

TESIS DEFENDIDA POR  
**Daniel García Briones**  
Y APROBADA POR EL SIGUIENTE COMITÉ

---

M.C. Jorge Enrique Preciado Velasco  
*Director del Comité*

---

Dr. Hugo Homero Hidalgo Silva  
*Miembro del Comité*

---

M.C. Miguel Ángel Aguayo Ortuño  
*Miembro del Comité*

---

M.C. Raúl Rivera Rodríguez  
*Miembro del Comité*

---

Dra. María del Carmen Maya Sánchez  
*Coordinador del programa de posgrado en  
Electrónica y Telecomunicaciones*

---

Dr. David Hilario Covarrubias Rosales  
*Director de Estudios de Posgrado*

8 de Marzo de 2010

**CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y DE  
EDUCACIÓN SUPERIOR DE ENSENADA**



---

**PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS  
EN ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES**

---

**ALGORITMO DE CALENDARIZACIÓN DE SERVICIOS MULTIMEDIOS  
UTILIZANDO TECNOLOGÍA WIMAX**

**TESIS**

que para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de  
**MAESTRO EN CIENCIAS**

Presenta:

**DANIEL GARCÍA BRIONES**

Ensenada, Baja California, México, Marzo de 2010.

**RESUMEN** de la tesis de **DANIEL GARCÍA BRIONES**, presentada como requisito parcial para la obtención del grado de MAESTRO EN CIENCIAS en ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES con orientación en TELECOMUNICACIONES. Ensenada, Baja California. Marzo de 2010.

## **ALGORITMO DE CALENDARIZACIÓN DE SERVICIOS MULTIMEDIOS UTILIZANDO TECNOLOGÍA WIMAX**

Resumen aprobado por:

---

M.C. Jorge E. Preciado Velasco

Director de Tesis

En los últimos tiempos se ha incrementado la demanda de los accesos de banda ancha de comunicaciones inalámbricas. Para poder ofrecer un excelente servicio (similar al que presentan las redes alámbricas) a los usuarios finales es necesario que se cumplan los requerimientos técnicos de desempeño de las múltiples aplicaciones que forman el tráfico multimedia. Una importante alternativa para cubrir las necesidades en esta área es la tecnología WiMAX definida en los estándares IEEE 802.16. Para soportar la amplia variedad de tráfico multimedia, este grupo de estándares define cinco tipos de servicios con diferentes requerimientos (ertPS, UGS, rtPS, nrtPS, BE). Aunque esta clasificación representa la base para ofrecer calidad de servicio, el grupo de estándares no define el mecanismo de calendarización para asignar recursos, una eficiente asignación de ancho de banda es de vital importancia para un desempeño óptimo de la red WiMAX.

En este trabajo de investigación se presenta la propuesta de un nuevo mecanismo para la asignación de recursos (Calendarizador). El Calendarizador propuesto basa su funcionamiento en el bien conocido Algoritmo de Equidad Proporcional realizando los ajustes necesarios para funcionar bajo sistemas WiMAX con tráfico multimedia y habilitar el manejo de prioridades entre las conexiones para cumplir con los distintos requisitos de calidad de servicio. Los resultados obtenidos muestran que el esquema aquí propuesto presenta un comportamiento más balanceado entre equidad y throughput que otros algoritmos utilizados, además mejora el desempeño para servicios en tiempo real (rtPS, ertPS y UGS) ofreciendo valores de retardo menores.

**Palabras Clave:** WiMAX, Calendarizador, Calidad de Servicio, Tráfico Multimedia.

**ABSTRACT** of the thesis presented by **DANIEL GARCÍA BRIONES** as a partial requirement to obtain the **MASTER OF SCIENCE** degree in **ELECTRONICS AND TELECOMMUNICATIONS** with orientation in **TELECOMUNICACIONES**. Ensenada, Baja California. March 2010.

## SCHEDULING ALGORITHM FOR MULTIMEDIA SERVICES USING WIMAX TECHNOLOGY

In recent times the wireless broadband access has been increased. In order to offer an excellent service (comparable with wired networks) to end users, the technical requirements for multimedia traffic performance in multiple applications have to be achieved. WiMAX technology is an important alternative to meet the necessities in a wireless broadband scenario. To support the wide variety of multimedia traffic, the IEEE 802.16e standard defines five types of services with different requirements (ertPS, UGS, rtPS, nrtPS, BE). Although this classification represents the basis to offer QoS, the standard do not define the scheduling mechanism to allocate resources. An efficient allocation of resources is fundamental to optimal performance in WiMAX networks.

A new mechanism for allocating resources (Scheduler) is presented in this research work. The proposed scheduler base its operation on the well-known Proportional Fairness Algorithm making the necessary adjustments to run under WiMAX systems with multimedia traffic and enabling the prioritization of connections to meet the requirements for quality of service. The results show that the scheme proposed here presents a more balanced performance between fairness and throughput than other algorithms used; smaller delay values are obtained with this algorithm, obtaining an improved performance for real time service.

**Keywords:** WiMAX, Scheduler, Quality of Service, Multimedia Traffic.

## **DEDICATORIA**

A mis Padres

Jesús García Nájera y Ely Briones Betancourt

Por su total e incondicional apoyo en cada momento de mi vida,  
por su eterna paciencia y amor constante.

## Agradecimientos

A Dios por todas sus bendiciones que me ha concedido,

A mis padres (Chuy y Ely), mis hermanas (Adriana y Sarita) y a mis sobrinos (Alex y Fer) por todo su apoyo y motivación.

Al Director de Tesis M.C. Jorge Enrique Preciado Velasco por su amistad y apoyo para la realización de este trabajo de tesis. Al Dr. Hugo Homero Hidalgo Silva y M.C. Raúl Rivera Rodríguez, miembros del comité de tesis, por sus valiosas contribuciones. A M.C. Miguel Ángel Aguayo Ortuño por sus aportaciones académicamente, amistad y apoyo brindado durante mi estancia en Colima.

A mis compañeros y amigos por los buenos e inolvidables momentos compartidos a lo largo de mi estancia en Ensenada.

Al CICESE y a la Universidad de Colima, por el apoyo recibido durante el desarrollo de este proyecto de investigación,

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo económico brindado.

# Contenido

	<i>Página</i>
<b>Resumen español</b>	<b>i</b>
<b>Resumen inglés</b>	<b>ii</b>
<b>Dedicatorias</b>	<b>iii</b>
<b>Agradecimientos</b>	<b>iv</b>
<b>Contenido</b>	<b>v</b>
<b>Lista de Figuras</b>	<b>viii</b>
<b>Lista de Tablas</b>	<b>ix</b>
<b>I. Introducción</b>	<b>1</b>
I.1. Aplicaciones, Ancho de Banda y desempeño de las redes; Dilema en las Tecnologías de Comunicación . . . . .	1
I.2. Motivación . . . . .	3
I.3. Planteamiento del Problema . . . . .	4
I.4. Objetivo de la Tesis . . . . .	4
I.5. Metodología de la Investigación . . . . .	5
I.6. Organización . . . . .	5
<b>II. Tecnología WiMAX/IEEE 802.16</b>	<b>7</b>
II.1. Visión General de WiMAX . . . . .	7
II.1.1. Grupo de estándares IEEE 802.16 . . . . .	7
II.1.2. Perfiles de certificación para Tecnología WiMAX . . . . .	9
II.2. Características de WiMAX . . . . .	11
II.2.1. Tasas Altas de Transmisión y Cobertura Amplia . . . . .	12
II.2.2. Modulación y Codificación Adaptativa . . . . .	12
II.2.3. Multicanalización, Tecnología OFDM . . . . .	14
II.2.4. OFDM Como Técnica de Acceso al Medio . . . . .	15
II.2.5. Asignación Dinámica de Recursos . . . . .	15
II.2.6. Calidad de Servicio . . . . .	16

## Contenido (continuación)

	<i>Página</i>
<b>III. Técnicas de Calendarización.</b>	<b>20</b>
III.1. Introducción . . . . .	20
III.2. Características Básicas de los Esquemas de Calendarización . . . . .	20
III.3. Calendarizadores de Objetivo Especifico . . . . .	21
III.4. Algoritmo Round Robin . . . . .	22
III.4.1. Round Robin Ponderado . . . . .	23
III.5. Algoritmo de Equidad Proporcional . . . . .	24
III.6. Calendarización en sistemas WiMAX . . . . .	26
<b>IV. Diseño de Nueva Propuesta de Calendarización.</b>	<b>28</b>
IV.1. Introducción . . . . .	28
IV.2. Limitantes / Ajustes de algoritmo Equidad Proporcional . . . . .	29
IV.2.1. Ajuste a Sistemas de Múltiples Canales . . . . .	30
IV.2.2. Diferenciación de Tráficos . . . . .	32
IV.2.3. Carga de Tráficos . . . . .	34
IV.3. Esquema de Calendarización Propuesto . . . . .	35
<b>V. Modelo de Simulación</b>	<b>38</b>
V.1. Introducción . . . . .	38
V.2. Fuentes de Tráfico . . . . .	39
V.2.1. Modelo de Tráfico VoIP . . . . .	40
V.2.2. Modelo de Tráfico de Video . . . . .	42
V.2.3. Modelo de Tráfico FTP . . . . .	42
V.2.4. Modelo de Tráfico HTTP . . . . .	43
V.3. Mecanismos de Calendarización Simulados . . . . .	45
V.4. Simulación de Codificación del Canal y Modulación . . . . .	45
V.5. Escenario de Simulación . . . . .	47
<b>VI. Resultados</b>	<b>50</b>
VI.1. Introducción . . . . .	50
VI.2. Métricas de Desempeño . . . . .	50

## Contenido (continuación)

	<i>Página</i>
VI.2.1. Throughput . . . . .	51
VI.2.2. Retardo . . . . .	51
VI.2.3. Índice de Equidad de Jain . . . . .	52
VI.3. Resultados de Desempeño Obtenidos . . . . .	53
VI.3.1. Desempeño Global . . . . .	54
VI.3.2. Índice de Equidad basado en Throughput . . . . .	55
VI.3.3. Desempeño Particular por Tipo de Tráfico . . . . .	56
VI.3.3.1. Desempeño de Tráfico nrtPS . . . . .	56
VI.3.3.2. Desempeño de Tráfico UGS . . . . .	57
VI.3.3.3. Desempeño de Tráfico rtPS . . . . .	59
VI.3.3.4. Desempeño de Tráfico ertPS . . . . .	62
<b>VII. Conclusiones</b>	<b>65</b>
VII.1. Resumen . . . . .	65
VII.2. Conclusiones . . . . .	65
VII.3. Aportaciones . . . . .	67
VII.4. Recomendaciones y Trabajos Futuros . . . . .	67
<b>Referencias</b>	<b>68</b>
<b>Anexos</b>	<b>71</b>
Anexo A. Capa Física y Subcapa MAC de WiMAX . . . . .	71
<b>Glosario</b>	<b>85</b>

