una conexión es para un solo tipo de servicio y es identificada por un CID, el cual es información codificada en 16 bits (Nuaymi, 2007).
- SF: Es un servicio de transporte de la capa MAC que provee un transporte unidireccional de paquetes en el canal UL y DL. Es identificado por un SFID (Identificador de Flujo de Servicios). El SF define los parámetros de

QoS para los paquetes PDU que son intercambiados en la conexión (Nuaymi, 2007).

Acorde a Nuaymi (2007) existen 3 tipos de SF:

- SF Provisionados: donde los parámetros de QoS Admitidos y Activos son Nulos.
- SF Admitidos: es donde los recursos primero son admitidos y al finalizar la negociación los recursos son activados.
- SF Activos: donde el parámetro de QoS Activo no es Nulo.

A continuación en la Figura 8 se mostrará una relación entre CID y SFID.

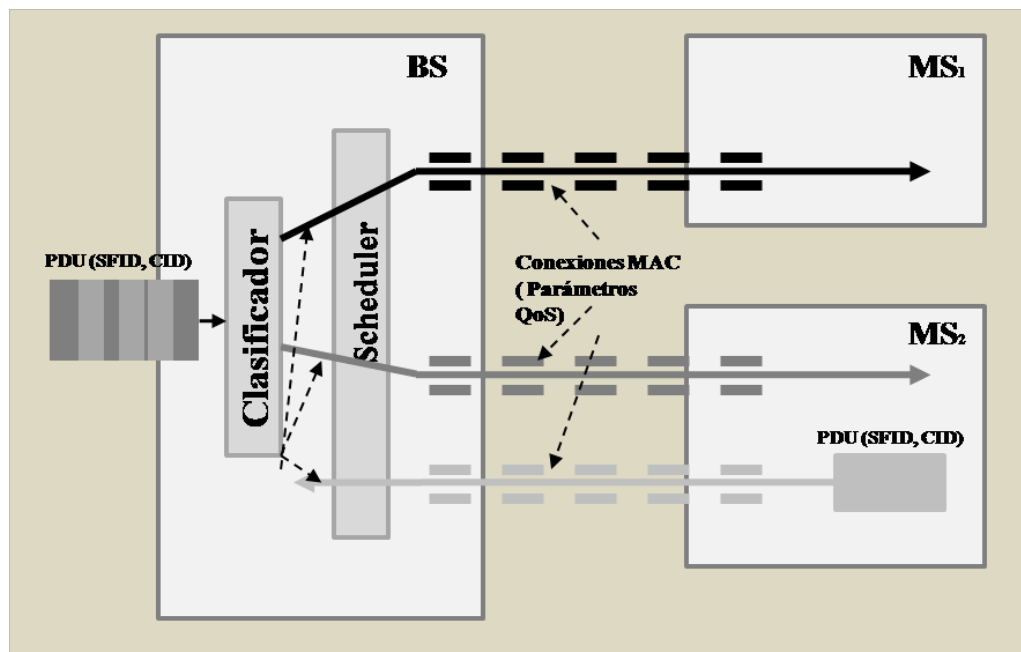


Figura 8: Esquema de relación CID y SFID.

Fuente: Elaboración propia basado en WiMAX Forum, 2006.

2.4.2 Clasificación y Mapeo

La clasificación es el proceso por el que una MAC SDU es mapeada sobre una conexión en particular para su transmisión entre los usuarios. El proceso de mapeo asocia una MAC SDU con una conexión, también crea una asociación con el SF de esa conexión. Este proceso existe tanto en el UL como en DL.

El clasificador es un conjunto de criterios de igualdad aplicado a cada paquete entrante. Los conjuntos consisten en paquetes específicos de protocolos, un clasificador de prioridad y una referencia a un CID (Nuaymi, 2007).

2.4.3 CS Y QoS

La primera característica de la administración de QoS es la definición del orden de transmisión y el *scheduling* sobre la interface aérea. Por esta razón a cada paquete que cruza por la interface MAC se le asocia un flujo de servicio (SF) identificado por un CID. En la Figura 9 se muestra la relación entre SF y CID.

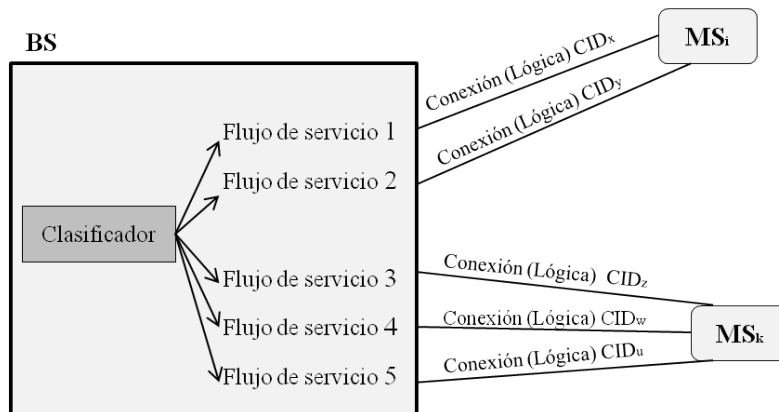


Figura 9: Clasificación y mapeo de CID's.

Los principales parámetros son los siguientes (Nuaymi, 2007):

- Tipo de servicio *scheduling*: los 4 posibles valores son BE (Mejor esfuerzo), nrtPS (non real time Polling Service), rtPS (real time Polling Service) y UGS (Unsolicited Granted Services).
- Prioridad de tráfico.
- Tasa de tráfico máximo sostenido: tasa pico de datos en el servicio.
- Ráfaga de tráfico máximo.
- Tasa de tráfico mínimo sostenido.
- Parámetros de QoS específicos de los vendedores.
- *Jitter* tolerado.
- Máxima latencia.
- Tamaño del SDU.
- Políticas de petición/transmisión.

En resumen en este capítulo se mostraron las características de la capa MAC y la capa física de WiMAX, además de los aspectos técnicos que las componen, tal y como es el caso de la formación de los paquetes, la modulación y codificación adaptativa y los valores de ancho de banda de canal permitidos; los cuales formarán parte del proceso de simulación de esta tesis. En conclusión este capítulo sirvió como base para la formación de la capa MAC en Matlab y para poder simular el comportamiento de los paquetes dentro del sistema, además de proporcionar la idea general para el uso de la modulación y codificación adaptativa.

CAPÍTULO 3: QoS en WiMAX

La calidad de servicio puede ser interpretada en varias formas, sin embargo en general para nuestra área, QoS puede ser descrito desde 2 perspectivas: Perspectiva del usuario y la perspectiva de red. En la perspectiva del usuario, QoS se refiere a la calidad de las aplicaciones desde el punto de vista del usuario. En la perspectiva de la red, QoS se refiere a la calidad del servicio que la red ofrece a las aplicaciones o a los usuarios en términos de: latencia o retrasos de paquetes a través de la red, confiabilidad de los paquetes de transmisión y el desempeño de la red. Por lo que los parámetros de QoS que forman parte de una red son:

- Desempeño.
- Retrasos.
- *Jitter*.
- BER.
- Tasa de pérdida de paquetes.

WiMAX está diseñado para soportar un buen QoS. Parte importante de este alto QoS es debido a que la capa MAC está basada en el concepto de SF, aparte de que cuenta con un algoritmo de agendización que determine el ancho de banda no definido de los canales de UL y DL lo cual mejora el rendimiento general de la red. Las transmisiones en el canal DL es relativamente simple, debido a que solamente las BS realizan *broadcasting* (difusión) de mensajes en este canal para llamar a todas las SS, y es así como cada una de ellas recoge aquellos paquetes que le correspondan. En el canal UL, múltiples SS envían

sus paquetes usando el mecanismo de TDMA. Cada SS transmite en ranuras de tiempo predefinido por su BS. El número de ranuras de tiempo especificadas por SS es determinado por la BS y el *broadcasting* a través del UL-MAP al inicio de cada trama. El UL-MAP contiene elementos de información (IE), los cuales incluyen oportunidades de transmisión (ranuras de tiempo) en los cuales las SS pueden transmitir durante la subtrama de UL. Las SS piden a la BS sus requerimientos de ancho de banda para la conexión y es esta última la responsable de asignar el ancho de banda necesario para las conexiones nuevas, si es que tiene disponible, y de mantener la QoS en las conexiones que tenga ya en uso (Zhang y Chen, 2008).

Hay 2 formas en las que las BS otorgan ancho de banda: otorgamiento por conexión (GPC) y otorgamiento por estación suscriptora (GPSS). En el primer caso la BS solamente otorga el ancho de banda requerido por la SS, mientras que en el segundo otorga todo el ancho de banda disponible, y ya la SS deberá ser capaz de administrar los recursos distribuidos entre los diferentes tipos de SF y de mantener la QoS. Esto permite el uso de una agendización jerárquica y distribuida (Zhang y Chen, 2008).

La capa MAC permite la clasificación del flujo de tráfico y dirigirlo hacia las conexiones con servicios especiales de agendización. Cada conexión está asociada con un servicio de agendización de datos y cada servicio de datos está asociado con un conjunto de parámetros de QoS que cuantifican los aspectos de su comportamiento. Para Zhang y Chen (2008); Ohrtman (2005) y Klein, A. (2008) el estándar IEEE 802.16 define 4 tipos de servicios de agendización:

- UGS: soporta servicios de flujos de UL en tiempo real que transporta paquetes de datos fijos basados sobre un periodo, tales como VoIP (Voz a través de Internet).
- rtPS: soporta flujos de servicio en tiempo real en UL que transportan paquetes de datos variables basados sobre un periodo, tal como video MPEG. Este servicio requiere un mayor *overhead* (mayor uso de encabezados) que los UGS, pero soportan tamaños variables de otorgamiento de recursos para una eficiencia óptima en el transporte de datos.
- nrtPS: soporta flujos en tiempo no reales tales como el protocolo de transferencia de archivos (FTP).
- *Best Effort*: provee servicios eficientes para obtener el mejor esfuerzo en el tráfico en el canal de subida, tal como en el caso de HTTP.

Para WiMAX Forum (2006) WiMAX móvil soporta un amplio rango de servicios de datos y aplicaciones con requerimientos variados de QoS. Los cuales pueden ser resumidos en la Tabla 5:

Tabla 5: Aplicaciones de WiMAX móvil y QoS.

Categoría de QoS	Aplicaciones	Especificaciones de Qos
UGS	VoIP	Tasa máxima sostenida Tolerancia de Latencia Máxima Tolerancia a Jitter
rtPS	Difusión Audio o Video	Tasa mínima reservada Tasa máxima sostenida Tolerancia de Latencia Máxima Prioridad de tráfico
nrtPS	FTP	Tasa mínima reservada Tasa máxima sostenida Prioridad de tráfico
BE	Web, Transferencia de datos, etc.	Tasa máxima sostenida Prioridad de tráfico

Fuente: Elaboración propia basada en WiMAX Forum, 2006.

3.1 Servicios Scheduling en MAC

Según WiMAX Forum (2006) todo servicio de *Scheduling* debe tener las siguientes propiedades para que posibiliten los servicios de banda ancha:

- *Agendador veloz de datos*: El agendador deberá asignar eficientemente los recursos disponibles en respuesta al tráfico de ráfagas de datos y las condiciones variantes en el tiempo del canal. También deberá estar localizado en cada BS para permitir una rápida respuesta a los requerimientos del tráfico y las condiciones del canal. Los paquetes de datos son asociados a los SF con sus parámetros definidos de QoS en la capa MAC, de tal forma que el agendador pueda determinar el orden de la transmisión del paquete.

- *Scheduling* en DL y UL: para que el agendador realice una eficiente asignación de recursos y provea la QoS deseada en el UL, la SS debe retroalimentar información certera y puntual de las condiciones del tráfico y de los requerimientos de QoS. El SF del UL define el mecanismo de retroalimentación para cada conexión en el UL y de esta manera se asegura el comportamiento del agendador.
- *Asignación dinámica de recursos*: la capa MAC soporta la asignación de recursos variantes en tiempo-frecuencia en ambas conexiones UL y DL. La asignación de recursos es entregada en mensajes MAP al inicio de cada trama. Por lo consiguiente, la asignación de recursos puede cambiar trama por trama en respuesta al tráfico y las condiciones del canal. Mientras más rápida y granular sea la asignación de recursos se podrá tener una QoS superior para el tráfico de datos.
- *QoS Orientada*
- *Agendador selectivo de frecuencia*: El agendador deberá poder operar en diferentes tipos de subcanales. Para subcanales de diversas frecuencias como en las permutaciones PUSC, donde las subportadoras en los subcanales son pseudo-aleatorios distribuidos a través del ancho de banda. También este tipo de agendización puede soportar QoS con una granularidad fina y con flexibilidad de recursos en tiempo-frecuencia. En permutaciones contiguas como en la permutación AMC, los subcanales pueden experimentar diferentes atenuaciones. La agendización selectiva en frecuencia podrá mejorar la capacidad del sistema

con un moderado incremento en el encabezado CQI (Indicador de calidad del canal) en el UL (Wang, et al, 2005).