## Lista de Figuras

<i>Figura</i>		<i>Página</i>
1	<i>Capa Física de WiMAX . . . . .</i>	11
2	<i>Modulación Adaptativa . . . . .</i>	13
3	<i>Portadora Única vs OFDM . . . . .</i>	14
4	<i>OFDM vs OFDMA . . . . .</i>	15
5	<i>Calendarización de paquetes con WRR . . . . .</i>	23
6	<i>Mapeo y Calendarización en WiMAX . . . . .</i>	29
7	<i>Diagrama a Bloques sistema WiMAX simulado . . . . .</i>	39
8	<i>Esquema de sesión FTP . . . . .</i>	43
9	<i>Esquema de sesión HTTP . . . . .</i>	44
10	<i>SNR vs BER . . . . .</i>	46
11	<i>Escenario de Simulación . . . . .</i>	47
12	<i>Gráfica Throughput Global . . . . .</i>	54
13	<i>Gráfica Índice de Equidad basado en Throughput . . . . .</i>	55
14	<i>Gráfica Tráfico nrtPS . . . . .</i>	56
15	<i>Gráficas tráfico UGS . . . . .</i>	58
16	<i>Gráficas Tráfico rtPS . . . . .</i>	60
17	<i>Gráficas Tráfico ertPS . . . . .</i>	63
18	<i>Capa Física de WiMAX . . . . .</i>	72
19	<i>Codificador Convolutacional . . . . .</i>	74
20	<i>Diagramas de Constelación QPSK, 16QAM y 64QAM . . . . .</i>	75
21	<i>Símbolo OFDM en el dominio del Tiempo . . . . .</i>	76
22	<i>Símbolo OFDM en el dominio de la Frecuencia . . . . .</i>	77
23	<i>Trama TDD sistema WiMAX . . . . .</i>	80
24	<i>Capa MAC de WiMAX . . . . .</i>	81
25	<i>MAC PDU . . . . .</i>	83

## Lista de Tablas

<i>Tabla</i>		<i>Página</i>
I	<i>Características básicas de estándares IEEE 802.16 más importantes . . . . .</i>	8
II	<i>Perfiles de certificación para WiMAX Móvil y Fijo . . . . .</i>	10
III	<i>Servicios de Calendarización . . . . .</i>	19
IV	<i>Valor Tc - Función de Prioridad . . . . .</i>	34
V	<i>Parámetros de Modelo de Tráfico VoIP . . . . .</i>	41
VI	<i>Parámetros de Modelo de Tráfico de Video . . . . .</i>	42
VII	<i>Parámetros de Modelo de Tráfico FTP . . . . .</i>	43
VIII	<i>Parámetros de Modelo de Tráfico HTTP. . . . .</i>	44
IX	<i>Perfiles de Transmisión en WiMAX. . . . .</i>	46
X	<i>Límites SNR recibido . . . . .</i>	47
XI	<i>Estación Suscriptora – Perfil de Transmisión . . . . .</i>	48
XII	<i>Parámetros adicionales de Simulación . . . . .</i>	49
XIII	<i>Ponchado – Puncturing . . . . .</i>	74
XIV	<i>Parámetros Nativos del símbolo OFDM . . . . .</i>	77
XV	<i>Parámetros Derivativos del símbolo OFDM . . . . .</i>	78

# Capítulo I

---

## Introducción

---

### **I.1. Aplicaciones, Ancho de Banda, y Desempeño de las Redes, Dilema en las Tecnologías de Comunicación.**

El incremento en el número de personas que utilizan Internet, las nuevas formas de comunicarnos, compartir información, realizar negocios e incluso el entretenimiento; requieren de accesos más rápidos, conocidos como accesos de banda ancha, entendiéndose por “banda ancha” a tener un ancho de banda instantáneo mayor que 1 MHz y soportar tasas de datos mayores a los 1.5 Mbps [IEEE 802.16, 2004].

Los accesos de banda ancha, además de ofrecer una navegación Web veloz, abren la posibilidad de soportar aplicaciones multimedia como audio en tiempo real, video de calidad, VoIP y juegos en línea. Las redes con la capacidad de soportar aplicaciones multimedia requieren ofrecer excelente desempeño y Calidad de Servicio (QoS), características más fáciles de encontrar en redes alámbricas. La tecnología inalámbrica de banda ancha, conjunta dos de los campos de la industria de las telecomunicaciones con mayor crecimiento y aceptación en el mercado en los últimos años; aprovechando la conveniencia y practicidad de la tecnología inalámbrica, con el buen desempeño y velocidad de la banda ancha típica de redes alámbricas.

En los últimos años el mercado de banda ancha ha tenido un importante crecimiento, para finales del 2007 había 349.98 millones de suscriptores de servicios de banda ancha alrededor del mundo, en el 2008 la cifra se elevó a 410.9 millones y para

mediados del 2009 las cifras reportadas son de 444.33 millones de suscriptores [Vanier, 2009]. El número de suscriptores de banda ancha continuará creciendo esperando alcanzar los 621 millones para el año 2012.

Las tecnologías de banda ancha móvil están despegando en muchos de los países, donde tecnologías inalámbricas como 3G, WiFi y WiMAX se utilizan para complementar los accesos fijos de banda ancha.

WiMAX es una tecnología inalámbrica de funcionamiento muy similar a WiFi, sin embargo ofrece cobertura mucho mayor y tasas de transmisión más elevadas. Los alcances en cobertura y tasas de transmisión, además de su relativamente bajo costo de instalación y corto tiempo de implementación, posicionan a WiMAX como una excelente solución para redes de banda ancha inalámbricas.

Aunque la tecnología DLS (Digital Subscriber Line) sigue siendo la tecnología de acceso de abonado dominante en lo referente a servicios de banda ancha, ya que actualmente representa alrededor del 65% de las suscripciones en todo el mundo [Vanier, 2009], están surgiendo nuevas tecnologías con gran fuerza. Una fuerte alternativa es la formada por la combinación de Fibra Óptica y la tecnología WiMAX, la cual podría ir desplazando a tecnologías tradicionales como DSL y cable [Piper, 2008]. Un ejemplo del aumento en el uso de WiMAX es la región del Pacífico de Asia, donde se espera un incremento de los 4.8 millones de suscriptores registrados en el 2008, hasta los 23 millones para el 2012.

Por su parte en México, como una forma de impulsar el crecimiento de acceso a los servicios de banda ancha, la Secretaría de Comunicaciones y Transporte está contribuyendo a través de la Coordinación de la Sociedad de la Información y del Conocimiento, anteriormente Sistema Nacional e-México en conjunto con la Comisión Federal de Electricidad con una red de fibra con alcance de 100 puntos a nivel nacional y con políticas para la liberación de un espectro de radiofrecuencia a nivel nacional en la banda de 3.3GHz para servicios de última milla [SCT, 2008]. Para estos enlaces de última milla se utiliza tecnología inalámbrica WiMAX, ya que permite ofrecer servicios de última generación a

Centros Comunitarios Digitales (CCD) multimedia, escuelas, colegios, hospitales y hogares.

## **I.2. Motivación**

WiMAX, al ser una tecnología de banda ancha, está diseñada para soportar servicios multimedios, lo cual implica tener flujos de datos generados por aplicaciones que presentan requerimientos de calidad de servicio muy distintos. Por ejemplo el tráfico en tiempo real que podría ser generado por una aplicación de VoIP, no requiere de gran ancho de banda sin embargo es altamente sensible al retardo o a la variación del retardo, caso contrario para el tráfico generado por una sesión FTP, la cual por lo general requiere de mayor ancho de banda y no presenta sensibilidad al retardo.

Los sistemas de comunicación de tecnología WiMAX como todo sistema de comunicación inalámbrica deben hacer uso adecuado de espectro de radio frecuencia asignado para su comunicación. Con la finalidad de lograr asignar el mayor número de usuarios a la banda asignada se utiliza la técnica de acceso múltiple OFDMA, se realiza asignación dinámica de recursos de ancho de banda, así como también se hace la clasificación de los tipos de servicios a transmitir en 5 clases estipulada en el grupo de estándares IEEE 802.16 para estar en posibilidad de ofertar calidad de servicios satisfaciendo los requerimientos de las aplicaciones.

Cuando se manejan flujos de información, de aplicaciones para servicios multimedios es necesario gestionar los recursos (p. ej. ancho de banda) en el sistema para cada servicio. El proceso de gestión de recursos considera el trato que recibe la información desde su arribo al sistema de comunicación: su clasificación en cualquiera de los cinco tipos de servicio definidos por el grupo de trabajo de la IEEE 802.16 y de acuerdo a ésta su calendarización, y asignación de recursos (ancho de banda) para su transmisión cumpliendo con los requerimientos de calidad de servicio exigidos.

A pesar de que este mecanismo de clasificación de los flujos de datos generados por las distintas aplicaciones representa la base para que un sistema con tecnología WiMAX pueda ofrecer Calidad de Servicio, en el grupo de estándares IEEE 802.16 **no se especifica la disciplina o el algoritmo de calendarización** que debe seguirse para la asignación del ancho de banda de manera que se cumplan los requerimientos de calidad de servicio. *El presente trabajo se centra en la parte del calendarizador debido a que es fundamental un algoritmo eficiente de calendarización para garantizar que se cumplan los requerimientos de Calidad de Servicio, lo cual tiene una repercusión importante en el desempeño general de la red.*

### **I.3. Planteamiento del Problema**

Se plantea establecer una estrategia de gestión aplicada a redes con tecnología WiMAX para la transmisión de servicios de voz, datos y video. Debido a que el calendarizador se considera como un factor de vital importancia y determinante en gran medida para el buen desempeño de la red y el cual no está especificado en el grupo de estándares IEEE 802.16, se propone analizar diferentes algoritmos de calendarización, su incidencia en el desempeño de redes WiMAX y *determinar un algoritmo de calendarización eficiente*, capaz de ofrecer calidad de servicio a tráficos multimedios diferentes a través de una red con tecnología WiMAX especificada en el estándar IEEE 802.16e-2005.

### **I.4. Objetivo de la Tesis**

Análisis de esquemas de calendarización de atención a los flujos de información multimedia a transmitir en un sistema de comunicación WiMAX, y en base a los resultados definir un esquema de calendarización que garantice que los requerimientos de calidad de servicio de aplicaciones multimedia y ofrezca un óptimo desempeño de la red.

## **I.5. Metodología de la Investigación**

El desarrollo del presente trabajo de investigación está sustentado en el análisis bibliográfico del grupo de estándares IEEE 802.16 y los mecanismos de gestión que permiten a WiMAX ofrecer calidad de servicio. A consecuencia del estudio del grupo de estándares IEEE 802.16, el trabajo de investigación se enfocó particularmente a la realización de una propuesta para el módulo de calendarización debido a que, como se mencionó previamente, en los estándares no se especifica la política que seguirá este módulo para la asignación de oportunidades de transmisión.