3.2 Mecanismos que soportan la QoS en WiMAX

En años recientes, varios sistemas de QoS han sido propuestos para la arquitectura y los esquemas de soporte en WiMAX. En la Figura 10 se mostrará un diagrama con los esquemas de QoS más representativos de WiMAX.

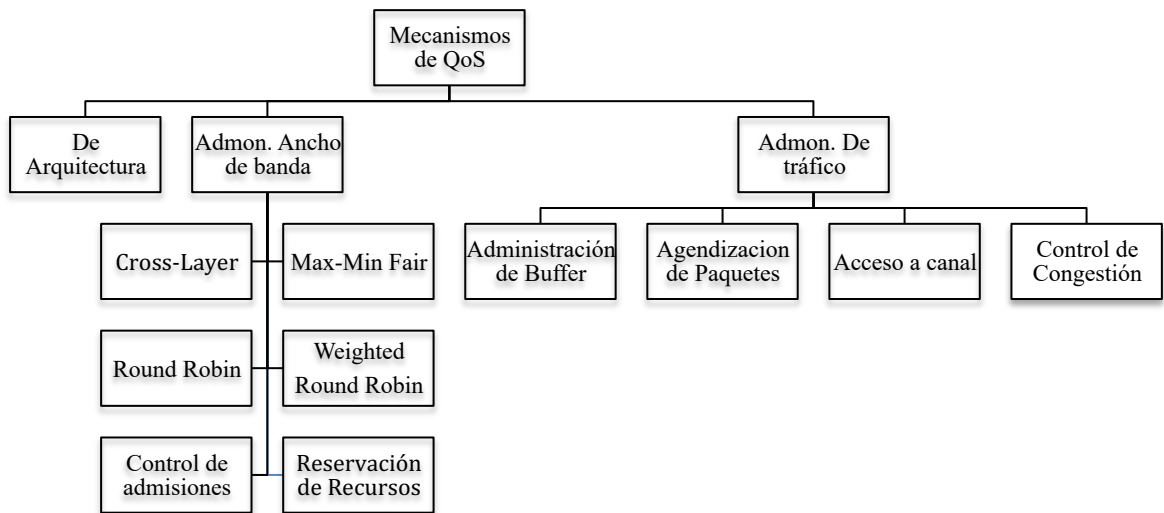


Figura 10: Esquemas de QoS más representativos de WiMAX

Fuente: Elaboración propia basada Maode y Jinchang, 2007.

3.2.1 QoS en la Arquitectura de WiMAX

Alavi; Mojdeh y Yazdani (2005) proponen una arquitectura inclusiva para soportar QoS en WiMAX. Los autores desarrollaron un método compatible para los módulos específicos como los son el Agendador, *Traffic Shaper* y el administrador de peticiones y otorgamientos para optimizar el retraso, el rendimiento y las métricas de utilización de ancho de banda.

Yi-Ting, Chun-Chuan y Yu-Hsuan (2007) proponen que la capa MAC cruce a la capa de Red en una estructura de QoS en el modo DL y UL para proveer un soporte de QoS en las redes WiMAX. La estructura propuesta de cruce de capas (*cross-layer*) integra QoS en la capa 2 y la capa 3 de WiMAX. Los bloques principales de la estructura incluyen: Mapeo de ambas capas, control de admisión, control de fragmentación, y un remapeo. El control de fragmentación maneja las tramas de datos de los datagramas IP iguales como un grupo en las operaciones de capa 2 para reducir las transmisiones sin usos. El remapeo está diseñado para un uso más flexible de los *buffers* de la capa 2 cambiando las reglas de mapeo de la QoS IP para los tipos de servicio en situación de congestionamiento (en cola de rtPS) de la capa 2.

Kwon, Lee, et all (2005) proponen una estructura *Cross-Layer* para sistemas OFDMA WiMAX Móvil que son compatibles con WiBro basados en varios tipos de protocolos *cross-layer* para mejorar el rendimiento: una estructura adaptativa *cross-layer* y un diseño de ejemplo de las principales operaciones entre las capas MAC y PHY. En el modelo propuesto, la capa MAC contiene un agrupador de usuarios, agendador y un controlador de recursos. Cada entidad funcional explota la información de la capa Física

para incrementar el rendimiento del sistema. La capa Física consiste en la diversidad de un controlador PPDU, controlador PPDU de canal AMC, un controlador para la información y bloques funcionales HARQ (Petición Automática Híbrida). Debido a las propiedades de los subcanales AMC y la diversidad, el agrupamiento de los usuarios en 2 canales es esencial si se requiere un rendimiento alto.

3.2.2 Mecanismos de QoS en administración de ancho de banda

Los mecanismos de administración de ancho de banda son aquellos que administran los recursos de la red coordinando y configurando los mecanismos de manejo de tráfico de los dispositivos de red (Maode y Jinchang, 2007).

3.2.2.1 Reservación de Recursos

Los mecanismos de reservación de recursos informan a las entidades de la red sobre los requerimientos de QoS de las aplicaciones que se encuentran utilizando los recursos de la red. Los dispositivos de red utilizarán esta información para administrar los recursos de la red en orden para satisfacer dichos requerimientos. Estos mecanismos incluyen las siguientes funciones (Gakhar, Achir, Gravey, 2006) :

- Aprovisionamiento de señalización de recursos de reserva
- Entrega de requerimientos de QoS a los mecanismos de control de admisiones
- Notificación a la aplicación del resultado de la admisión

3.2.2.2 Control de Admisiones de Conexiones (CAC)

El control de admisiones determina como el ancho de banda y la latencia son asignadas. El rol de CAC es el de controlar el número de flujos de conexiones a la red. Cuando una nueva conexión es solicitada solamente progresa si existen suficientes recursos disponibles en cada elemento sucesivo de la red para establecer la conexión a través de la red entera basándose en su categoría de servicio, contrato de tráfico y QoS, mientras la calidad de servicio de todas las demás conexiones existentes son mantenidas. El control de admisiones es útil en situaciones donde un cierto número de conexiones comparten un mismo canal, sin embargo cuando es número grande de conexiones causa una degradación en todas las mismas al punto de hacerlas inutilizables causando un colapso por congestión (Maode y Jinchang, 2007).

Los esquemas CAC propuestos se dividen en 2 estrategias. La primera está basada en la degradación del servicio. Consiste básicamente en ir degradando las conexiones existentes para dar lugar a nuevas conexiones. Incluyendo algoritmos para la degradación de servicios (Ge y Kuo, 2006), préstamo de ancho de banda y robo de ancho de banda (Jiang y Tsai, 2006). La segunda estrategia es sin degradación. En ésta se mantiene la QoS provista para las conexiones existentes y simplemente rechaza los nuevos flujos de servicio si no hay suficientes recursos disponibles (Wongthavarawat y Ganz, 2003).

Otros esquemas CAC (Wang; He y Agrawal, 2006) como los de búsqueda binaria a través de una asignación de ancho de banda justo (*fairly allocation bandwidth*) usando un modelo Gaussiano para el manejo del tráfico en redes grandes y el método de Chernoff para obtener una probabilidad superior a los límites de bloqueo. Su función consiste en clasificar

el ancho de banda total y asignarlo justamente a las diferentes clases de tráfico de multimedia en las redes WiMAX. El ancho de banda es dividido en 4 porciones según sea su prioridad y QoS requerido (UGS, BE, rtPS, nrtPS).

3.2.2.3 Administración en Cross Layer

Acorde a Chen, Jiao, y Guo (2005), su esquema apunta a proveer una garantía en usuarios finales usando *IntServ* y *DiffServ* en conexiones orientadas PMP WiMAX y redes de malla. El mapeo trabaja en el RVSP en la capa IP y DSA/DSC/DSD en la capa MAC. Los autores proponen que el intercambio de mensajes entre DSA y DSC puede ejecutado para acarrear los parámetros de QoS de los servicios *IntServ* para la reservación recursos de los usuarios finales (ancho de banda/buffer). Para los servicios *DiffServ*, un número de comportamiento por saltos (PHB) puede ser mapeado en diferentes conexiones para diferentes clases de tráfico.

3.2.2.4 Round Robin

Esta unidad de *scheduling* simplemente agenda los servicios activos de manera equitativa. Este sistema posee la máxima equidad, ya que agenda los servicios en base a la cantidad de datos o la duración de tiempo por igual para todos en una unidad de tiempo. Sin embargo este sistema posee la desventaja de que no posee ningún tipo de priorización de la información. Aunado al hecho de que los usuarios deben adaptarse a la cantidad de datos o

tiempo para que se pueda transmitir su información. Este sistema no es apto para un ambiente que posea una diversidad de servicios (Klein, A., 2008).

3.2.2.5 Weighted Round Robin

Este sistema básicamente trata de solventar las deficiencias del Round Robin, para ello incluye una manera de priorizar los servicios otorgándoles un “peso”. El servicio con un tamaño mayor de peso será capaz de transmitir más paquetes que los que posean un valor menor.

3.2.2.6 Max-Min Fair

El funcionamiento básico de este sistema es tratar de asignar recursos de manera equitativa para todos los servicios existentes. El principal objetivo consiste en minimizar la cantidad de flujos insatisfechos. El algoritmo se basa en 3 principios (Klein A, 2008):

- Los recursos son asignados en orden de la demanda
- A ningún flujo se le otorgarán más recursos de los que fueron pedidos.
- A los flujos insatisfechos se les asignara una parte igual de los recursos no utilizados.

3.2.3 MECANISMOS DE QoS DE MANEJO DE TRÁFICO

Estos tipos de mecanismos clasifican, manejan, vigilan y monitorean el tráfico a través de la red.

3.2.3.1 Administración del Buffer

La administración del buffer se describe a la disciplina particular en la cual se regula la estadía de paquetes en una cola particular y como los mismos son almacenados o eliminados. El buffer es implementado para mejorar el rendimiento del sistema y la utilización del canal, sin embargo también se incrementa el retraso en cola de los paquetes. Parte importante en esta técnica es el cómo establecer el tamaño del buffer, como hacer más eficaz su rendimiento cuando el sistema es dinámico y cómo alcanzar un punto de redituabilidad entre rendimiento y retrasos en cola. Algunas de las técnicas empleadas para el manejo de colas son FIFO (*First Input First Output*), CQB (*Class Based Queueing*), FQ (*Fair Queueing*), DRR (*Deficit Round Robin*).

3.2.3.2 Control de Congestión

El objetivo del control de congestión es el de controlar el tráfico entrante a la red, con la finalidad de evitar un colapso por congestión el cual puede ser provocado por sobreescripciones al sistema o bien que las capacidades del enlace cambien. En este sistema la información de paquetes perdidos puede servir como un índice de la congestión

en la red, para que de esta manera haya ajustes en las tasas de datos. Este tipo de sistema puede llegar a ser muy complejo de operar en ambientes inalámbricos ya que existe un gran número de efectos que afectan al medio (Maode y Jinchang, 2007)..

3.2.3.3 *Agendización de Paquetes*

Esta rama está enfocada en el proceso de toma de decisiones sobre que paquetes deben ser servidos o eliminados. Su tarea principal consiste en satisfacer los requerimientos de QoS de cada usuarios mientras se eficientiza el ancho de banda disponible (Maode y Jinchang, 2007).

DBS (*Deadline-Based Scheduling*) es una de las técnicas más utilizadas, la cual consiste en asignar un tiempo límite a cada paquete para que sea transmitido. Ese valor que se le otorga regirá el orden en el que son servidos (Klein A, 2008).

En resumen en esta sección se explicó lo relacionado a QoS en WiMAX, los 4 tipos de servicios de *scheduling* establecidos en el estándar y las diferentes opciones que se tienen de agendadores hoy en día. Debemos recordar que el objetivo de este capítulo fue familiarizarnos con los métodos ya existentes y mostrar un panorama general de la gama de posibilidades que se pudieran llegar a combinar. Como podemos ver la implantación de un sistema como estos no es una tarea simple, sin embargo es de gran necesidad y utilidad para asegurarnos que el sistema tendrá un rendimiento adecuado. Hasta la fecha el cómo combinar los mecanismos de administración de ancho de banda y el manejo del tráfico siguen siendo motivo de más investigaciones.

CAPÍTULO 4: SIMULACIONES Y RESULTADOS

4.1 Descripción General

Para el diseño del sistema sobre el cual se realizaron las pruebas fue necesario realizarlo por etapas. Inicialmente se diseñó la capa MAC basándonos en un sistema WiMAX PMP móvil. En este sistema una estación base (BS) provee el servicio a un número variable de usuarios (SS). Para efectos de focalización de esta tesis el punto clave fue la simulación del canal de bajada (DL), donde finalmente comienza el funcionamiento de nuestro *scheduler* priorizando y administrando las colas, sin embargo para poder cargar cada uno de los videos de los usuarios también se requirió del UL, siendo éste último un proceso simplificado debido al objetivo principal de ésta tesis que es el de simular el *scheduler*, siendo un trabajo a futuro desarrollarlo completamente. La interfaz de aire empleada durante la simulación fue OFDMA con la finalidad de permitir a múltiples usuarios.

Para simular el efecto de las pérdidas por la capa física, se utilizaron el esquema de AMC mencionado previamente en la sección 2.3.4, el cual es un parámetro que posteriormente toma su efecto en la modulación a emplear acorde a la distancia de cada usuario y las fórmulas para hallar el SNR para la frecuencia 3.5 GHz que acorde a Mach y Bestak (2007).

$$N = BW * \left(\frac{4 * 10^{12}}{10^9} \right)$$

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

$$P_r(\text{dBm}) = P_t - L$$

$$SNR(\text{dB}) = P_r - N$$

Donde:

- N = ruido
- BW = ancho de banda del sistema.
- L = pérdidas de propagación.
- d = distancia del usuario.
- λ = longitud de onda.
- P_r = Potencia recibida.
- SNR = Señal relación a ruido.

Parte importante de esta tesis es el correcto análisis de esta modulación adaptativa ya que de ella dependerá la cantidad de datos a enviar y como el *scheduler* organizará las transmisiones para obtener el mejor desempeño posible. Durante el análisis posterior se demostrará como afecta este parámetro en conjunto con el ancho de banda del canal la cantidad de datos (PDU's) que un usuario puede transmitir.

Como se mencionó inicialmente, para la correcta prueba del *scheduler* se partió a desarrollar la capa MAC en Matlab. Acorde al estándar (IEEE, 2009), para que un usuario pueda suscribirse a una BS primero debe realizar varios procesos como lo son: Petición de

inscripción (*ranging*), registrarse, establecer conexión, entre otros más. Para efectos de practicidad estos pasos fueron simplificados, debido a que esta sección no forma parte del objetivo de esta tesis. Por lo tanto una vez realizado el registro y la conexión, partiendo del hecho de que cada usuario transmitiría video, se procede a la carga de los videos de todos los usuarios y a su paquetización. Los encabezados de cada uno de los PDU's correspondientes al video, fueron realizados acorde al estándar genérico tal y como se mostró en la sección 2.4.1.1. tal y como sucedería en la capa MAC de WiMAX, siendo todos ellos identificados por un identificador CID, dicho identificador es único para cada usuario, y es a través de éste como los receptores saben a quién corresponde cada paquete.

Para este punto un aspecto importante ya fue realizado, el cual es la conversión del video de un formato RGB a YCbCr 4:2:2 , lo cual será pilar posteriormente para discriminar la información, comprimir y priorizar los paquetes para un uso efectivo del canal y para jerarquizar los paquetes en el *scheduler*.

Como referencia para saber que es RGB, brevemente podemos decir que es el formato en el que las cámaras de video graban y reproducen el video, este formato básicamente es la composición del color en términos de la intensidad de los colores primarios con los que se forma: el rojo, el verde y el azul, es de ahí donde proviene su siglas en ingles.

En relación a el formato YCbCr se trata de una base colorimétrica utilizada en sistemas de transmisión de vídeo y televisión. Dado que la base colorimétrica del formato RGB contiene mucha información redundante, este formato viene a ser la solución. La utilidad de este formato se atribuye a sus capacidades de compresión, las cuales son útiles

cuando los medios de transmisión son escasos, y tomando en cuenta que su calidad es equiparable a la del RGB, lo convierte en la mejor opción.

Una vez realizado el proceso de carga y paquetización de los videos partimos al módulo importante de esta simulación, el agendador. Esta sección se explicará más a detalle posteriormente, sin embargo en resumen este proceso conlleva la carga y el manejo de los usuarios dentro de la BS, y como esta los sirve a través del tiempo.

En relación a la capa física, y todo el proceso de convertir los datos a símbolos, este proceso no fue llevado a cabo, reiterando una vez más que el objetivo de esta tesis no tenía como objetivo el realizar la simulación del proceso de la capa física, sin embargo si se tomó en cuenta en relación al efecto de las pérdidas que esta podría causar.

Finalmente para terminar con la simulación se hace el proceso de recepción de los paquetes, teniendo esto último como fases importantes: las pérdidas por manejo en el agendador y las pérdidas por las capa física, lo cual afecta de manera directa a la integridad de la información del video. Posteriormente el video es procesado por los receptores y al final se genera el video recibido en formato “.avi”.

En resumen se puede hablar de 2 aspectos clave de la simulación: el hecho de implantar un sistema M/M/1 para simular el ingreso de los usuarios al sistema y como envían sus paquetes, y la priorización de paquetes dentro del sistema M/M/1. Siendo finalmente 2 escenarios los que se analizaran:

- El sistema llevando a cabo la priorización de paquetes.
- El sistema sin priorización de paquetes.

4.2 Descripción del Agendador.

En esta sección partiremos a describir el proceso guiándonos de la Figura 11, la cuál nos explicará el proceso llevado a cabo por cada una de las secciones.

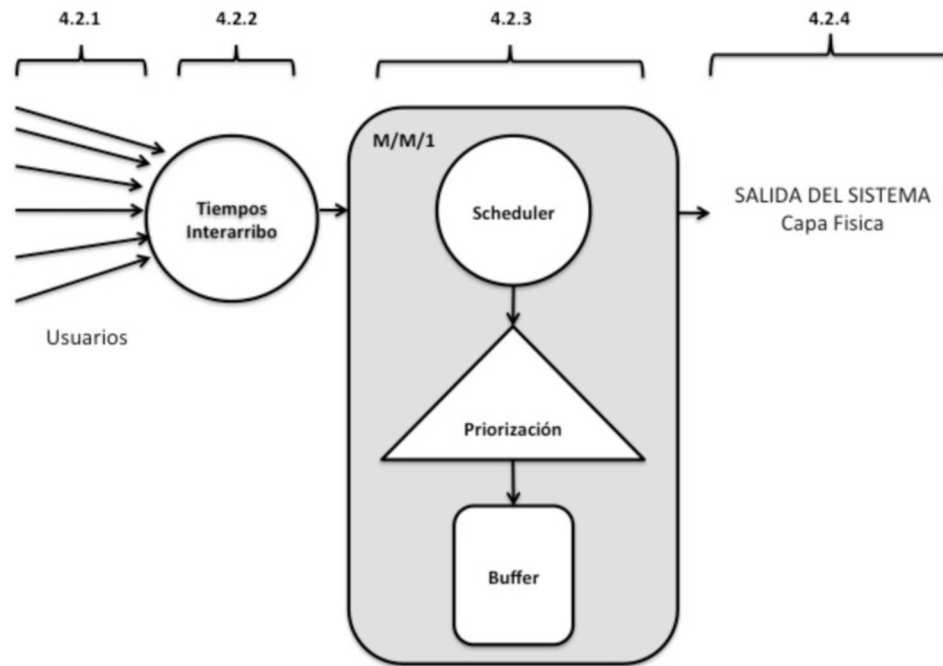


Figura 11: Componentes del sistema propuesto.

4.2.1 Cálculo de PDU's

Para esta sección inicialmente se encontraron las tasas de datos que cada modulación podría transmitir. Para lo cual utilizamos la siguiente fórmula acorde al sistema OFDMA PHY.

$$\text{Duración de un símbolo OFDMA} = \frac{1}{\left(\frac{nBW}{NFFT}\right) * (1+G)}$$

Donde:

- n = factor de muestreo, puede tomar los valores de: 8/7 y 28/25.
- BW = ancho de banda del canal.
- N_{FFT} = Número total de subportadoras
- G = Tiempo de guarda.

Conociendo la tasa de codificación y el número de bits no codificados que pueden ser transmitidos se puede calcular la tasa de datos. Para lo cual emplearemos la siguiente fórmula:

$$Tasa\ de\ Datos = \frac{\text{núm. de bits no codificados por símbolo}}{\text{duración del símbolo OFDMA}}$$

- El número de bits no codificados depende de la modulación a emplear a continuación en la Tabla 6 se indican los bits por tipo de modulación, y las tasas de codificación empleadas en el estándar:

Tabla 6: Modulaciones y sus tasas de codificación.

Modulación	Bits por símbolo	Tasas de Codificación
BPSK	1	$\frac{1}{2}$
QPSK	2	$\frac{1}{2}, \frac{3}{4}$
16-QAM	4	$\frac{1}{2}, \frac{3}{4}$
64-QAM	6	$\frac{2}{3}, \frac{3}{4}$

- Quedando la fórmula de la siguiente manera:

$$Tasa\ de\ Datos = \frac{(bits\ de\ datos\ OFDMA * Densidad\ de\ modulación * tasa\ de\ modulación)}{1 / (nBW / N_{FFT}) (1 + G)}$$

Para efectos de la simulación, los parámetros utilizados fueron un $G = 1/8$ y $BW = 7$ MHz por usuario, este BW es para efectos exclusivos de esta simulación, ya que al no contar con un compresor de video, la secuencia de video debe ser procesada tal cual y por tanto ocupa un mayor ancho de banda, siendo un trabajo a futuro incorporar el compresor de video para utilizar un BW más realista. En la Tabla 7 se muestran los resultados obtenidos para los diferentes tipos de modulación.

Tabla 7: Tasas de datos en Mbps por modulación.

Modulación	Tasa de modulación	Mbps
BPSK	1/2	2.67
QPSK	1/2	5.33
QPSK	3/4	8
16-QAM	1/2	10.67
16-QAM	3/4	16
64-QAM	2/3	21.33
64-QAM	3/4	24

Una vez conociendo las tasas de datos que puede transmitir cada modulación, partimos al análisis matemático del video, para lo cual es necesario hacer el cálculo de los

PDU's requeridos para transmitir al mismo. A continuación se muestra el procedimiento para el cálculo para un video de 96x128 pixeles:

$$1 \text{ Cuadro} = 96 \times 128 \times 3 \text{ bytes}$$

Cada matriz de 96 x 128 corresponde a cada uno de los colores primarios utilizados en el formato RGB, es debido a eso que se requieren de 3 matrices para generar la imagen. A continuación se mostrará como queda el video resultante al momento de hacer la conversión al formato YCbCr 4:2:2

$$Y = 96 \times 128 \times 8 = 98,304 \text{ bits.}$$

$$Cb = 48 \times 64 \times 8 = 24,576 \text{ bits.}$$

$$Cr = 48 \times 64 \times 8 = 24,576 \text{ bits.}$$

$$147,456 \text{ bits}$$

Conociendo la cantidad de datos por componente de video, podemos ahora hacer los cálculos para determinar la cantidad de PDU's que requiere un cuadro para ser transmitido, y finalmente hacer el cálculo de cuántos PDU's pueden ser enviados cada 1/30 de segundo.

Inicialmente debemos calcular cuantos PDU's puede enviar cada tipo de modulación, para ello debemos utilizar la siguiente fórmula:

$$PDU_{seg} = \frac{Mbps \text{ disponibles}}{longitud \text{ del PDU}} \text{ (máx. 2048 bytes, ver sección 2.4.1.1).}$$

A continuación en la Tabla 8 se muestran los resultados obtenidos acorde a los diversos tipos de modulación.

Tabla 8: Cálculo de PDU's por modulación.

Modulación	Tasa de modulación	Mbps	PDU's por segundo	PDU's cada 1/30 de seg.
BPSK	1/2	2.67	162.7	5
QPSK	1/2	5.33	325.6	11
QPSK	3/4	8	488.3	16
16-QAM	1/2	10.67	651	22
16-QAM	3/4	16	976.56	33
64-QAM	2/3	21.33	1302.1	43
64-QAM	3/4	24	1464.84	49

Habiendo determinado los PDU's por 1/30 de segundo, partimos a hacer el análisis la cantidad de paquetes requeridos por cada cuadro de video. Para ello basta con dividir la cantidad de datos de cada componente entre el tamaño máximo del “*payload*” (datos de usuarios) y redondear al valor más alto. Tal como se muestra a continuación.

$$Y = 96 \times 128 = 12,288 \text{ bytes} / 2040 \text{ bytes} = 6.02 \therefore 7 \text{ PDU's.}$$

$$Cb = 48 \times 64 = 3072 \text{ bytes} / 2040 \text{ bytes} = 1.5 \therefore 2 \text{ PDU's.}$$

$$Cr = 48 \times 64 = 3072 \text{ bytes} / 2040 \text{ bytes} = 1.5 \therefore 2 \text{ PDU's.}$$

Por lo cual podemos ver que para transmitir un cuadro de video comprimido se requieren de 11 PDU's.