La nueva propuesta se realizó en base a las características, limitantes y ventajas observadas en el análisis hecho de los esquemas de calendarización existentes. Para la evaluación del esquema propuesto se realizó un programa en Matlab que simular un escenario WiMAX, del cual se obtuvieron indicadores de desempeño del sistema y finalmente se realiza el análisis y conclusiones sobre el funcionamiento de la nueva propuesta.

## **I.6. Organización**

El documento de tesis está dividido en siete capítulos, en el presente capítulo se hace una breve introducción general del tema a tratar; la definición del problema y el objetivo planteado.

En los capítulos II y III se presentan los fundamentos teóricos necesarios para la realización del trabajo de tesis. En el capítulo II se listan las características principales de un sistema WiMAX según lo estipulado por el grupo de trabajo IEEE 802.16. En el capítulo III se aborda el tema de los algoritmos de calendarización, sus características y la descripción de algunos de ellos.

En el capítulo IV se describen a detalle los elementos y el funcionamiento del algoritmo de calendarización solución que se propone resultante del análisis realizado. La

parte correspondiente al trabajo de evaluación de la propuesta se muestra en los capítulos V y VI.

En el capítulo V se describe el trabajo realizado para integrar el escenario de simulación sobre el que se evalúa la propuesta. Los resultados obtenidos de ella se exponen en el capítulo VI.

Finalmente en el capítulo VII se concluye sobre la investigación realizada con la discusión y algunas recomendaciones finales.

## Capítulo II

---

### Tecnología WiMAX/IEEE 802.16

---

#### II.1. Visión General de WiMAX

WiMAX, siglas de Worldwide interoperability for Microwave Access (interoperabilidad mundial para accesos por microondas), es una tecnología de acceso inalámbrico de banda ancha basada en el grupo de estándares IEEE 802.16 para Redes de Área Metropolitana Inalámbricas (WMAN, por sus siglas en inglés). El uso de esta tecnología va en crecimiento, ya cuenta con 519 redes desplegadas en 146 países, incluyendo 95 redes WiMAX por parte de operadores celulares. Además de que existe el compromiso por parte de fabricantes y operadores de nuevas versiones en las que aumenta velocidad de transmisión y capacidad [WiMAX *Forum*, 2009].

WiMAX es un concepto similar al bien conocido Wi-Fi pero con mayor cobertura y tasas de transmisión más elevadas, fue diseñado para ser parte de una solución de última milla en redes metropolitanas, con valores teóricos de accesos en áreas de 50 Km de radio y velocidades de transmisión de hasta 75 Mbps; alcanzando estas cifras para un canal de 20 MHz y bajo condiciones de línea de vista, con las mejores condiciones de canal.

#### II.1.1 Grupo de Estándares IEEE 802.16

IEEE 802.16 es una serie de estándares de banda ancha inalámbrica creados por un grupo de trabajo de la IEEE creado en 1999 para estandarizar las especificaciones de la capa física y de la subcapa MAC de la capa enlace de datos para Redes de Área Metropolitana Inalámbricas (WMAN). El objetivo de las redes WMAN es proporcionar accesos

inalámbricos de alta velocidad similar a los accesos alámbricos de tecnologías como cable módem, DSL (Digital Subscriber Line) o Ethernet [Ganz, 2004].

Este grupo de estándares comprende una amplia gama de características, inicialmente, el estándar original consideraba sistemas inalámbricos de banda ancha con condiciones de línea de vista, que operaban en las bandas de frecuencia de los 10GHz a los 66GHz, con una sola portadora para la capa física (PHY) y Multicanalización por división de Tiempo (TDM) para la subcapa MAC de la capa de enlace de datos. Conforme se fueron produciendo nuevas versiones del grupo de estándares (802.16a, 802.16d, 802.16e,...) se fueron agregando características. Se incluyeron sistemas que no requerían de condiciones de línea de vista para trabajar en bandas de frecuencia de 2GHz a los 11GHz. Para la capa física se incluyó Multicanalización por División de Frecuencias Ortogonales (OFDM), y posteriormente el Acceso Múltiple por División de Frecuencias Ortogonales, OFDMA.

**Tabla I. Características básicas de estándares IEEE 802.16 más importantes**

<b>Estándar IEEE</b>	<b>802.16</b>	<b>802.16d</b>	<b>802.16e</b>
Bandas de Frecuencia	10GHz - 66GHz	2GHz – 11GHz	2GHz – 11GHz (Fijo) 2GHz – 6GHz (Móvil)
Aplicación a Sistemas	Fijos / Con Línea de Vista	Fijos / Sin Línea de Vista	Fijos y Móviles / Sin línea de Vista
Topologías	Punto a Multipunto, Malla	Punto a Multipunto, Malla	Punto a Multipunto, Malla
Esquema de Transmisión	Portadora Única	Portadora Única, OFDM 256	Portadora Única, OFDM 256, SOFDM 128, 512, 1024 o 2048
Modulaciones	QPSK, 16QAM, 64QAM	QPSK, 16QAM, 64QAM	QPSK, 16QAM, 64QAM
Tasas de datos.	32 – 134.4 Mbps	1 – 75 Mbps	1 – 75 Mbps
Multicanalización	TDM, TDMA	TDM, TDMA, OFDMA	TDM, TDMA, OFDMA
Duplexación	TDD, FDD	TDD, FDD	TDD, FDD
Ancho de banda de Canal	20, 25 y 28 MHz	1.75, 3.5, 7, 14, 1.25, 5, 10, 15 y 8.75 MHz	1.75, 3.5, 7, 14, 1.25, 5, 10, 15 y 8.75 MHz
Implementación WiMAX	-----	WiMAX Fijo	WiMAX Móvil

En la tabla I se listan las características más relevantes de las implementaciones más populares del grupo IEEE 802.16 [Jeffrey, 2007]. La más popular de las implementaciones actualmente es la definición original de Redes Móviles Inalámbricas de Área Metropolitana definidas en el estándar 802.16e-2005, desplegada en alrededor de 140 países por más de 475 operadores [WiMAX Forum, 2009]. El presente trabajo de investigación está centrado en este estándar, IEEE 802.16e-2005, por lo que descripciones futuras de elementos, características y/o parámetros de WiMAX serán los correspondientes a lo especificado en dicho estándar.

## **II.1.2 Perfiles de Certificación para Tecnología WiMAX**

El conjunto de estándares IEEE 802.16 proporcionan las bases de la tecnología, sin embargo, con la finalidad de agilizar los procesos de certificación y promover la compatibilidad y adopción de productos WiMAX, surge en el año 2001 un consorcio industrial denominado WiMAX Forum, con el objetivo de acelerar la introducción de estos sistemas dentro del mercado.

El WiMAX Forum cuenta con más de 500 miembros, comprendidos la mayoría por operadores y vendedores de equipo del ámbito de las telecomunicaciones. Entre sus miembros se encuentran compañías de la talla de Alvarion, Cisco Systems, Alcatel-Lucent, Fujitsu, Motorola, Nokia, Samsung, Intel Corporation, acer, Interbro, D-Link, Nortel, Panasonic, Nextel Telecom Ltd, Ericsson, Sony Corporation, entre otros [WiMAX Forum, 2009].

Este consorcio se dio a la tarea de reducir el alcance de la colección de estándares IEEE 802.16, para poder certificar la interoperabilidad entre los productos WiMAX para ello define un número limitado de lo que llama perfiles de sistema y perfiles de certificación [Jeffrey, 2007].

Un *perfil del sistema* define un subgrupo de características de las capas física y subcapa MAC seleccionadas de los estándares IEEE 802.16d-2004 o IEEE 802.16e-2005, actualmente se tienen definidos dos, uno basado en el IEEE 802.16d-2004 conocido como

perfil de sistema fijo y el segundo basado en IEEE 802.16e-2005 denominado perfil de sistema móvil [Jeffrey, 2007].

Un *perfil de certificación* es un perfil de sistema en particular donde también tiene especificado la frecuencia de operación, ancho de banda del canal y Duplexación [Jeffrey, 2007]. En la tabla II se muestran los perfiles certificados para WiMAX móvil y fijo.

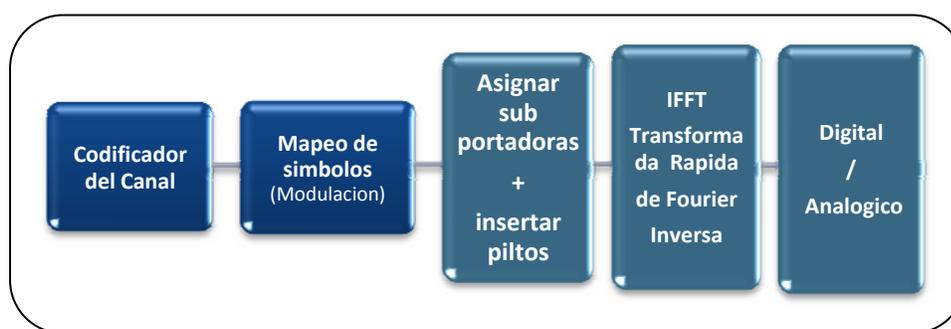
**Tabla II. Perfiles de certificación para WiMAX Móvil y Fijo**

<i>Banda de Frecuencias</i>	<i>Ancho de Banda del Canal</i>	<i>Tamaño de FFT (subportadoras OFDM)</i>	<i>Duplexación</i>
<b>PERFILES PARA WIMAX FIJO</b>			
3.5 GHz	3.5 MHz	256	FDD
	3.5 MHz	256	TDD
	7 MHz	256	FDD
	7 MHz	256	TDD
5.8 GHz	10 MHz	256	TDD
<b>PERFILES PARA WIMAX MÓVIL</b>			
2.3 GHz – 2.4 GHz	5 MHz	512	TDD
	10 MHz	1024	TDD
	8.75 MHz	1024	TDD
2.305 GHz - 2.320 GHz, 2.305 GHz - 2.320 GHz	3.5 MHz	512	TDD
	5 MHz	512	TDD
	10 MHz	1024	TDD
2.496 GHz - 2.69 GHz	5 MHz	512	TDD
	10 MHz	1024	TDD
3.3 GHz – 3.4 GHz	5 MHz	512	TDD
	7 MHz	1024	TDD
	10 MHz	1024	TDD
2.305 GHz - 2.320 GHz, 2.305 GHz - 2.320 GHz, 2.305 GHz - 2.320 GHz	5 MHz	512	TDD
	7 MHz	1024	TDD
	10 MHz	1024	TDD

## II.2 Características de WiMAX.

WiMAX representa una muy buena opción de tecnología inalámbrica, que ofrece una experiencia de banda ancha mediante servicios que abarcan toda una zona metropolitana. A continuación se describen brevemente algunas características de WiMAX que la convierten en una muy buena opción de solución inalámbrica de Banda Ancha. Como se mencionó WiMAX está estandarizado por la IEEE a través del grupo de trabajo 802.16 el cual trata como se sabe, aspectos de capa 1 y 2 (física y de enlace de datos).