En conclusión de esta primera sección podemos observar que todas las modulaciones excepto BPSK, nos permiten enviar un cuadro completo en 1/30 de segundo, esta información será en la posterior sección de gran ayuda, ya que a través de estos datos podremos generar los tiempos de interarribos de los paquetes de los usuarios en el sistema.

4.2.2 Cálculo Tiempos Interarribos

En esta parte el proceso inicial es determinar mediante una variable uniforme aleatoria la distancia de cada SS con respecto a la BS. La modulación empleada por cada usuario dependerá de la distancia y el SNR que se obtiene de cada usuario, tal y como lo indica el estándar (IEEE, 2009). Sin embargo ya durante la transmisión para simular los cambios posibles que pudiera tener cada usuario en relación al tipo de modulación, se estableció un patrón de cambios regidos acorde a una cadena de Markov, dichos cambios son requeridos para el funcionamiento del sistema M/M/1, ya que de ellos dependerá la cantidad de PDU's a enviar y por lo tanto, esto afectará directamente a la cantidad de tiempos de interarribo que el sistema generará.

En la Figura 12 se muestra el análisis de la cadena de Markov de este sistema

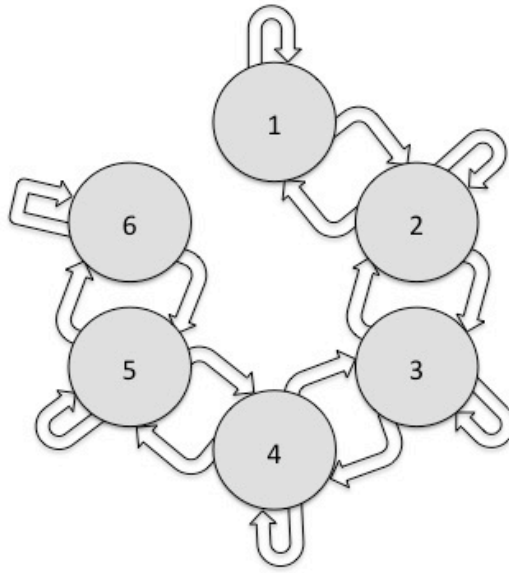


Figura 12: Cadena de Markov del sistema

Siendo su matriz de probabilidades la siguiente.

$$\begin{bmatrix}
 P_{11} & P_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 P_{21} & P_{22} & P_{23} & 0 & 0 & 0 \\
 0 & P_{32} & P_{33} & P_{34} & 0 & 0 \\
 0 & 0 & P_{43} & P_{44} & P_{45} & 0 \\
 0 & 0 & 0 & P_{54} & P_{55} & P_{56} \\
 0 & 0 & 0 & 0 & P_{65} & P_{66}
 \end{bmatrix}$$

Como se puede apreciar en la Figura 12 las flechas corresponden a los posibles cambios que puede realizar cada modulación. Tal y como se observa en el caso de 1 y 6 solamente tienen 2 tipos de opciones, una de ellas mantenerse en su mismo punto o el otro cambiar al posterior/inferior según corresponda. Dichos saltos corresponden a los cambios de una modulación a otra, y es debido a eso que en la matriz solamente se aprecian esas 2 probabilidades para dichos casos. Los números de modulación y el análisis de la cadena se explican en la Tabla 9.

Tabla 9: Probabilidades de la cadena de Markov.

Índice de Modulación	Modulación y FEC	Probabilidad de cambio a otro estado
1	QPSK $\frac{1}{2}$	50%
2	QPSK $\frac{3}{4}$	33.3%
3	16-QAM $\frac{1}{2}$	33.3%
4	16_QAM $\frac{3}{4}$	33.3%
5	64-QAM $\frac{2}{3}$	33.3%
6	64-QAM $\frac{3}{4}$	50%

Las probabilidades mencionadas en la Tabla 9, corresponden a las posibilidades de cambio que tiene un estado de cambiar a otro. Para determinar si existe cambio o no de modulación en la simulación se utiliza una variable uniforme aleatoria la cual determinara dependiendo de su valor y acorde a la probabilidad que se tiene en cada estado, el salto que deba llevar a cabo en la cadena.

Para simular con que frecuencia existen estos cambios en la simulación se utilizó una variable aleatoria geométrica en función del 1/30 de segundo. Dicha variable se actualizará cada vez que el tiempo establecido inicialmente se haya agotado, generando de esta manera un nuevo tiempo en el cual estará otro o el mismo estado de modulación, esto último dependerá del proceso anterior de las probabilidades de la cadena de Markov.

Partiendo del hecho que ya conocemos los cambios de modulación de los usuarios y la cantidad de paquetes a enviar, podemos generar los tiempos de interarribo para cada uno de ellos. Para realizar cada uno de los tiempos utilizamos una variable aleatoria uniforme multiplicada por 1/30, este proceso es repetido tantas veces como PDU's son enviados por ese usuario. Por ejemplo si un usuario utilizara la modulación QPSK con una tasa de modulación de $\frac{1}{2}$ se generarían 11 tiempos de arribo aleatorios para poder enviar esos 11 PDU's generados. Este proceso se repite para cada uno de los usuarios y para todos los cuadros del video que se estén transmitiendo, generando así todos los tiempos de interarribo que el sistema M/M/1 requiere para procesarlos y enviarlos a la capa física.

En resumen esta sección nos permite obtener los valores de los tiempos de interarribo, los cuales serán de gran importancia en la próxima sección para obtener los valores de ρ (eficiencia del sistema), λ (tasa de llegadas) y μ (tasas de servicio) del sistema.

4.2.3 Sistema M/M/1

En esta sección abordaremos el funcionamiento del sistema M/M/1, para lo cual nos basaremos y adaptaremos el modelo utilizado por Law y Kelton (1991) el cual es un sistema que consta de un servidor alimentado de paquetes con diversos tiempos de interarribo. Un usuario cuando entra tiene 2 formas en las que puede encontrar al servidor: Inactivo o Ocupado. Si lo encuentra inactivo, este usuario se sirve (tiempo de servicio) inmediatamente y sale del sistema. Si el usuario encuentra el sistema ocupado, se une a una cola de espera (buffer) para posteriormente ser servido. Es en esta parte del buffer donde se ocupa la técnica de priorización. Las variables de tiempo de interarribo y los tiempos de servicio se determinan a través de probabilidades aleatorias. Las mediciones que se pueden obtener como resultado de este sistema son: el promedio de retrasos de los paquetes, el porcentaje de utilización del sistema y el número de paquetes promedio en cola.

Para poder operar esta sección requerimos de los tiempos de interarribos generados previamente, los cuales serán claves para obtener las tasas de llegada y servicio, y mediante esto poder obtener la eficiencia del sistema. Para poder realizar estos cálculos primero se debe calcular los tiempos “promedio” de interarribo por cada cuadro. Este proceso consta simplemente de hacer una media aritmética de todos los tiempos de interarribo arrojadas por cada PDU enviado de cada usuario. Al final debemos de obtener un tiempo de interarribo promedio por cada uno de los cuadros del video.

Para de esta manera mediante las siguientes fórmulas (Leon-Garcia, A., 2008) calcular las tasas de llegada y de servicio antes mencionadas.

$$\lambda = 1 / \text{Tiempo Promedio Interarribo}$$

$$\mu = 1 / \text{Tiempo Promedio Servicio}$$

$$\rho = \lambda / \mu$$

En la simulación llevada a cabo, una vez hallados los tiempos de interarribo promedios de cada cuadro, procedimos de nueva forma a encontrar un tiempo promedio para todo el video, siendo este el valor empleado para encontrar el valor de las tasas de llegada promedio del sistema.

Debido a que en nuestro particular caso no conocíamos el tiempo promedio de servicio esperado, partimos del hecho de establecer una eficiencia del sistema fijo, y ver hasta que punto el sistema era redituable en relación a pérdidas de paquetes y retrasos. Por otro lado también era necesario hallar el valor del buffer, que en un inicio era variable, y su valor era obtenido a través de la siguiente fórmula:

$$\text{Buffer} = 0.05 / (1 / \mu)$$

La constante de 0.05 de esta fórmula fue establecida acorde al tiempo máximo que un paquete puede esperar en cola, en este caso 0.05 segundos, ya que de ser un valor más alto, se perdería por completo el hecho de ser un video en tiempo real, tomando en cuenta que 1/30 de segundo es igual a 0.0333, un valor más alto que 0.05 sería casi sobrepasar el tiempo entre 2 cuadros. En consecuencia como se puede apreciar el tamaño del buffer

quedará dependiente del valor de la tasa de servicio, siendo una tarea posterior el hallar un valor fijo en donde el sistema sea estable.

En un inicio el sistema fue probado para varios ρ , encontrado a través de varias simulaciones que el valor idóneo del sistema era para un $\rho = 0.985$. A continuación en la Tabla 10 se mostrarán algunos de los intentos realizados en el sistema para varios ρ sirviendo a 50 usuarios.

Tabla 10: Resultados para un ρ diferente en 10 iteraciones.

λ	μ	ρ	Tamaño Buffer	Paq. Totales Perdidos	Proporción de paquetes perdidos
42855.4922	42855.4922	1	2142	214	0.00050122
42360.2109	42360.2109	1	2118	464	0.010991
40567.4102	40648.707	0.998	2032	236	0.00058388
42856.0156	43036.7695	0.995	2151	2842	0.0066536
42856.0156	43036.7695	0.995	2151	2842	0.0066536
40475.6211	40884.4648	0.99	2044	0	0
42532.1523	43179.8516	0.985	2158	0	0

Como se puede analizar de la Tabla 10 los valores de λ y μ son variables, esto es debido a que son generados mediante valores uniformes aleatorios, tal y como se explicó en la sección 4.2.2, y por lo consiguiente cada iteración tendrá un comportamiento diferente. A su vez podremos apreciar que los valores más óptimos en donde las pérdidas de PDU's son considerables son en los últimos 2. Debido a lo anterior se hicieron más iteraciones en cada

uno de ellos para comprobar su eficiencia, dando como resultado que el valor más óptimo fuera el de un $\rho = 0.985$. A continuación en la Tabla 11 se muestra el análisis realizando para el mismo valor de eficiencia del sistema y sirviendo en el sistema a 50 usuarios y siendo repetido 10 veces para comprobar su veracidad.

Tabla 11: Resultados de 10 iteraciones para un $\rho=0.985$.

λ	μ	Tamaño Buffer	Paq. Totales perdidos	Proporción paquetes perdidos
42532.1523	43179.8516	2158	0	0
40475.6211	41092	2054	0	0
42098.5039	42739.5977	2136	20	4.7674e-05
41246.55	41874.67	2093	0	0
41689.52	42324.39	2116	0	0
40663.72	41282.97	2064	0	0
41001.88	41626.27	2081	0	0
44416.63	45093.02	2254	0	0
42464.58	43111.25	2155	0	0
40475.6211	41092	2054	0	0

Parte de la importancia de la Tabla 11 es para analizar el comportamiento del buffer y para comprobar que las pérdidas del sistema son aceptables. Por lo tanto el siguiente procedimiento fue el de hallar el promedio del tamaño del buffer en base a esas 10 iteraciones. Lo cual nos da como resultado un valor de 2116. Dicho valor se usará como constante para las simulaciones posteriores.

Teniendo conocimiento de los parámetros de “ ρ ”, “ μ ”, “ λ ” y el tamaño del buffer podemos partir ahora a adaptar el sistema M/M/1 para que durante la alimentación/servicio del buffer sean priorizados los PDU’s en base a sus componentes. En la Figura 13 se ejemplifica el funcionamiento del buffer.

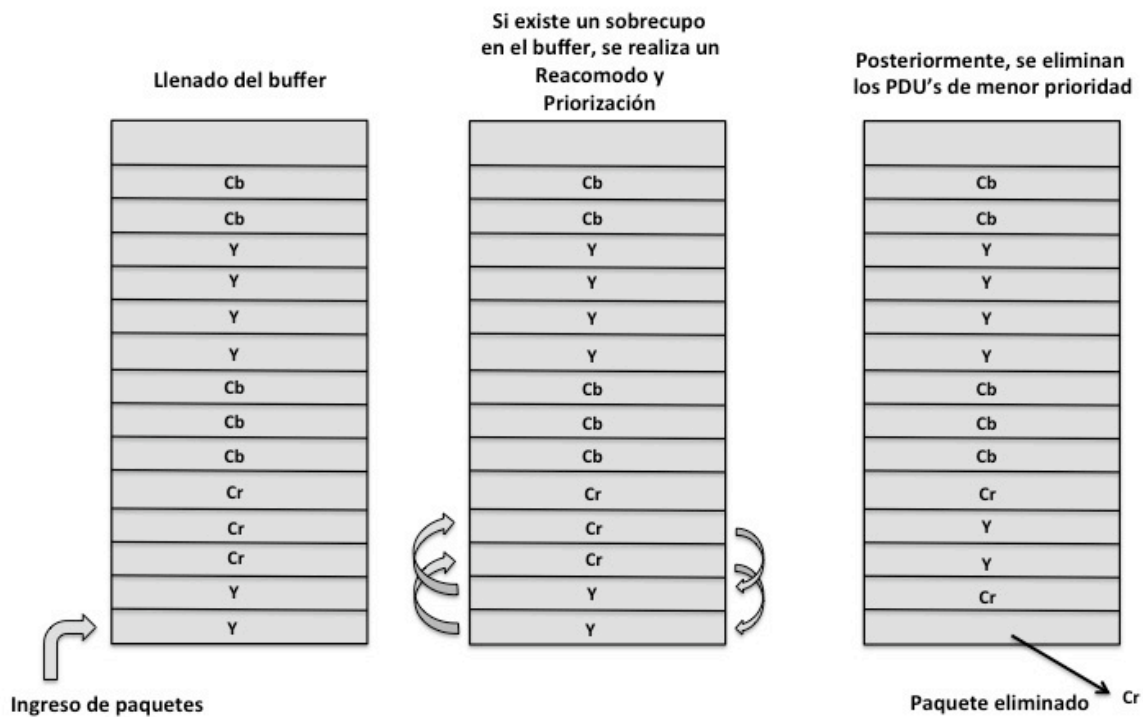


Figura 13: Funcionamiento del buffer

Tal como se puede apreciar en la Figura 13 el funcionamiento del buffer es bastante simple. El buffer inicialmente se encuentra vacío, tan pronto van llegando paquetes que no pueden ser servidos son almacenados en este buffer hasta que llegue su tiempo de servicio. Sin embargo si el buffer llega al límite y existe una nueva llegada de un paquete, se realiza

un proceso de reacomodo y eliminación. Dicho proceso consta en priorizar los paquetes Y reacomodarlos de tal forma que no exista ninguno en las 2 últimas posiciones del buffer, lo anterior es debido a que los 2 últimos paquetes serán eliminados y el paquete que arribó será colocado en la penúltima posición del buffer. Al realizar esta priorización estamos logrando que en dado caso de que haya pérdidas en el sistema sea solamente información de menor valor e impacto para el video.

En conclusión esta sección consta de cómo los usuarios entran al sistema con los diversos tiempos de interarribo y son servidos a través del sistema M/M/1 para que posteriormente sean impactados por la capa física de la simulación.

4.2.4 Capa Física y Recepción de paquetes.

Finalmente en esta última sección de la simulación suceden 3 procesos claves: la generación de la matriz de paquetes perdidos por manejo dentro del *scheduler*, las pérdidas de paquetes debido a la capa física y por último la recepción de paquetes y la recomposición del video de parte de los receptores.

En relación al primer proceso “generación de matriz de paquetes perdidos” esta va ligada al proceso de la Figura 13, para lo cual podemos decir que los paquetes que son eliminados por parte del *scheduler*, son almacenados en un vector temporal, ya que posteriormente serán sus índices la clave para determinar en el receptor que paquete fue eliminado y poder hacer la recomposición.

En relación al segundo proceso “efectos de la capa física”, básicamente los paquetes son perdidos de manera aleatoria en base a una escala inicialmente otorgada al programa. Esta escala nos permitirá saber de cada cuantos paquetes se pierde 1. La fórmula es muy básica:

$$\text{Paquetes Pérdidos en capa física} = \frac{\text{Paquetes totales}}{\text{escala de perdidas}}$$

Donde :

Paquetes totales = paquetes totales enviados por los “x” usuarios.

Escala de pérdidas = número de paquetes necesarios para perder un paquete.

Una vez teniendo este valor de paquetes perdidos en capa física, se realiza un proceso para cumplir con las pérdidas establecidas. Inicialmente se genera una variable aleatoria uniforme teniendo de rango entre 1 y el total de paquetes enviados por todos los usuarios. Posteriormente de ese valor aleatorio nos indicará que paquete es el que se perderá en relación a como arribo al sistema, por lo que para hallar dicho paquete, primero debemos hacer una correspondencia con los tiempos de interarribo y a qué usuario le pertenece dicho paquete. Posteriormente analizar a que parte del cuadro de video corresponde y finalmente eliminar y a la vez almacenar dicho paquete para poder determinar después en la recomposición que sección se perdió.

Para finalizar con la simulación los usuarios receptores reciben los paquetes e inicialmente hacen su recomposición a las estructuras del video (para este caso 96x128x3 pixeles), ya que debemos recordar que durante la transmisión la información se manejó a través de PDU's. En relación a los paquetes que se perdieron en el proceso, no podemos eliminarlos del sistema tal cual; debido a eso fue necesario que dichos paquetes fueran rellenos con valores de "1". La finalidad de lo anterior es para hacer visible el error durante el video, dependiendo de que tipo de paquete fue el que se perdió podremos verlo al final como una pérdida parcial de la imagen o bien como un cambio en las tonalidades de color.

Una vez habiendo reasignado todos los datos a la forma del video, éstos son transformados a un formato decimal. Finalmente las estructuras decimales son reconvertidas al video mediante las funciones de Matlab, terminando así la simulación con los videos en extensión ".avi".

4.3 Resultados

En esta sección se mostrarán los resultados obtenidos de la simulación realizada del sistema. Teniendo como parámetros los siguientes:

- $BW=7$ MHz por usuario.
- Usuarios = 50, 30, 10, 55
- Buffer = 2116
- $\rho = 0.985$

Como se puede apreciar, el sistema inicialmente fue diseñado para soportar 50 usuarios, sin embargo haremos las pruebas con diferentes números de usuarios, inclusive con un poco más para los que fue diseñado, de tal manera que podamos analizar su comportamiento y su desempeño en cuestión a pérdidas de paquetes; posteriormente se compararán los sistemas con priorización y sin priorización.

En las siguientes secciones se mostrarán las tablas de los resultados obtenidos para los diferentes escenarios de usuarios, cada uno de los casos será con 5 iteraciones para analizar el comportamiento de una manera más precisa, además se mostrarán los histogramas de los tiempos de interarribos con intervalos de cada 2 segundos y los histogramas de los retrasos de un solo caso de los de que muestran en cada una de las tablas.

4.3.1 Escenario de 50 usuarios

Tal como se había mencionado previamente en esta sección abordaremos los resultados obtenidos para 50 usuarios, recordando que este sistema fue diseñado para soportar y ser eficiente para esta cantidad de usuarios.

Tabla 12: Resultados del sistema para 50 usuarios.

λ	μ	Promedios retrasos en cola	Promedio paquetes en cola	Desv. Estándar de los retrasos	Paq. Totales perdidos	Proporción Paquetes Perdidos
41689.52	42324.39	0.003355463	139.3298	0.003354855	0	0
41255.5508	41883.8086	0.0082565	336.5763	0.015146	20	4.7674e-05
42480.8945	43127.8125	0.0016013	67.7638	0.0019733	0	0
41509.8906	42142.0195	0.0037607	155.1689	0.006767	0	0
41175.0352	41802.0664	0.0026725	109.6975	0.003516	0	0

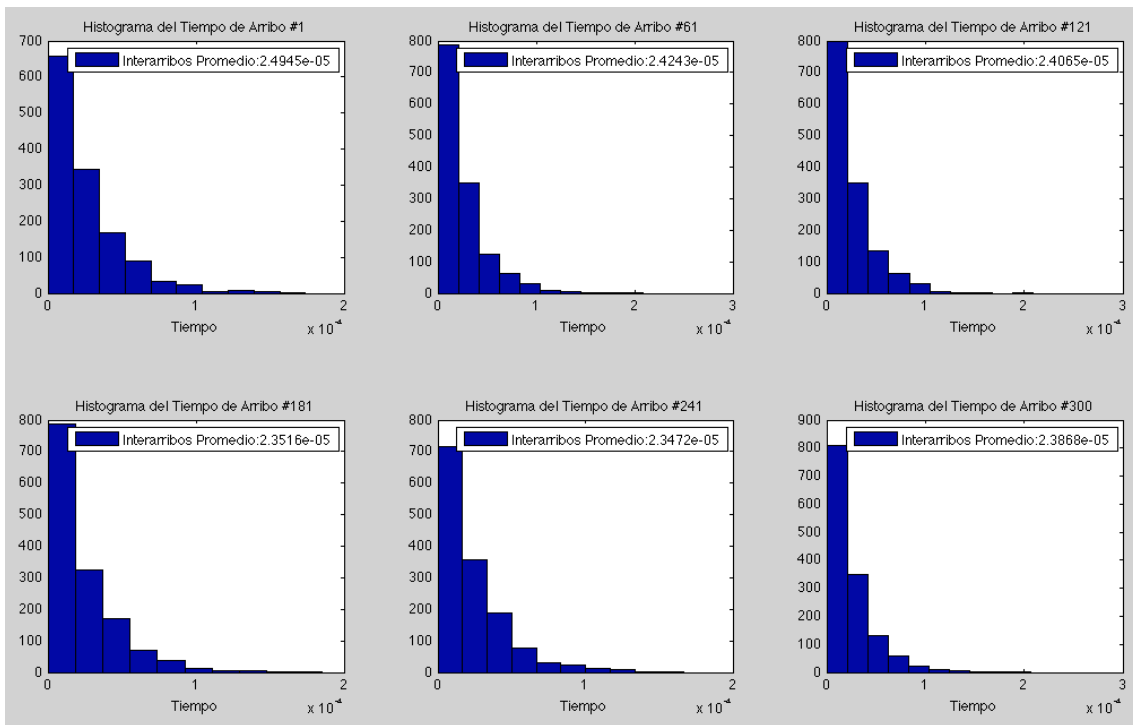


Figura 14: Histograma de tiempos interarribos para 50 usuarios.

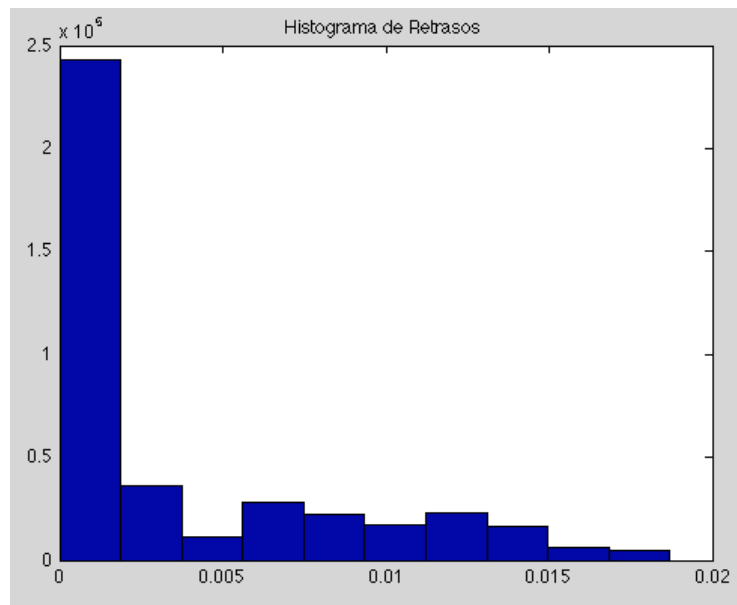


Figura 15: Histogramas de retrasos de los 50 usuarios.