En el conjunto de estándares IEEE 802.16 se definen los parámetros correspondientes a la capa física, la cual establece la conexión física entre ambos lados, generalmente en ambos sentidos (enlace de bajada y de subida). La capa física es responsable por la transmisión de la secuencia de bits. Se define el tipo de señal utilizada, tareas de modulación y demodulación, potencia de transmisión entre otras características físicas más. Entre las diferentes versiones del estándar desarrollados por el grupo IEEE 802.16 se definen cuatro diferentes perfiles de capa física (Anexo A), el presente proyecto de investigación está dirigido al definido en el estándar IEEE 802.16e el cual utiliza OFDMA. En la figura 1 se muestran esquematizados los elementos que conforman la capa física.



**Figura 1. Capa Física de WiMAX**

También se define lo correspondiente a la subcapa de Control de Acceso al Medio (MAC) de WiMAX, que es la responsable de establecer las reglas para compartir los

recursos del canal entre los múltiples accesos de los usuarios. Realiza funciones de seguridad de la información, control de Calidad de Servicio, selección de esquema de modulación y tasa de codificación, etc.

En los puntos siguientes se da un resumen de las características generales WiMAX tanto de la capa física como de la subcapa MAC, en el anexo A se profundiza en los aspectos definidos en el estándar para ambas capas.

### **II.2.1. Tasas Altas de Transmisión y Cobertura Amplia.**

Una característica fundamental de WiMAX es su velocidad de transmisión y su capacidad de cobertura que presenta con respecto a otras tecnologías inalámbricas de características similares. Teóricamente WiMAX puede alcanzar tasas de alrededor de los 75 Mbps en las mejores condiciones, y manejar áreas de cobertura de hasta 40 o 50 Km con condiciones de línea de vista. Sin embargo para casos más típicos se manejan en sistema de transmisión asimétrica, tasas de hasta 25 Mbps para el enlace de bajada (DL) y 6.7 Mbps para el de subida (UL), en cuanto a la distancia que puede cubrirse, en escenarios que no presentan línea de vista que son los que comúnmente se presentan, se alcanzan entre los 8 y los 10 km; que siguen considerándose valores altos.

### **II.2.2. Modulación y Codificación Adaptativa.**

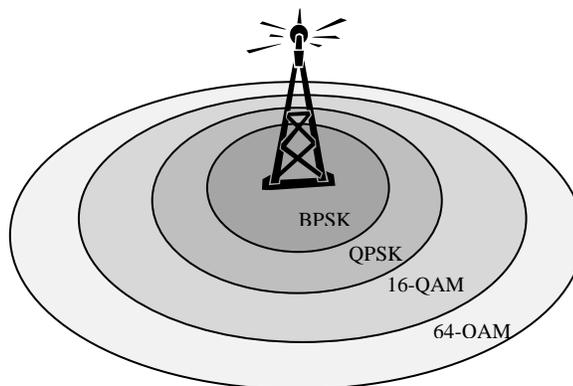
Dentro de lo especificado para la capa Física de WiMAX, particularmente en lo referente a la codificación del canal se maneja el uso de un código corrector de errores basado en un Código Convolutacional binario no recursivo. La tasa nativa de dicho código es de 1/2, sin embargo puede extenderse para formar cadenas de bits codificados con tasa 2/3 y 3/4 valiéndose de la técnica de “ponchado” (puncturing en inglés) [IEEE 802.16e, 2006]. De manera opcional define el uso de opciones de codificación más complejas como turbo código.

La cadena de bits codificados se ingresa en serie al modulador, donde es convertida a una secuencia de símbolos de valor complejo haciendo un mapeo al diagrama de

constelación correspondiente dependiendo del esquema de modulación a utilizar. Los posibles diagramas de constelación a utilizar para el envío de información especificados en [IEEE 802.16e, 2006] son QPSK, 16-QAM y 64-QAM, detallados en el anexo A. Adicionalmente se define el uso de un diagrama de constelación BPSK para emplearse como técnica de modulación para el envío de mensajes de control y administración.

WiMAX permite ajustar para cada trama el esquema de modulación y tasa de codificación de la señal dependiendo de las condiciones del canal que presenta cada enlace, medida por la relación señal a ruido (SNR). Cuando el enlace de radio presenta muy buenas condiciones, alta SNR, se utilizan los esquemas de modulación de mayor nivel (64-QAM para el caso de WiMAX) con las tasas de codificación más elevadas para maximizar la capacidad de transmisión del sistema. Caso contrario para un mal enlace de radio, (señal débil) se manejan esquemas de modulación de bajo nivel, para lograr mantener la calidad de la conexión y la estabilidad del enlace.

Este mecanismo, esquematizado en la figura 2, ayuda a los sistemas WiMAX a sobrellevar de mejor manera el problema del desvanecimiento selectivo en frecuencia, además de maximizar el throughput en un canal variante en el tiempo.

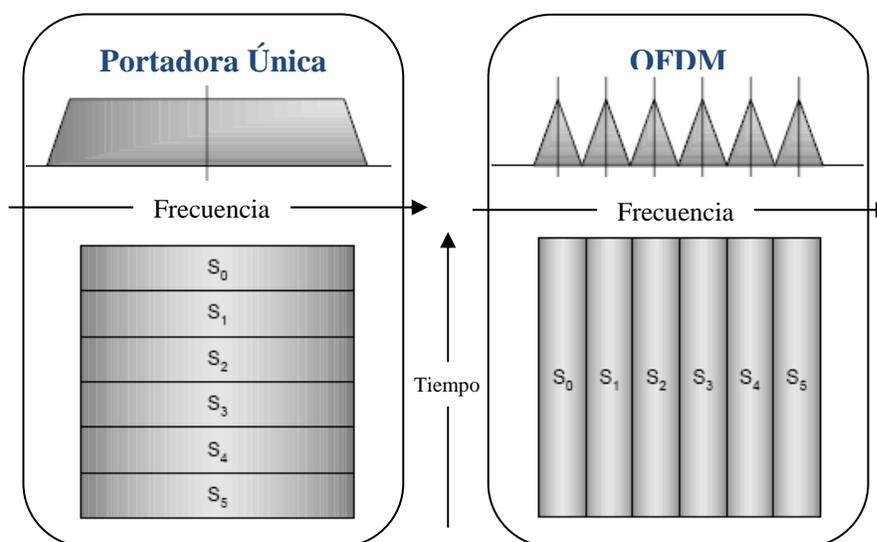


**Figura 2. Modulación Adaptativa**

## II.2.3. Multicanalización, Tecnología OFDM

La capa física de WiMAX está basada en la Multicanalización por División de Frecuencias Ortogonales (OFDM), lo que permite sobrellevar los inconvenientes que se presentan en ambientes sin línea de vista. OFDM toma un flujo de datos y los divide en  $N$  flujos paralelos, cada uno a una tasa de  $1/N$  de la original, por lo que la duración de cada símbolo de la modulación aumenta. Debido a este aumento en el tiempo del símbolo OFDM y a la utilización del prefijo cíclico, este tipo de multicanalización puede reducir en gran medida o incluso eliminar la interferencia por multitrayectorias, además de presentar una gran eficiencia espectral. En la figura 3 se observa una imagen comparativa entre una señal OFDM y una señal de portadora única.

Un símbolo OFDM está formado por un grupo de subportadoras. Para el caso de WiMAX fijo, maneja símbolos OFDM de 256 subportadoras y para el caso de WiMAX móvil pueden ser de 128, 512, 1024 o 2048 subportadoras. Dentro de estas subportadoras existen 3 diferentes tipos dependiendo de su función: *Subportadoras de Datos* utilizadas para transmitir la información o carga útil, *Subportadoras Piloto* que son subportadoras de señalización asignadas para diversos propósitos de estimación y *Portadoras Nulas* que no transmiten ninguna información, reservadas como bandas de guarda y portadora DC.

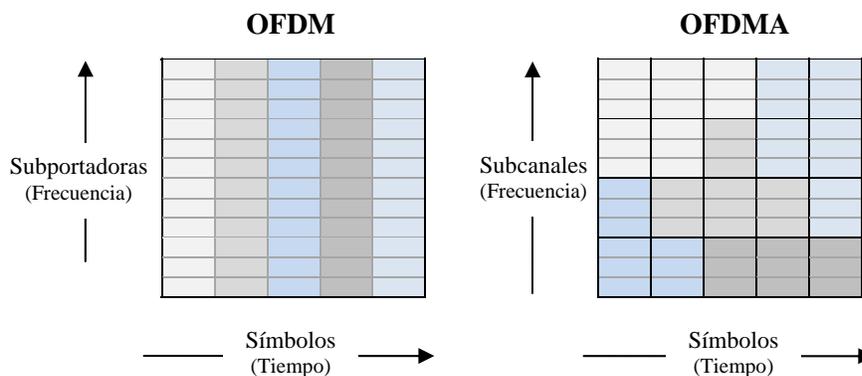


**Figura 3. Portadora Única vs OFDM**

## II.2.4. OFDM como Técnica de Acceso al Medio

WiMAX permite utilizar OFDM como técnica de acceso múltiple (OFDMA), esto indica que el conjunto de subportadoras que utiliza un símbolo OFDM para transportar la información, se divide en grupos llamados subcanales, y así poder asignar cada uno de estos subcanales a diferentes usuarios o conexiones dependiendo de las condiciones del canal y los requerimientos de información.

Una estación base de un sistema WiMAX que utiliza OFDM, asigna todas las subportadoras de un símbolo a un solo usuario para poder transmitir, por el contrario, un sistema WiMAX que utiliza una interfaz OFDMA, al formar subcanales permite que en un símbolo OFDM se asignen los recursos a diferentes usuarios o conexiones para que transmitan. El uso de OFDM como técnica de acceso al medio (OFDMA) permite explotar la diversidad de frecuencia y la diversidad multiusuario para así mejorar las capacidades del sistema. En la figura 4 se muestra una imagen comparativa de las diferencias entre OFDM y OFDMA.



**Figura 4. OFDM vs OFDMA**

## II.2.5. Asignación Dinámica de Recursos.

En una red existen estaciones Base y estaciones Suscriptoras, la estación base es la encargada (a través de un calendarizador) de la asignación de los recursos tanto para el

enlace de subida como para el enlace de bajada para las distintas conexiones de las estaciones suscriptoras vinculadas a ella.

Una característica importante que presenta la tecnología WiMAX es que permite compartir la capacidad total de los recursos del sistema entre los múltiples usuarios en base a demanda utilizando Multicanalización por División de Tiempo (TDM), es decir cada símbolo OFDM puede ser asignado a los diferentes usuarios como oportunidad para transmitir información.

Si a esto se le suma OFDM como técnica de acceso al medio, OFDMA el sistema permite compartir el ancho de banda disponible entre los usuarios tanto en el dominio del tiempo como en el dominio de la frecuencia, asignando los diferentes subcanales de cada uno de los símbolos OFDM a diferentes usuarios. Adicional a esto, el estándar también especifica la posibilidad de la asignación espacial de recursos utilizando arreglos avanzados de antenas.