Como se puede apreciar en la Tabla 12, los valores de λ y μ son variables esto es debido a lo previamente mencionado de la aleatoriedad de los tiempos de interarribos, lo cual afecta directamente a estos valores. En relación a los tiempos promedio en cola podemos apreciar que la mayoría se mantiene por debajo del 1/30 de segundo (3.33 ms) por lo que queda cubierto la propiedad de un video en tiempo real. El valor promedio de paquetes en cola simplemente es un dato estadístico que nos permite ver la utilización del buffer en promedio, con lo que podemos ver que para estos casos el buffer cubrió perfectamente las expectativas del rendimiento, sin embargo debemos recordar que estos valores son promedios y pudiera llegar a existir un punto en el que sobrepase el límite del buffer tal como en el segundo caso de la Tabla 12 donde hubo 20 pérdidas de paquetes. Dichas pérdidas no resultan un problema en la calidad final del video, ya que en promedio se están perdiendo 4 paquetes, tomando en cuenta que de las 5 iteraciones en solo 1 hubo pérdidas. Finalmente el campo final de proporción de paquetes perdidos nos muestra la cantidad de paquetes que en proporción se perdieron del total, como se puede analizar en la mayoría de los casos permanece en 0, sin embargo en el caso en el que existen pérdidas se mantiene por debajo del orden del 10^{-5} siendo este un valor bueno, ya que dicho valor nos hace referencia a que se pierden “X” cantidad de paquetes de cada 10,000.

En relación a la Figura 14 podemos concluir que los tiempos promedio de interarribos para cada caso permanecen dentro de un rango constante y deseable. Todos los casos presentan un mismo comportamiento, esto es debido a que si existe un número alto de paquetes en el sistema, la separación temporal de cada uno de ellos será menor y por lo consiguiente serán más constantes los valores.

En relación a la Figura 15 podemos apreciar que los retrasos no representan un problema para el objetivo de cumplir con un video en tiempo real, ya que si analizamos los valores todos se encuentran por debajo del 1/30 de segundo.

4.3.2 Escenarios de 10 y 30 usuarios

En este escenario se juntaron los casos para 10 y 30 usuarios debido a ciertas similitudes en su comportamiento. A continuación se mostraran las tablas y las gráficas de cada uno de ellos.

Tabla 13: Resultados del sistema para 10 usuarios.

λ	μ	Promedios retrasos en cola	Promedio paquetes en cola	Desv. Estándar de los retrasos	Paq. Totales perdidos	Proporción Paquetes Perdidos
8215.646	8340.757	0.01902294	153.9331	0.03369908	0	0
8247.145	8372.735	0.03706102	302.1044	0.04528150	0	0
8636.555	8768.076	0.01490776	127.9994	0.01949406	0	0
9141.917	9281.134	0.02619225	237.4139	0.03887165	0	0
8038.945	8161.366	0.006382477	51.10218	0.006168013	0	0

Tabla 14: Resultados del sistema para 30 usuarios.

λ	μ	Promedios retrasos en cola	Promedio paquetes en cola	Desv. Estándar de los retrasos	Paq. Totales perdidos	Proporción Paquetes Perdidos
25731.82	26123.67	0.002692443	69.07188	0.003976591	0	0
24139.90	24507.51	0.01845035	441.9281	0.01902879	0	0
25795.82	26188.66	0.006611746	169.5137	0.01075093	0	0
26796.58	27204.65	0.003759949	100.0766	0.007232176	0	0
25880.47	26274.59	0.01885368	485.6541	0.02057128	0	0

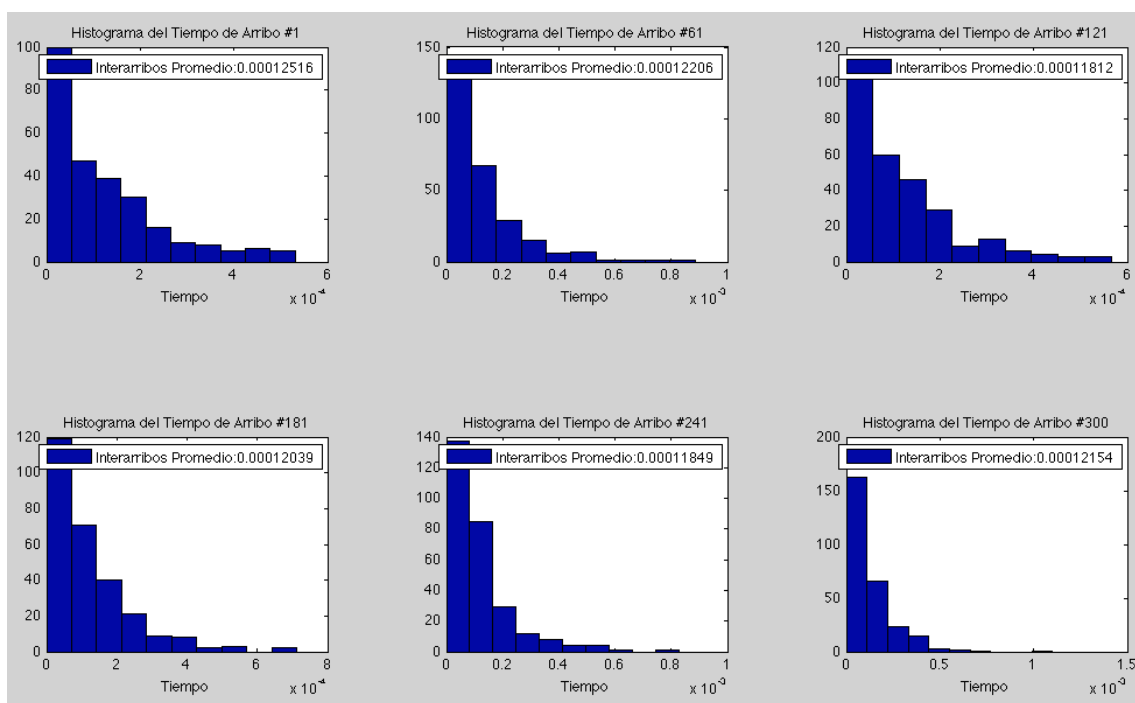


Figura 16: Histogramas de tiempos de interarribos para 10 usuarios.

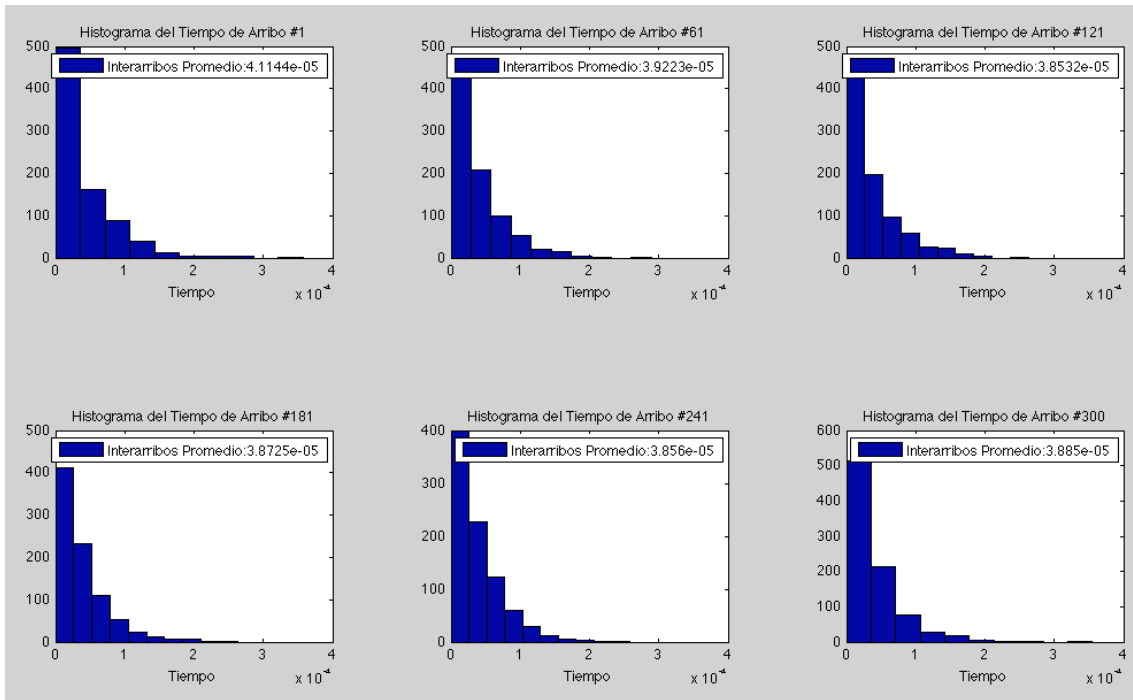


Figura 17: Histogramas de tiempos de interarribos para 30 usuarios.

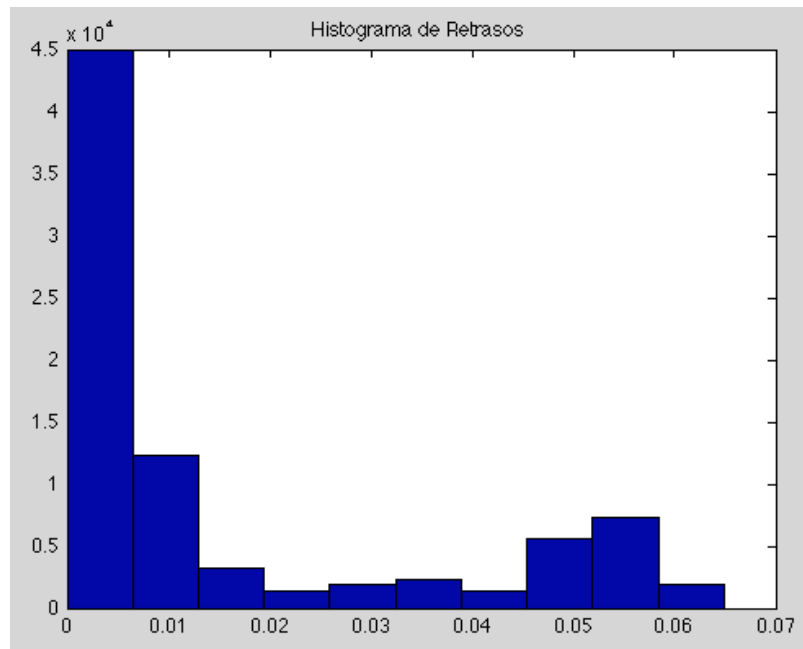


Figura 18: Histogramas de retrasos para 10 usuarios.

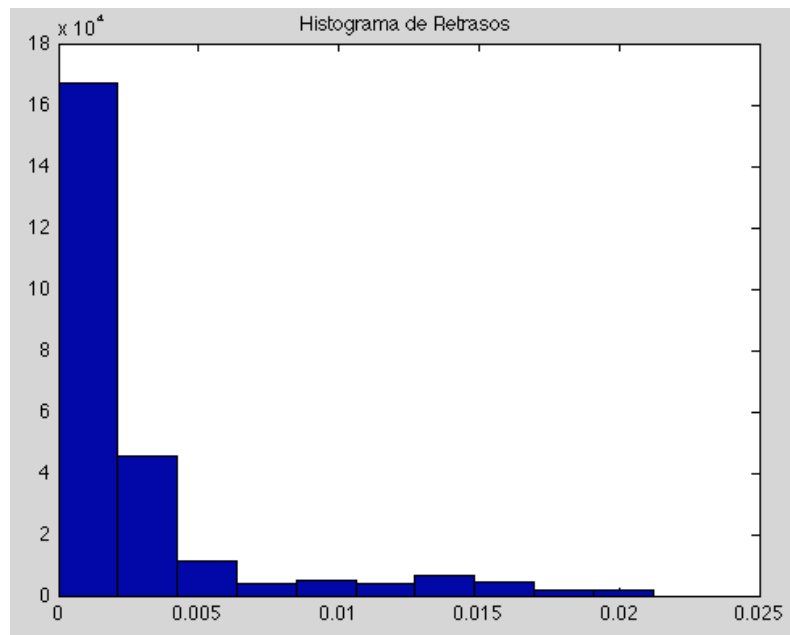


Figura 19: Histogramas de retrasos para 30 usuarios.

Como podemos apreciar en las Tablas 14 y 15 nuevamente los valores de λ y μ son variables en cada iteración y son claramente mayores para el caso de 30 usuarios (Tabla 15), y esto es obvio debido a que a mayores cantidades de paquetes, mayores serán las cantidades de tiempos de interarribos. Si analizamos los valores de retrasos en cola y paquetes en cola los valores guardan cierta relación y aunado al hecho de que se mantienen por debajo del 1/30 de segundo hacen que el rendimiento del sistema sea positivo. Por último en ambos casos vemos que no existen pérdidas dentro del *scheduler*, lo que es un resultado obvio tomando en cuenta que el sistema está diseñado para 50 usuarios. No debemos descartar que posteriormente no existan pérdidas ya que hay que recordar que después de que los paquetes son administrados por el *scheduler* pasan por una capa física,

la cual no respeta si son pocos o muchos usuarios, esto último va completamente relacionado con el valor que se determina como escala de pérdidas.