Se dice que la asignación es *dinámica* ya que los recursos que se ofrecen para las distintas conexiones cambian obedeciendo a factores como solicitud de las estaciones suscriptoras o las condiciones de canal. En el estándar [IEEE 802.16e, 2006] se especifican los mecanismos que permiten asignar los recursos disponibles de manera dinámica en tiempo, frecuencia y espacio según los requerimientos de transmisión de datos. Especifica también los mensajes de control necesarios para difundir a los usuarios las asignaciones de cada trama.

## **II.2.6. Calidad de Servicio**

Los sistemas de tecnología WiMAX ofrecen Calidad de Servicio a nivel de capa 2, particularmente subcapa MAC, con una arquitectura de capa 2 orientada a conexión, es decir, antes de iniciar la comunicación se verifican determinados datos (disponibilidad, alcance, etc.) entre la estación base y la estación suscriptora para establecer un vínculo entre ellas. Aunque esto implica mayor carga de tráfico para la red y obviamente un mayor retardo, permite tener una comunicación más eficiente y confiable. Esta arquitectura de

subcapa MAC permite a WiMAX ser capaz de soportar una gran variedad de aplicaciones; tráficos CBR y VBR, tráfico en tiempo real y en tiempo no real, además de tráfico de mejor esfuerzo.

WiMAX está diseñado para soportar varias estaciones suscriptoras con múltiples conexiones, cada una con sus propios requerimientos de QoS. Para lograr satisfacer los requerimientos de Calidad de Servicio de cada una de las conexiones presentes en el sistema, el estándar IEEE 802.16e-2005 define una categorización de flujos de servicios en los cuales clasifica las conexiones; así identifica las características del tráfico que transportan para darle el trato adecuado.

Una de las funciones clave de la subcapa MAC de WiMAX es asegurar que los requerimientos de calidad de servicio de los MAC-PDUs sean atendidos tan confiablemente como las condiciones de carga en el sistema permita. Esto implica que diversos indicadores de rendimiento ligados a la calidad de servicio global, como latencia, *jitter*, tasa de transmisión, tasa de paquete erróneo y disponibilidad del sistema se deben cumplir para cada conexión.

Para esto el estándar define a nivel de subcapa MAC una clasificación de tráficos denominados *Servicios de Calendarización* para poder manipular los MAC PDUs con diferentes requerimientos de calidad de servicio. Esta clasificación determina la manera en la que serán asignadas las oportunidades de transmisión en los enlaces de subida y bajada. [IEEE 802.16e, 2006] define 5 diferentes servicios:

- *Unsolicited Grant Service (UGS)*, designado para flujos de servicios en tiempo real que generan paquetes de datos de tamaño fijo de manera periódica como por ejemplo VoIP. UGS ofrece asignaciones de tamaño fijo en tiempo real y no necesita que la estación suscriptora solicite explícitamente, esto elimina la sobrecarga y latencia asociada con los mensajes de solicitud de ancho de banda.
- *Real Time Polling Service (rtPS)*. Designado para soportar servicios en tiempo real que generan paquetes de tamaño variable de manera periódica, como video MPEG. En este

- *No Real time Polling Service (nrtPS)*. Especificado para tráfico de aplicaciones que no trabajan en tiempo real, proporciona un servicio muy similar a rtPS con la diferencia que la estación suscriptora puede también utilizar la solicitud basada en contención para el enlace de subida. En nrtPS, al igual que en rtPS, se pueden enviar oportunidades *unicast* para solicitar ancho de banda sin embargo el tiempo que pasa entre una oportunidad y otra es mucho mayor que el caso de rtPS.
- *Best Effort service (BE)*. este tipo de servicio ofrece muy poco soporte de calidad de servicio, se utiliza solo para aplicaciones que no tienen estrictos requerimientos de calidad de servicio. Los datos clasificados como BE son transmitidos únicamente cuando los recursos están disponibles y no son requeridos por ningún otro servicio. Las solicitudes de ancho de banda se realizan basadas en contienda.
- *Extended real time Polling Service (ertPS)*. Este tipo de servicio es una combinación de UGS y rtPS, ya que mantiene asignaciones fijas como UGS las cuales pueden utilizarse para transmitir información o para actualizar sus requerimientos de ancho de banda. lo que permite manejar datos de aplicaciones que cambian sus requerimientos de ancho de banda con el tiempo.

En la tabla III se muestra, a manera de resumen la descripción de cada uno de los servicios explicados anteriormente y algunos ejemplos de cada uno de ellos.

**Tabla III. Servicios de Calendarización**

<b>Nombre</b>	<b>Tipo servicio</b>	<b>Asignación de recursos</b>	<b>Ejemplos</b>
<b>UGS</b> Unsolicited Grant Service	-Tiempo Real -Paquetes tamaño fijo	- Periódicas de Tamaño fijo - Sin solicitar	VoIP
<b>ertPS</b> Extended-rtPS	-Tiempo Real -Cambian requerimientos de QoS con el tiempo	-Periódica de Tamaño Fijo -Además Solicitud	VoIP con supresión de silencios.
<b>rtPS</b> Realtime Polling Services	-Tiempo Real -Paquetes tamaño variable	-Solicitud por encuesta (Polling).	Video MPEG
<b>nrtPS</b> Non-real-time Polling S.	-Paquetes tamaño variable.	-Solicitud de BW basada en Contienda. -Posible polling	FTP, WEB (HTTP)
<b>BE</b> Best Effort	-Sin requerimientos de QoS	-Solicitud BW basado en contienda -Solo cuando están disponibles	Email, P2P

WiMAX también define lo que denomina *flujo de servicio*, que es un flujo unidireccional de SDUs que tienen requerimientos particulares de Calidad de Servicio. Los diversos flujos de servicios admitidos por WiMAX son agrupados usualmente en clases de flujos de servicios, cada uno identificado por un grupo único de requerimientos de calidad de servicio.

Estos mecanismos permiten a la estación base de un sistema WiMAX identificar los paquetes de información que le llegan para poder ofrecer calidad de servicio. Una vez clasificados, el Calendarizador se encarga de realizar las asignaciones de subcanales de manera que, en la medida de lo posible, cada una de las conexiones mantenga los límites requeridos de métricas de desempeño como retardo y throughput. Algunos esquemas de calendarización y características de ellos se presentan en el siguiente capítulo.

## Capítulo III

---

### Técnicas de Calendarización

---

#### III.1. Introducción

Ofrecer Calidad de Servicio en redes inalámbricas es una tarea difícil debido a las características propias de las conexiones inalámbricas y, para el caso de los sistemas multimedia como WiMAX, se agrega la alta variabilidad de tráfico. Para sobrellevar estos problemas y poder ofrecer Calidad de Servicio, el estándar IEEE 802.16e-2005 especifica la clasificación de cinco tipos de servicio de calendarización detallados en el capítulo II: UGS, rtPS, nrtPS, BE y ertPS.

Esta clasificación representa la base para poder asignar los recursos de la capa física de acuerdo a los requerimientos de Calidad de Servicio que presenta cada aplicación. Sin embargo el estándar no define el algoritmo que se utilizará para ello, solo define el uso de un Calendarizador como parte de la estructura WiMAX. Actualmente existen múltiples técnicas de calendarización, en este capítulo se describen en primera instancia algunas características deseables y la delineación de algunas de estas técnicas.

#### III.2 Características Básicas de los Esquemas de Calendarización

Existen una serie de características que debe de presentar un algoritmo de calendarización para ofrecer un desempeño eficiente y ser considerado como una buena política de calendarización:

- *Buena utilización de ancho de banda.* El algoritmo de calendarización debe hacer un uso eficiente de los recursos disponibles, debe optimizar el ancho de banda evitando la asignación de los recursos a las conexiones con enlaces malos. Dando prioridad a los enlaces que presentan mejores condiciones ya que al utilizar esquemas de modulación superiores y tasas de codificación más elevadas se aprovecha de mejor manera el ancho de banda logrando mayores tasas de transmisión.
- *Requerimientos de Calidad de Servicio.* Tiene que ser capaz de soportar múltiples aplicaciones de características muy variadas. Debe de considerar los límites de retardo para las aplicaciones que presenten mayor sensibilidad a ello, y a la par garantizar el throughput a largo plazo para todas las conexiones presentes en el sistema.
- *Justicia.* Debe otorgar los recursos de manera equitativa entre las diferentes conexiones, de manera que no se quede rezagada ninguna conexión. Debe ofrecer justicia a largo y a corto plazo.
- *Complejidad de implementación.* Se busca que el algoritmo sea lo más sencillo posible, que esté fundamentado en procesos rápidos de toma de decisiones, para minimizar el retardo en el proceso de asignación de recursos.
- *Escalabilidad.* Significa que el algoritmo presente una buena respuesta ante el incremento de la carga de trabajo o el incremento del número de conexiones que solicitan los recursos.

### **III.3 Calendarizadores de Objetivo Específico.**

Existen esquemas de calendarización enfocados en lograr instantáneamente un objetivo, un ejemplo de ellos es el algoritmo de *Máxima Equidad*, en el cual se realizan las asignaciones de recursos de tal manera que se maximice la tasa mínima de todos los usuarios. Se busca igualar las tasas de transmisión de todas las conexiones presentes en el sistema.

Otro ejemplo de este tipo de algoritmos de objetivo específico es el denominado *Máxima Tasa*. Este algoritmo, como su nombre lo indica, se centra en maximizar la suma total de la tasa de transmisión, este tipo de algoritmo es óptimo si el objetivo de la red es transmitir tantos datos como sea posible a través del sistema. Para lograr esto, este esquema de calendarización asigna los recursos a las conexiones que presenten mejores condiciones de canal, ya que en estos enlaces se pueden utilizar esquemas de modulación y tasas de codificación mayores.

Este tipo de algoritmos ofrece una alta eficiencia espectral, sin embargo, evidentemente este algoritmo presenta el inconveniente de que pocos usuarios cercanos a la estación base (BS), que típicamente serán los que presenten las mejores condiciones de canal, acaparen los recursos dejando rezagados a los usuarios que presenten condiciones más pobres. Este algoritmo también es conocido como *Máxima Señal a Ruido* ya que los recursos son asignados a los usuarios con mayor SNR.

### **III.4. Algoritmo Round Robin.**

Este algoritmo es uno de los esquemas de calendarización más conocidos y simples diseñado especialmente para sistemas de tiempo compartido, donde el Calendarizador asigna ranuras de tiempo a cada conexión en igual proporción sin prioridad. Con Round Robin una vez que una conexión es atendida, no es visitada otra vez hasta que son servidas todas las estaciones suscriptoras (SS) en el sistema, por ello ofrece un acceso a los recursos justo para todas las conexiones ofreciendo la misma cantidad de recursos del sistema a las diferentes SS independientemente de las condiciones del canal. Sin embargo este algoritmo nos ofrece la misma eficiencia en el uso del ancho de banda disponible que un Calendarizador aleatorio. Esta técnica es adecuada si los suscriptores tienen tráficos similares y características de canal iguales.