En relación a las Figuras 16 y 17 de los tiempos de interarribos podemos apreciar de los histogramas que para 10 usuarios existe una mayor variabilidad en sus tiempos, esto siendo completamente lógico debido a que puede existir un mayor rango entre cada tiempo de interarribo, lo que da como resultado como se puede apreciar en la Figuras 18 de los histogramas de retrasos de 10 usuarios una mayor variabilidad y espera de los paquetes. Haciendo relación al comportamiento del sistema con 30 usuarios (Figura 17 y 19) podemos apreciar que el funcionamiento del sistema es más parecido al de 50 usuarios, lo cual viene directamente asociado a la cantidad de paquetes generados, y sería lo opuesto al caso del caso de 10 usuarios.

4.3.3 Escenario de 55 usuarios

En este último escenario se probará al sistema para un número mayor de usuarios para el que fue diseñado, con la finalidad de analizar el comportamiento cuando existe un ligero incremento en su carga de trabajo y ver si es factible dicho aumento o si afectaría notablemente la calidad del servicio de los paquetes y en general del video final. A continuación mostraremos la tabla y las figuras correspondientes a este caso.

Tabla 15: Resultados del sistema para 55 usuarios.

λ	μ	Promedios retrasos en cola	Promedio paquetes en cola	Desv. Estándar de los retrasos	Paq. Totales perdidos	Proporción Paquetes Perdidos
46142.75	46845.43	0.003265459	149.5314	0.008906561	332	0.0007219432
45534.99	46228.42	0.002265615	102.8101	0.002679557	0	0
48361.19	49097.66	0.005314949	256.3205	0.006950944	0	0
45968.13	46668.16	0.001993144	91.08553	0.004576049	0	0
45621.17	46315.91	0.001790856	81.44359	0.002247888	0	0

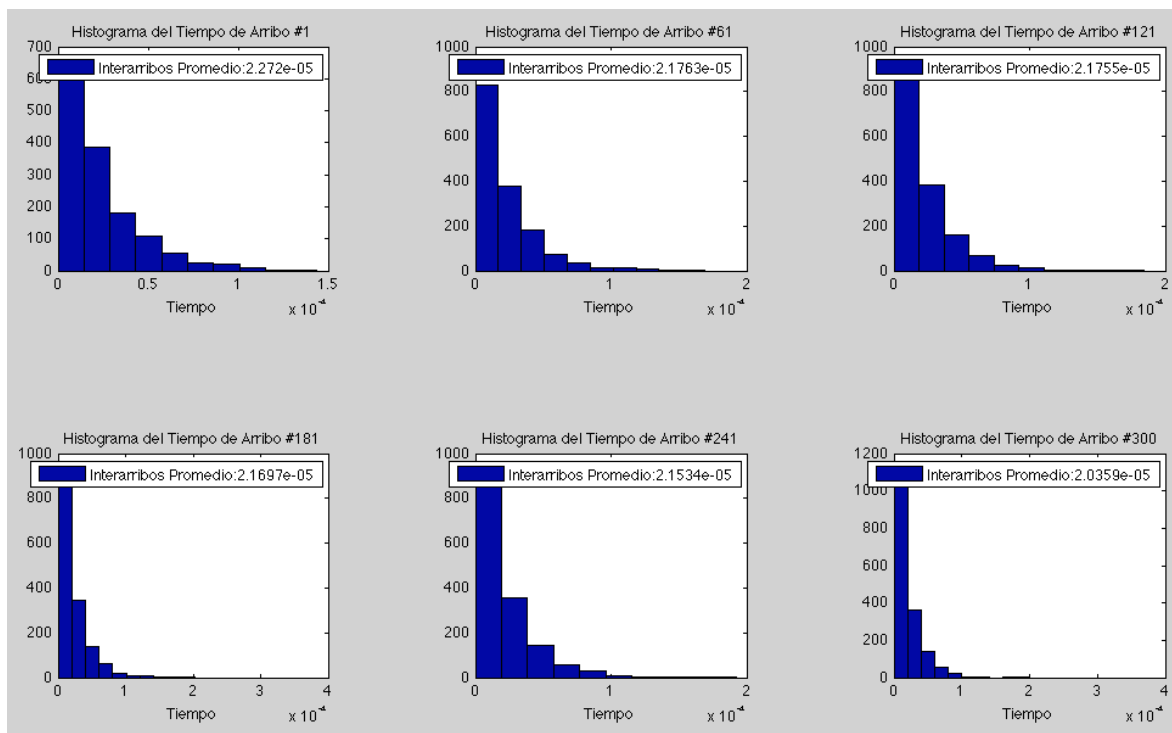


Figura 20: Histogramas de tiempos de interarribos para 55 usuarios.

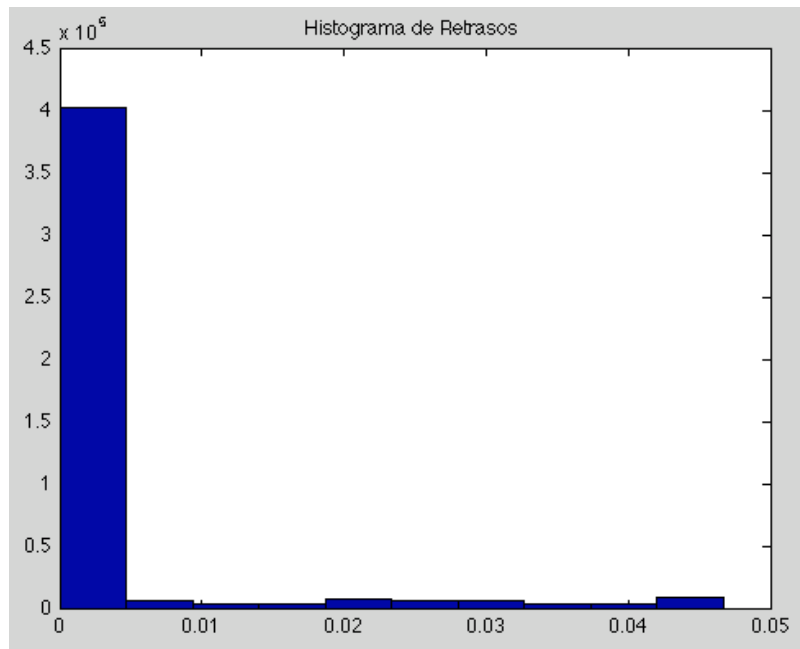


Figura 21: Histogramas de retrasos para 55 usuarios.

Como se pudo apreciar en la Tabla 15 solo en un caso existen pérdidas de paquetes que son considerables, sin embargo en promedio para las 5 iteraciones serían aproximadamente 67 paquetes, lo cual no es un valor indeseable y nos hace pensar que el sistema es capaz de soportar un incremento ligero en la cantidad de usuarios. Sin embargo si hacemos alusión a los valores de retrasos promedios en cola vemos que en 2 casos los valores son algo elevados, lo cual es lógico debido a la sobrecarga del sistema.

En la Figura 21 los histograma de retrasos nos muestran que para el caso que se obtuvo su comportamiento es bueno, sin embargo no debemos de olvidar que existieron casos en los que los retrasos son por encima del 1/30 (0.033) de segundo lo cual para nuestro objetivo mientras no sobrepase los 0.05 seg. es un resultado positivo.

En resumen podemos decir que el sistema si es capaz de soportar una ligera sobrecarga en la cantidad de usuarios, pero a medida que ese valor de sobrecarga se incrementa el sistema se encontrará más inestable y presentará más pérdidas y/o retrasos.

4.3.4 Comparativa entre sistema priorizado y sin priorizar

Como se pudo analizar en las secciones pasadas se mostraron los diversos escenarios y se comprobó que el sistema en general es estable y tiene un buen rendimiento. Ahora el objetivo de esta sección es hacer la comparativa entre tener el sistema sin priorizar y tenerlo priorizado con nuestro agendador. A continuación en la Figura 22 se muestra una ejemplificación de lo que significaría tener en el video un error en la componente “Y” y que sería tener un error en la componente “Cb o Cr”.

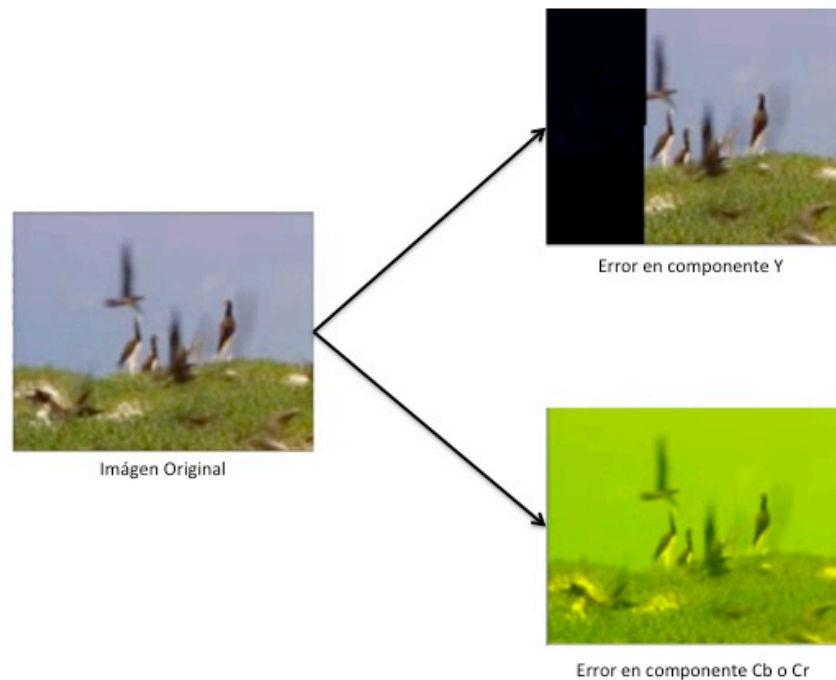


Figura 22: Diferencias en los errores en componentes Y y Cb-Cr

Como pudimos analizar en la Figura 22 comprobamos que un error en la componente “Y” podría significar perder parte de la imagen en el formato RGB o bien la imagen por completo. Sin embargo una pérdida en el paquete Cb o Cr significaría solamente un cambio en la tonalidad de colores de la imagen, por lo que resultaría mejor perder un paquete de Cb o Cr en dado caso de tener que elegir que datos perder. Y es ahí donde reside la gran importancia de nuestro agendador, ya que su objetivo principal consiste en tratar de evitar de perder paquetes de la componente “Y”.

A continuación en la Tabla 16 se muestra una comparativa del rendimiento de los 2 sistemas, sin embargo debemos tener en consideración que debido a la aleatoriedad del proceso, el cual ya se ha explicado previamente a que se debe, los resultados serán diferentes para cada iteración. Para poder comparar los sistemas se eligió una de las iteraciones donde se presentaron pérdidas en el *scheduler*, ya que debemos de recordar que debido a la estabilidad del sistema muy pocas veces se pierde información dentro del mismo. Por lo consiguiente a continuación se verán las ventajas de tener un sistema con nuestro agendador a través de la Tabla 16.

Tabla 16: Comparativa entre sistema priorizado y sin priorizar.

	λ	μ	Paq. “Y” Perdidos	Paq. “Cb” o “Cr” Perdidos	Paquetes Totales Perdidos	Proporción Paquetes Perdidos
NO	42098.50	42739.59	23	17	40	9.5347e-05%
PRIORIZADO	39364.66	39964.12	135	71	206	5.2497 e-04%
PRIORIZADO	42098.50	42739.59	0	20	20	4.7674e-05
	39364.66	39964.12	0	206	206	5.2497 e-04%

Como se puede apreciar en la Tabla 16 cuando el sistema no está priorizado se pierden una cantidad considerable de paquetes “Y”, esto aunado a que posteriormente dichos paquetes pasarán por la capa física agregando más errores, nos dará como resultado un video con una calidad regular o mala.

Al analizar el funcionamiento del sistema cuando se encuentra activado nuestro agendador vemos que hay una mejoría total en relación al sistema no priorizado; esto es debido a que no existen pérdidas en ninguno de los paquetes que contienen información importante. Independientemente de cómo afecte la capa física posteriormente a los paquetes, al utilizar este agendador se está garantizando una mejor calidad al final del video en el receptor.

En resumen podemos apreciar que con el agendador priorizador se obtiene una mejor calidad al final del video, inclusive cuando el sistema está sobrecargado de usuarios el priorizador siempre tratará de preservar los paquetes de mayor prioridad. Debemos de dejar claro que otro aspecto importante de la simulación es la capa física y la escala de pérdidas con la cual estemos operando, ya que a una mayor escala de pérdidas estaremos exponiendo la calidad del video final, ya que en capa física no existe garantía ni priorización de los paquetes.

CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES

Como se pudo analizar durante toda la investigación la tecnología WiMAX es una de las más prometedoras hoy en día en el mercado, debido a que viene a saciar varios de los inconvenientes que se tienen al trabajar en otro tipo de redes como podría ser WiFi. Sus altas tasas de datos y cobertura prometen ser una de sus principales ventajas a comparación de las tecnologías existentes. Sin embargo aún existen numerosos motivos por los cuales no se ha podido desplegar exitosamente, unos de ellos que muchas secciones de su red se encuentran en investigación, altos costos en los dispositivos, procesos burocráticos, entre otros más.

El objetivo de esta investigación, aparte de realizar un diseño de un agendador especializado en video, fue el de brindar un panorama general de todas las opciones que hasta la fecha son las más significativas en relación a agendadores diseñados específicamente para WiMAX. Como se pudo observar hay diferentes técnicas y especializaciones, y hasta la fecha no existe uno solo que se pueda denominar como el estándar en relación a agendadores, dándonos la referencia de que dependiendo de las características y las necesidades de la red se empleará uno u otro.

Como se puede deducir del capítulo anterior, los resultados obtenidos por nuestro agendador puede ser la solución cuando estemos operando en redes netamente de transmisión de video. Esto se logra ya que su objetivo es priorizar y salvaguardar la mayor cantidad de información importante y en dado caso de que sea necesario perder cierta información sea la de menor importancia. En relación a su funcionamiento se puede concluir que es muy estable, y esto puede ser corroborado a través de las diversas tablas y

gráficas que fueron mostradas a lo largo del capítulo de resultados, en donde claramente se puede observar la gran diferencia de paquetes importantes que se pierden durante el manejo de los mismos en el agendador. Otro aspecto en lo que puede contribuir nuestra investigación es el ramo de la administración del buffer, ya que para poder operar nuestra simulación fue requerido hacer un análisis previo del sistema para poder establecer el tamaño ideal de nuestro buffer.

Para finalizar debemos mencionar que en nuestra línea de investigación se realizaron simulaciones de videos pequeños debido a la complejidad del procesamiento de la misma, siendo una labor en trabajos a futuro tratar de operar el sistema con videos de mayor tamaño para poder apreciar con mayor facilidad las ventajas que nuestro agendador puede otorgar a las transmisiones de video.

5.1 Trabajos a Futuro

Como se menciona en el capítulo 4 existieron ciertos procesos que no fueron incluidos de manera completa dentro de la simulación: el proceso de inscripción a la red y la capa física de WiMAX, el compresor de video y el procesamiento completo del UL. Dichos procesos pueden ser de consideración para analizar de mejor forma el comportamiento del sistema, por lo que una labor a futuro sería completar el proceso de inscripción a la red con todas sus particularidades y subprocesos que realiza cada usuario para poder entablar una comunicación con la BS.

En relación a la capa física, podemos decir que esta sección deberá realizarse por completo, ya que en nuestro sistema se obvia en su totalidad. Su importancia reside en el hecho de que partes de las pérdidas que surgen forman parte de esta sección, y para lograr un resultado un poco más certero se debe hacer su diseño y su implementación al sistema que se tiene.

Otro de los procesos que se deberá agregar es el compresor de video, ya que a través de el mismo se hará un uso más eficiente del BW del canal, y sobre todo permitirá simular de manera más eficiente los servicios en tiempo real y obtener resultados más acercados a la realidad.

Finalmente podemos mencionar que otro trabajo a futuro sería el hecho de probar el sistema con un video de mayor tamaño y tal vez con una cantidad mayor de usuarios. Sin embargo debemos recordar que para lograr dichos cambios se requieren de 2 operaciones: ajustar el programa y recalcular los paquetes, ya que la generación de los tiempos de interarribos se basa en esos procesos, y finalmente contar con un equipo capaz de soportar el proceso de simulación.

APÉNDICE

Glosario de Acrónimos

AES = Advanced Encryption Standard.

AMC = Amplitude Modulation Code.

BER = Bit error rate

BE = Best effort.

BPSK = Binary Phase Shift Keying.

BS = Base station.

BWA= Bandwidth Access.

CCTV = Closed Circuit Television.

CID = Connection Identifier.

CMAC = Cipher based MAC.

CPE = Customer Premise Equipment.

CPS = Common part sublayer.

CQI = Channel Quality Indicator.

CRC = Cyclic Redundancy Check.

CS = Convergence sublayer.

DHCP = Dynamic Host Configuration Protocol.

DL= Downlink.

DQDB = Dual Queue Dual Bus.

DSA = Dynamic Service Addition.

DSC = Dynamic Service Change.

DSL=Digital subscriber line.

DSD = Dynamic Service Deletion.

DVD = Digital Video Disc.

EAP = Extensible Authentication Protocol.
FDD = Frequency Division Duplexing.
FDDI = Fiber Distributed Data Interface.
FEC= Frequency error check.
FFT= Fast Fourier transform.
FTP = File Transfer Protocol.
GPC = Granted per Connection.
GPSS = Granted per Subscriber Station.
HDTV = High Definition Television.
HMAC = Hash based MAC.
IE = Information Element.
LAN = Local Area Network.
OFDM = Orthogonal frequency division multiplexing.
OFDMA = Orthogonal frequency division multiple access.
DVB = Digital video broadcasting.
MAC = Media Access Control.
MAN = Metropolitan Area Network.
MAP = Media Access Protocol.
Mbps= Megabits per second.
MIMO = Multiple Input Multiple Output.
MPEG = Motion Picture Experts Group.
MSDU = MAC Service Data Unit.
NLOS= Non line of sight.
nrtPS = non real-time Polling Service.
OSI = Open System Interconnection
PAN = Personal Area Network.
PDA = Personal Digital Assistant.

PDU = Packet Data Unit.
PHB = Per Hop Behavior.
PHS = Payload Header Supression.
PMP= Point to Multipoint.
PUSC = Partially Used Sub-Carrier.
QAM = Quadrature Amplitude Modulation.
QPSK = Quadrature Phase Shift Keying.
QoS = Quality of Service.
RLC = Radio Link Control.
RGB = Red Green Blue.
rsTP = real-time Polling Service.
RSVP= Resource Reservation Protocol.
SDU = Service Data Unit.
SF = Service Flow.
SFID = Service Flow Identifier.
SIM = Subscriber Identification Module.
SOHO= Small office / Home office.
SNMP = Simple Network Management Protocol.
S.N.R.= Signal to noise ratio.
SS = Subscript station.
TDD = Time Division Duplexing.
TDMA = Time Division Multiple Access.
TFTP = Trivial File Transfer Protocol.
UGS = Unsolicited Grant Service.
UWB = Ultra Wide Band.
VOD = Video on demand.
VoIP = Voice over IP.

WAN = Wide Area Network.

WiFi = Wireless Fidelity.

WiMAX= Worldwide interoperability for microwave access.

REFERENCIAS

Alavi H.; Mojdeh M. y Yazdani N. "A Quality of Service Architecture for IEEE 802.16 Standards". IEEE Asia-Pacific Conference on Communications, pag. 249-253, Diciembre, 2005.

Baptista, P., Fernández, C., Hernández, R. (2003). *Metodología de la Investigación* (3ª Ed.). Chile.: Mc Graw Hill.

Black, U. (2000). *QoS in Wide Area Networks*. USA: Prentice Hall.

Chen, J., Jiao, W. y Guo, Q. "An integrated QoS control architecture for IEEE 802.16 broadband wireless access systems". IEEE Global Telecommunications Conference, Vol. 6, pag. 6. Diciembre, 2005.

Eklund C. , et all. "IEEE standard 802.16: A Technical Overview of the Wireless MAN Air Interface for Broadband Wireless Access". IEEE Communication Magazine, Vol. 40, pag. 98-107, Junio, 2002.

Fattah, H. y Leung, C. "An overview of scheduling algorithms in wireless multimedia networks". IEEE Wireless Communications, Vol. 9, pag. 76-83, Octubre, 2002.

Gakhar, K, Achir, M. y Gravey, A. "Dynamic Resource Reservation in IEEE 802.16 Broadband Wireless Networks". 14th IEEE International Workshop on Quality of Service, pag. 140-148, Junio, 2006.

Ge, Y. y Kuo, G. "An Efficient Admission Control Scheme for Adaptive Multimedia Services in IEEE 802.16e Networks". 2006 IEEE 64th Vehicular Technology Conference, pag- 1-5, Septiembre, 2006.

Guerin R. y Peris V. "Quality-of-service in Packet Networks: Basic Mechanisms and Directions". Computer Networks: The International Journal of Computer and Telecommunications Networking, Vol. 31, Febrero, 1999. Special issue on Internet telephony.

IEEE Standard for local and metropolitan area networks. (2009). *Part 16: Air interface for Broadband Wireless Access Systems*. USA: IEEE Computer Society and IEEE Microwave Access Theory and Techniques Society.

Jiang, C. y Tsai, T. "Token bucket based CAC and packet scheduling for IEEE 802.16 broadband wireless access networks". CCNC 3rd IEEE Consumer Communications and Networking Conference, Vol. 1, pag. 183-187, Enero, 2006.

Klein, A. (2008). Performance Comparison of Different WiMAX Configurations. USA: Lightning Source Inc.

Krishna, R. y Radhamani G. (2008). *WiMAX: A Wireless Technology Revolution*. USA: Auerbach.

Kumar, A. (2008). *Mobile Broadcasting with WiMAX: Principles, Technology and Applications*. USA: Focal Press.

Kwon, T., Lee H., et all. “Design and Implementation of a Simulator Based on a Cross-Layer Protocol between MAC and PHY layers in a WiBro Compatible IEEE802.16e OFDMA System”. IEEE Communication Magazine, Vol. 43, pag. 136-146, Diciembre, 2005.

Law A. & Kelton W. (1991). Simulation Modeling & Analysis. USA: Mc Graw-Hill.

Leon-Garcia, A. (2008). Probability, Statistics, and Random Processes for Electrical Engineering. USA: Prentice Hall.

Mach, P. y Bestak, R. “WiMAX performance evaluation”. Sixth International Conference on Networking, pag. 17, Abril, 2007.

Maode M. y Jinchang L. “QoS Provision Mechanism in WiMAX”. En *Current Development Technologies in WiMAX Systems*, pag 84-114, 2009.

Meng, X. (2007). *An efficient scheduling for diverse QoS requirements in WiMAX*. Tesis de Maestría. Universidad de Waterloo, Ontario, Canadá.

Nuaymi, L. (2007). *WiMAX: Technology for Broadband Wireless Access*. Francia: Wiley.

Ohrman, F. (2005). *WiMAX Handbook Building 802-16 Wireless Networks*. USA: McGraw-Hill Communications.

Tratz-Ryan B. ,Forsman J. y Keene I. “How Network Service Providers Are Approaching WiMAX”. Gartner [base de datos en línea], (Marzo, 2006).

Wang, F., Ghosh A., et.al. “IEEE 802.16e System Performance -Analysis and Simulation Results”. (2005). IEEE 16th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, Vol. 2, pag. 900-904, Septiembre, 2005.

Wang,H.; He, B. y Agrawal, D. “Admission control and bandwidth allocation above packet level for IEEE 802.16 wireless MAN”. 12th International Conference on Parallel and Distributed Systems, Vol 1, pag. 6, Julio, 2006.

WiMAX Forum (2006). Mobile WiMAX – Part I: A Technical Overview and Performance Evaluation. Consultado en Junio, 2009 en http://WiMAXforum.org/sites/WiMAXforum.org/files/document_library/mobile_WiMAX_part1_overview_and_performance.pdf.

WiMAX Forum (2009). What Every Company Needs To Know About Mobile WIMAX and QoS. Consultado en Junio, 2009 en <http://www.WiMAX.com/commentary/spotlight/what-every-company-needs-to-know-about-mobile-WiMAX-and-qos>.

Wongthavarawat, K. y Ganz, A. “Packet scheduling for QoS support in IEEE 802.16 broadband wireless access systems”. International Journal of Communication Systems, Vol. 16, pag. 81-96, Febrero, 2003.

Yi-Ting, M; Chun-Chuan, Y. y Yu-Hsuan, L. “Cross-Layer QoS Framework in the IEEE 802.16 Network”. The 9th International Conference on Advanced Communication Technology, Vol. 3, pag. 2090-2095, Febrero, 2007.

Zhang H. "Service Disciplines for Guaranteed Performance Service in Packet switching Networks". Proceedings of the IEEE, Vol 83, pag. 1374 – 1396, Octubre, 1995.

Zhang, Y. y Chen, H. (2008). *Mobile WiMAX Toward Broadband Wireless Metropolitan Area Networks*. USA: Auerbach.