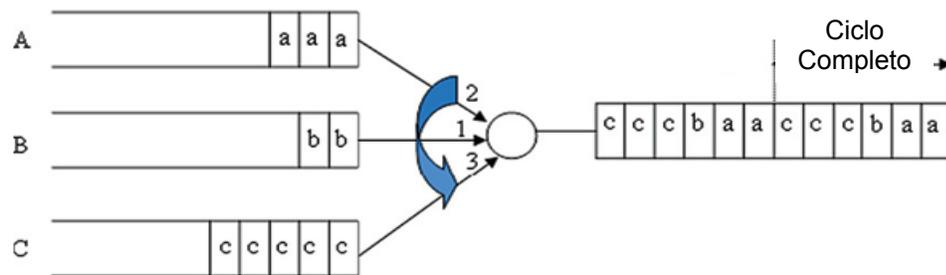
### III.4.1 Round Robin Ponderado.

Este algoritmo, conocido como WRR (Weighted Round Robin), es una extensión de Round Robin basada en la asignación de un “peso” estático a las diferentes conexiones. Es una aproximación de GPS (Generalized Processor Sharing); que es una disciplina de servicio para compartir recursos de forma eficiente, flexible y justa, sin embargo, no es posible su implementación dado que asume tráfico fluido (tamaño de paquetes infinitesimal) [Schwartz, 2005].

Mientras que GPS sirve cantidades infinitesimales de datos de cada cola no vacía, WRR sirve un número de paquetes determinado para cada conexión. WRR asigna a cada tipo de aplicación un peso  $w_i$ , de forma que la suma total de los pesos es igual a 1. En cada ronda del round robin, el servidor atiende cada tipo de aplicación en proporción a su peso asignado. Suponiendo que en una ronda se tienen  $N$  tipos de aplicaciones que tienen paquetes que transmitir, entonces la fracción de recursos que le corresponden al tipo de datos  $i$  es:

$$\frac{w_i}{\sum_{j \in N} w_j} \quad (1)$$

En la figura 5 se observa un ejemplo representativo con 3 tipos de aplicaciones distintas, la cola A con un peso de  $2/6$ , la B con peso de  $1/6$  y la C con peso de  $3/6$  [Ma, 2009]. Podemos apreciar que el número de asignaciones en un ciclo completo es proporcional al peso.



**Figura 5. Calendarización de paquetes con WRR**

### III.5. Algoritmo de Equidad Proporcional.

La meta principal de este esquema de calendarización de paquetes es elevar el throughput del sistema, y a la par ofrecer equidad para las conexiones a considerar. Está diseñado para utilizar las ventajas de la diversidad multiusuario mientras mantiene un throughput equiparable a largo plazo para todos los usuarios. El algoritmo de equidad proporcional basa su funcionamiento en el cálculo de una función de prioridad para cada una de las conexiones:

$$FuncPrio(t) = \frac{R_i(t)}{T_i(t)} \quad (2)$$

Donde  $R_i(t)$  es la tasa de datos instantánea que puede alcanzar el usuario  $i$  en el tiempo  $t$  este valor está en función de la cantidad de recursos y el esquema de modulación y tasa de codificación.  $T_i(t)$  es el throughput promedio alcanzado hasta el tiempo  $t$  por el usuario  $i$ , este promedio es calculado mediante la técnica de suavizamiento exponencial. *El Calendarizador asigna los recursos a la conexión que en ese momento tenga el valor de la función de prioridad mayor.*

Debido a que este esquema de calendarización tiende a seleccionar los usuarios con mayor tasa de datos instantánea relativa al throughput promedio, los canales que presentan malas condiciones de canal tienen menor probabilidad de ser seleccionados para asignarles recursos. Sin embargo, las conexiones a medida que se incrementa el tiempo en que no son atendidos, van incrementando su valor de prioridad, lo que promueve la equidad.

Como se había mencionado, en la función de prioridad se utiliza un promedio del throughput calculado utilizando la técnica de *suavizamiento exponencial*. Esta técnica usa un promedio ponderado de los valores pasados observados para obtener una proyección a corto plazo [Ordóñez Pinzón, 2009]. En esta técnica de suavizamiento se consideran todos los valores pasados, dándosele mayor ponderación a los valores recientes y a medida que estos van siendo más antiguos el valor de ponderación va decreciendo exponencialmente.

Este método para asignar las ponderaciones utiliza una constante de suavizamiento  $\alpha$  que debe tomar un valor entre cero y uno. Las ponderaciones que se usan son:  $\alpha$  para la observación más reciente,  $\alpha(1 - \alpha)$  para la siguiente mas reciente,  $\alpha(1 - \alpha)^2$  para la siguiente y así sucesivamente. Por lo tanto se puede deducir que si  $\alpha$  toma un valor cercano a uno, la última observación afecta significativamente el nuevo pronóstico, cuando su valor es cercano a cero el nuevo cálculo será muy parecido al anterior. La ecuación básica de suavizamiento resultante es:

$$P_{t+1} = (1 - \alpha) P_t + \alpha S_t \quad (3)$$

Donde  $P_{t+1}$  representa el promedio calculado para el siguiente periodo ( $t + 1$ ),  $P_t$  es el promedio ponderado calculado hasta el tiempo  $t$ . El término  $S_t$  es el nuevo valor observado en el tiempo  $t$ . Esta ecuación aplicada para el esquema de equidad proporcional quedaría como sigue:

$$T_i(t + 1) = \left(1 - \frac{1}{t_c}\right) T_i(t) + \frac{1}{t_c} R_i(t) \quad (4)$$

Donde  $T_i(t + 1)$  es el throughput promedio del usuario  $i$  para el siguiente periodo,  $T_i(t)$  y  $R_i(t)$  representan el throughput presentado hasta el tiempo  $t$  y la tasa que alcanza el usuario  $i$  al tiempo  $t$ .

La constante de suavizamiento encargada de asignar las ponderaciones está representada por  $\frac{1}{t_c}$ . Para el caso en que la conexión  $i$  no sea seleccionada para asignarle recursos, la tasa de transmisión instantánea es nula, el valor de  $R_i(t)$  es cero, por lo tanto la actualización del promedio ponderado de throughput se calcula mediante el siguiente sistema de ecuaciones:

$$T_i(t + 1) = \begin{cases} \left(1 - \frac{1}{t_c}\right) T_i(t) + \frac{1}{t_c} R_i(t) & \text{servido} \\ \left(1 - \frac{1}{t_c}\right) T_i(t) & \text{no servido} \end{cases} \quad (5)$$

El valor de la constante de suavizamiento para el cálculo del promedio ponderado del throughput, representada en este caso por  $\frac{1}{t_c}$ , es asignado a criterio personal.

### III.6 Calendarización en Sistemas WiMAX

Como se menciona previamente, el estándar IEEE 802.16e define las bases para que WiMAX pueda ofrecer Calidad de Servicio, asociando cada uno de los paquetes con uno de los 5 tipos de servicio que define la manera en que se les asignará ancho de banda a dicho paquete en respuesta a sus requerimientos de calidad de servicio. El módulo de calendarización asigna el ancho de banda en términos de ranuras de tiempo y determina las ranuras correspondientes a cada conexión [Ganz, 2004]. Debido a que la política de calendarización no está definida en el estándar, ha dado pie al surgimiento de múltiples propuestas para cubrir este módulo.

Parte importante del trabajo de investigación realizado es el análisis de las propuestas presentadas en trabajos previos. Algunas propuestas están enfocadas a algún tipo de tráfico en particular, típicamente a tráfico en tiempo real, es decir, calendarizadores diseñados para cubrir los requerimientos de calidad de servicio para transmisiones de video [Chen, 2009] o VoIP [Lee, 2005]. Otras propuestas consideran todo tipo de tráfico, pero presentan esquemas de calendarización de mayor complejidad como calendarizadores jerárquicos [Wang, 2007]. Otra observación interesante es que la mayoría de las propuestas revisadas están diseñadas para sistemas WiMAX con capa física basada en OFDM [Borin, 2008] [Guojun, 2007], no realizan consideraciones para aprovechar las ventajas que representa utilizar OFDMA. Otros trabajos sobre tecnología WiMAX que no están

enfocados al diseño del Calendarizador, sin embargo requieren de él, típicamente utilizan el esquema WRR [Chen, 2005].

En el siguiente capítulo, se presenta una nueva propuesta de política de calendarización capaz de soportar tráfico multimedia, esta política de calendarización está diseñada para trabajar en sistemas WiMAX que utilizan multicanalización OFDM como técnica de acceso al medio (OFDMA).

## Capítulo IV

---

### Diseño de Nueva Propuesta de Calendarización

---

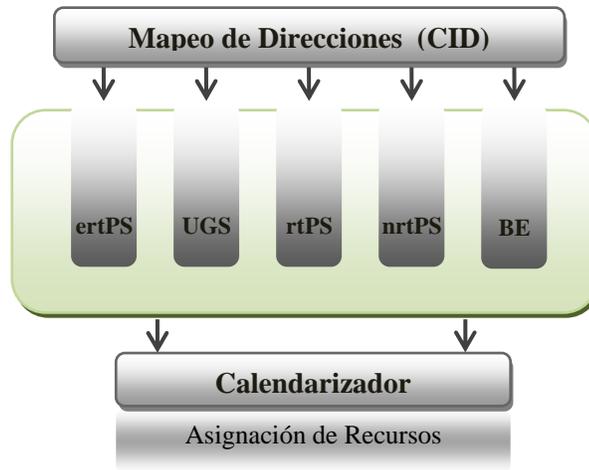
#### IV.1. Introducción

Para el análisis y diseño del esquema de calendarización propuesto en este trabajo de tesis el cual está basado en el estándar IEEE 802.16e-2005, fue necesario conocer su funcionamiento y los mecanismos relevantes definidos para alcanzar los niveles de Calidad de Servicio requeridos. Este estudio se enfoca en el Calendarizador, que si bien esta indicado como un elemento que forma parte de la estructura del sistema WiMAX a nivel de capa MAC, el estándar no especifica la política que este debe seguir para cumplir su tarea de asignación de recursos.

El alto impacto que presenta el Calendarizador sobre el desempeño total de la red, llevó a realizar un análisis de diferentes algoritmos de planificación o calendarización con características y enfoques de atención muy variados. El Calendarizador optimiza la eficiencia de los sistemas WiMAX de acuerdo con criterios de requerimientos de Calidad de Servicio considerados importantes para la determinación o asignación de oportunidades de transmitir entre las conexiones existentes.

Como se muestra en la figura 6 los paquetes recibidos de cada conexión en la capa MAC de un sistema WiMAX son clasificados en uno de los cinco servicios de calendarización (ertPS, UGS, rtPS, nrtPS, BE) de acuerdo a sus especificaciones de Calidad de Servicio, para esto se utilizan identificadores como CID y SFID que se explican en el Anexo A en la sección Subcapa de Convergencia (CS), para poder distinguir a que tipo

pertenece cada uno de los paquetes los cuales se pasan al Calendarizador para que determine cuál de las conexiones transmite datos.



**Figura 6. Mapeo y Calendarización en WiMAX**

Después del análisis de los algoritmos de calendarización que se explican en el capítulo III y en base a las ventajas de sus características se optó por proponer un esquema de Calendarización que utiliza un algoritmo basado en el método de *Equidad Proporcional* el cual busca dar un trato equitativo a los usuarios a la vez que intenta maximizar el throughput traducido en una buena utilización de Ancho de Banda.

Pese a las mencionadas ventajas que representa el utilizar este esquema de calendarización, particularmente en sistemas WiMAX se presentan limitantes importantes que impiden utilizar el algoritmo de equidad proporcional original, lo que llevó a realizar adaptaciones a dicho algoritmo para lograr el objetivo planteado; garantizar los requerimientos de calidad de servicio para tráfico multimedia en sistemas WiMAX. En el presente capítulo se describen dichos ajustes y el funcionamiento del esquema de calendarización que se está proponiendo.

## **IV.2. Limitantes/Ajustes de Algoritmo Equidad Proporcional**

El algoritmo de equidad proporcional presenta fundamentalmente dos inconvenientes críticos que impiden utilizarlo como esquema de calendarización sobre un sistema

WiMAX. El primero de ellos debido a que es un algoritmo diseñado para trabajar en sistemas de canal unitario, es decir, sistemas en los que existe un solo canal que es asignado en su totalidad a un usuario, que no es el caso, ya que los sistemas WiMAX estipulados en el estándar IEEE 802.16e consideran el uso de OFDMA como técnica de acceso al medio, por lo que las subportadoras de los símbolos se agrupan en subcanales, formando así un sistema de canales múltiples.

El segundo impedimento crítico afecta directamente a la parte del manejo de tráfico multimedia ya que el algoritmo original de equidad proporcional no está diseñado para soportar aplicaciones en tiempo real, debido a que no toma en cuenta los requerimientos del tráfico de cada conexión, solo se centra en la capacidad de transmisión que alcanza el enlace de cada una de ellas y la cantidad de atención que han recibido para realizar las asignaciones.

Esta propuesta se basa en el esquema de equidad proporcional, utiliza el mismo principio de funcionamiento, se calcula el valor de la función de prioridad para cada una de las conexiones presentes, siendo la de prioridad de valor mayor a la que se le asignen los recursos disponibles. Sin embargo se modifica la función de prioridad original efectuando las consideraciones necesarias para ampliar el esquema de manera que sea capaz de manejar tráfico en tiempo real y aproveche las ventajas que representa tener un sistema de capa física basada en OFDMA. Dichas modificaciones serán detalladas en los puntos subsecuentes, finalizando con la descripción general del esquema de calendarización propuesto.

### **IV.2.1. Ajuste a Sistemas de Múltiples Canales.**

Como previamente se mencionó, es necesario redefinir la función de prioridad originalmente calculada por el algoritmo equidad proporcional para la toma de decisiones al momento de asignar los recursos, a fin de adaptarla a las características de un sistema de canales múltiples como lo es WiMAX al utilizar OFDMA. Recordando la función de prioridad original, observamos que está formada por 2 elementos:  $R_i(t)$  que representa la

tasa que puede alcanzar un usuario en el tiempo  $t$  y  $T_i(t)$  que es el promedio ponderado del throughput alcanzado hasta el tiempo  $t$ .

$$FuncPrio(t) = \frac{R_i(t)}{T_i(t)} \quad (6)$$

El elemento  $R_i(t)$  en el numerador considera la tasa que podría alcanzar el usuario  $i$  si se le asigna el canal en el tiempo  $t$ , asumiendo que en dicho tiempo  $t$  transmitirá exclusivamente un usuario dado que solamente existe un canal que asignar. Sin embargo, para poder trabajar en un sistema en el cual el canal se divide en subcanales de transmisión es necesario tratar cada uno de ellos de manera independiente, es decir, se tiene que considerar la tasa de transmisión que puede alcanzar el usuario, particularmente en el subcanal que se pretende asignar. Por lo que se agrega un nuevo elemento representado por  $n$  que indica el número de subcanal, cambiando la expresión  $R_i(t) \rightarrow R_i(t, n)$ , obteniendo:

$$FuncPrio(t, n) = \frac{R_i(t, n)}{T_i(t)} \quad (7)$$

En lo concerniente a la parte del denominador de la ecuación anterior, el promedio ponderado del throughput alcanzado, el término  $T_i(t)$  se mantiene debido a que este valor no se calcula para cada asignación. Este promedio ponderado es recalculado al concluir todas las asignaciones del tiempo  $t$  y dicho valor obtenido es utilizado para todas las asignaciones del tiempo  $t+1$ . Sin embargo es necesario modificar la forma en que se obtiene dicho promedio, particularmente para las conexiones que fueron atendidas, originalmente calculado mediante la siguiente ecuación:

$$T_i(t + 1) = \left(1 - \frac{1}{t_c}\right) T_i(t) + \frac{1}{t_c} R_i(t) \quad (8)$$

Como se observa, el sistema de ecuaciones utiliza el término  $R_i(t)$  que representa la tasa de transmisión que el usuario  $i$  alcanza con su reciente asignación, sin embargo, dado que el sistema WiMAX implica canales múltiples, es necesario considerar la tasa de transmisión que el usuario  $i$  alcanzará con los subcanales que le fueron asignados. Para tomar esta consideración se realiza una sumatoria de la tasa de todos los subcanales asignados a él en el tiempo  $t$  para conocer la tasa de transmisión que alcanzará el usuario, expresado matemáticamente como se muestra en la siguiente ecuación:

$$T_i(t + 1) = \left(1 - \frac{1}{t_c}\right) T_i(t) + \frac{1}{t_c} \sum_{\forall n|n \in \beta_i(t)} R_i(t, n) \quad (9)$$

Donde  $\beta_i(t)$  representa el conjunto de subcanales en la ranura de tiempo  $t$ , que le fueron asignados al usuario  $i$ .

## IV.2.2. Diferenciación de Tráficos

El segundo inconveniente crítico que se presenta a la hora de querer implementar el algoritmo de equidad proporcional al sistema WiMAX es con el manejo de los distintos tipos de tráfico, particularmente con el generado por aplicaciones en tiempo real, ya que este algoritmo no fue diseñado para distinguir clases de tráfico y diferentes requerimientos no ofrece ninguna distinción entre el trato de los paquetes.

Para solucionarlo y poder ofrecer prioridades a las conexiones que presentan condiciones de mayor sensibilidad al retardo, no se realizó la modificación directamente en la función de prioridad, sino en la manera en que se calcula uno de los elementos que la conforman, el denominador  $T_i(t)$ . Como se ha venido mencionando este término representa el promedio ponderado del throughput alcanzado hasta el tiempo  $t$ , el cual es calculado utilizando la técnica de suavizamiento exponencial (detallada en el capítulo III), representada por el sistema de ecuaciones mostrado en la ecuación (9).

Como se menciona en el capítulo III, esta técnica utiliza una constante de suavizamiento, en este caso representada por  $1/t_c$ , encargada de asignar la ponderación a los eventos observados. Esta constante puede tomar cualquier valor entre cero y uno; presentando la característica de que si es un valor cercano a uno el evento observado más reciente recibirá una alta ponderación por lo que tendrá un alto impacto en el cálculo del promedio, caso contrario si toma valores cercanos a cero el nuevo cálculo será muy parecido al anterior. Una alta ponderación del valor más reciente se ve reflejada en un sistema con rápida respuesta a los cambios, por el contrario si la observación más reciente es muy parecida a la anterior el sistema presentará respuestas más estables:

$$1/t_c \longrightarrow 1 \quad \text{rápida respuesta a cambios}$$

$$1/t_c \longrightarrow 0 \quad \text{respuesta estable a cambios.}$$

Haciendo valer esta característica se puede forzar el algoritmo para ofrecer Calidad de Servicio asignando valores diferentes a la constante de suavizamiento de cada uno de los tipos de servicio que se tienen, de esta manera, al asignar valores mayores a la constante de suavizamiento correspondiente a los servicios de tráfico que presente mayor sensibilidad al retardo se verá reflejado en asignaciones más recurrentes para este tipo de conexiones garantizando así un bajo retardo.

Dado que la constante de suavizamiento está representada por el inverso del valor de  $t_c$ , por lo tanto, al asignarle valores grandes se obtiene una constante de suavizamiento muy pequeña y viceversa. Por ejemplo un servicio con un valor de  $t_c$  pequeño, si no fue atendido en  $n$  tramas de tiempo, el promedio ponderado  $R_i(t)$  decrece dramáticamente, por lo que el valor de la función de prioridad tiende a crecer rápidamente, elevando la probabilidad de que se le otorgue una oportunidad de transmitir. Por el contrario con un valor de  $t_c$  grande, los valores calculados para  $R_i(t)$  decrecen más lentamente aunque no sea atendido. Este comportamiento del sistema se muestra resumido en la tabla IV, donde se describe lo que sucede en ambos casos, con valores de  $t_c$  grandes y pequeños.

**Tabla IV. Valor  $t_c$  - Función de Prioridad**

Valor $t_c$	Constante de Suavizamiento $1/t_c$	Throughput Promedio $T_i(t)$	Función de Prioridad $FuncPrio(t)$
Valor Grande	⇒ Pequeño (cercano a 0)	⇒ Variación Suave al NO ser atendido	⇒ Crece Prioridad Lentamente
Valor Pequeño	⇒ Grande (cercano a 1)	⇒ Variación Rápida al NO ser atendido	⇒ Crece Prioridad Rápidamente

Se propone que en lugar de utilizar un valor único constante para  $t_c$ , se utilice un valor distinto para las diferentes conexiones y de esta manera poder otorgar prioridades a los flujos de tráfico que requieran asignaciones más recurrentes. Siguiendo este principio, considerando las características propias de cada tipo de tráfico definido en el estándar IEEE 802.16e se asume que el valor correspondiente a los tráficos ertPS y UGS será el más pequeño, seguido por el tráfico rtPS, después el asignado para el tráfico nrtPS y finalmente el tráfico BE; expresado esto matemáticamente de la siguiente manera:

$$UGS, ertPS < rtPS < nrtPS < BE \quad (10)$$

Los valores de la constante de suavizamiento son asignados a criterio personal, para el caso bajo estudio se proponen valores de  $t_c$  del orden de 3 y 4 dígitos, ya que estos ofrecen un funcionamiento óptimo para sistemas con muchas asignaciones de recursos en poco tiempo, siempre cuidando de respetar que se cumpla la regla de  $UGS, ertPS < rtPS < nrtPS < BE$ .

### IV.2.3. Carga de Tráfico

Otro parámetro importante a considerar a la hora de la toma de decisión de la asignación de recursos, es el nivel de carga de tráfico que presentan las conexiones. Una primera opción que se pensó para tomar en cuenta la carga de tráfico fue incluir el elemento  $Bw_i(t)$  en la función de prioridad, el cual representa la cantidad de ancho de banda requerido por la conexión  $i$  en el tiempo  $t$ , el cual se incrementa conforme la conexión tenga más

información que transmitir y disminuye al transmitir información con cada asignación. Sin embargo esta primera opción fracasó dado que se presentaba el caso en que el valor de  $Bw_i(t)$  se incrementaba de tal manera que se convertía en el elemento determinante de la función de prioridad, es decir la cantidad de carga de tráfico dictaría la prioridad dejando de lado la tasa de transmisión y el throughput promedio; perdiéndose así los principios de funcionamiento del algoritmo de equidad proporcional.

Por tal motivo, y debido a que se busca un uso eficiente del ancho de banda disponible, en lugar de utilizar la cantidad de ancho de banda requerido (bps) se optó por utilizar el porcentaje de ancho de banda que requiere la conexión  $i$  con respecto al ancho de banda total requerido por todas las conexiones del mismo tipo. Dicho porcentaje es calculado mediante una división de  $Bw_i(t)$ , ancho de banda requerido por la conexión  $i$  en el tiempo  $t$ , sobre  $BwT_{tr}(t)$  el ancho de banda requerido en el tiempo  $t$  por todas las conexiones del mismo tipo:

$$BwP_i(t) = \frac{Bw_i(t)}{BwT_{tr}(t)} * 100 \quad (11)$$

El porcentaje representado por  $BwP_i(t)$ , es incluido en el cálculo de la función de prioridad de la forma que se muestra en la ecuación 12. De esta manera, se logra que la carga de tráfico que presentan las conexiones sea un factor determinante para la asignación de ancho de banda solamente en los casos que se presenten condiciones de canal y nivel de atención muy similares entre dos o más conexiones del mismo tipo.

### **IV.3. Esquema de Calendarización Propuesto.**

El objetivo principal del esquema de calendarización de paquetes que se propone es elevar el throughput del sistema, y al mismo tiempo ofrecer equidad proporcional para las conexiones, considerando los requerimientos de los distintos tipos de tráfico que se presenten. Al igual que el algoritmo de equidad proporcional, el Calendarizador propuesto basa su funcionamiento en el cálculo del valor de una función de prioridad (ecuación 12).

En un sistema WiMAX basado en el estándar IEEE 802.16e, las asignaciones de recursos se realizan por subcanales. Se calcula la función de prioridad de las conexiones, asignando el subcanal al de valor de prioridad mayor.

$$FuncPrio(t, n) = \frac{R_i(t, n) + BwP_i(t)}{T_i(t)} \quad (12)$$

La función de prioridad está conformada por los elementos analizados. Donde  $R_i(t, n)$  representa la tasa de transmisión que el usuario  $i$  puede alcanzar en el tiempo  $t$  considerando el subcanal  $n$ .  $BwP_i(t)$  es el porcentaje de ancho de banda que requiere el usuario  $i$  en el tiempo  $t$ . Finalmente  $T_i(t)$  es el promedio ponderado del ancho de banda asignado hasta el tiempo  $t$ , calculado para cada tiempo  $t$  mediante la técnica de suavizamiento exponencial representada por el sistema de ecuaciones mostrado en la ecuación 13.

$$T_i(t + 1) = \begin{cases} \left(1 - \frac{1}{t_c}\right) T_i(t) + \frac{1}{t_c} \sum_{\forall n | n \in \beta_i(t)} R_i(t, n) & \text{servido} \\ \left(1 - \frac{1}{t_c}\right) T_i(t) & \text{no servido} \end{cases} \quad (13)$$

Donde  $\frac{1}{t_c}$  representa la constante de suavizamiento que puede tomar 4 distintos valores dependiendo del tipo de tráfico. A raíz del análisis planteado en el punto IV.2.2 del presente capítulo y respetando la regla  $UGS, ertPS < rtPS < nrtPS < BE$ , con la finalidad de observar el efecto que tienen sobre el valor de la función de prioridad se experimentó con distintos valores de  $t_c$ . De los valores de la constante de suavizamiento probados se eligieron los que, estrictamente a criterio personal, ofrecen los niveles de prioridad buscados para cada conexión y arrojan los mejores resultados: para tráfico ertPS y UGS  $t_c = 600$ , para el caso de tráfico rtPS  $t_c = 900$ , el tráfico nrtPS  $t_c = 1200$  y finalmente para tráfico BE  $t_c = 1600$ . Todo el análisis y los resultados presentados en el presente trabajo son hechos considerando los valores anteriormente expresados.

Cabe aclarar que en el caso bajo estudio, un tiempo  $t$  está representado por una ranura de tiempo, que en el caso del sistema WiMAX que estamos analizando está conformado por 2 símbolos OFDM según lo establecido en el estándar IEEE 802.16e.

# Capítulo V

---

## Modelo de Simulación

---

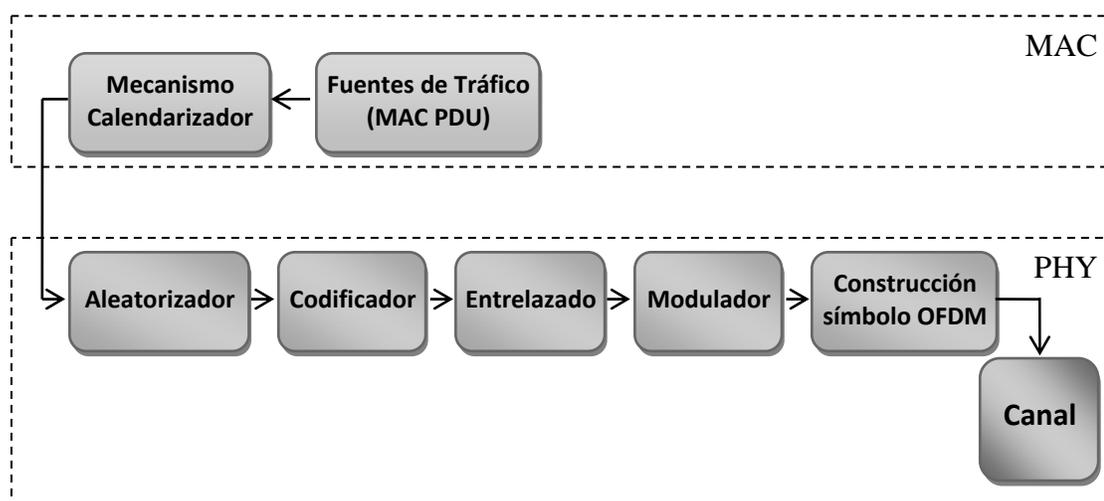
### V.1. Introducción.

En el capítulo IV se describe la propuesta de un nuevo esquema de calendarización capaz de manejar tráfico multimedia a través de un sistema WiMAX. Para poder observar el desempeño del esquema propuesto se utilizó un escenario de simulación de un sistema WiMAX punto a multipunto, con una única estación base y múltiples estaciones suscriptoras.

Tener múltiples estaciones vinculadas a una estación base, permite evaluar el algoritmo utilizando las distintas combinaciones de esquemas de modulación y tasas de codificación posibles según el estándar IEEE 802.16e. Además a través de dicho sistema WiMAX es necesario que viajen paquetes de tráfico multimedia generado por aplicaciones tan variadas, que permita valorar el funcionamiento del nuevo esquema de calendarización para cada una de las clases de servicios definidas en el estándar.

Para esta parte del trabajo de investigación, se estudiaron a detalle las distintas herramientas de simulación que podríamos utilizar para desarrollar el escenario de simulación necesario para una correcta evaluación de nuestro sistema. Inicialmente se examinaron la herramienta NS2 y OPNET, sin embargo a pesar de ofrecer una interfaz más gráfica y amigable al momento de ejecutar las simulaciones, representaban un problema mayor a la hora de querer implementar el Calendarizador que estamos proponiendo en el sistema. Finalmente se optó por utilizar el lenguaje MATLAB.

El presente capítulo está enfocado a describir las herramientas y componentes definidos en el estándar IEEE 802.16e-2005 que se simularon para poder medir el desempeño de lo propuesto en el capítulo anterior. A nivel de capa MAC se desarrollaron fuentes de tráfico que generan flujo de paquetes y obviamente la parte correspondiente al Calendarizador. En nivel de capa física todo lo correspondiente a la codificación del canal, modulación, formación del símbolo OFDM y el canal de transmisión. En la figura 7 se observa un diagrama a bloques de los elementos simulados.



**Figura 7. Diagrama a Bloques sistema WiMAX simulado**

En la parte superior del diagrama se describen los componentes concernientes a la subcapa MAC y posteriormente se continúa con los de la capa física (PHY). Cabe señalar que el estudio realizado durante el trabajo de tesis está centrado en el enlace de bajada de un sistema WiMAX debido a que típicamente es la que presenta mayor flujo de información.

## **V.2. Fuentes de Tráfico**

Con el fin de tener flujo de aplicaciones multimedia y cubrir los diferentes servicios de calendarización definidos en el estándar IEEE 802.16e-2005, se caracterizaron diferentes fuentes de tráfico para simular el flujo de paquetes de cada una de ellas. Se simularon

fuentes de tráfico en tiempo real, NO en tiempo real, tráfico CBR y tráfico VBR. A continuación se presentan las consideraciones y características de los diferentes modelos de tráfico seleccionados.

### **V.2.1. Modelo de Tráfico VoIP.**

El modelo de tráfico simulado que genera un servicio de VoIP está basado en el formato de compresión de audio Multi Tasa Adaptativa (AMR por sus siglas en inglés). El códec AMR fue desarrollado y estandarizado originalmente por ETSI (European Telecommunications Standards Institute) para sistemas celulares GSM. Ahora elegido por 3GPP (Third Generation Partnership Project) como el codificador obligatorio para los sistemas celulares de tercera generación.

AMR es un códec multimodo que soporta 8 modos de codificación con tasas de bit entre los 4.74 y 12.2 Kbps, la frecuencia de muestreo que utiliza es de 8000 Hz y la codificación se realiza en tramas de 20 ms. por lo tanto cada trama de codificación representa 160 muestras del audio original. [Sjoberg, 2002]

Una llamada genera un patrón que puede ser modelado por una cadena de Markov de dos estados o tipo ON-OFF, el estado ON correspondiente a los periodos de actividad y el estado OFF para los periodos de silencio. Pruebas experimentales muestran que la duración de un periodo de actividad (ON) sigue un comportamiento exponencial con media de 1026 ms, mientras que los periodos de silencio (OFF) presentan una media de 1171 ms, también con comportamiento Exponencial [Jain, 2008].

El códec AMR soporta detección de silencios, durante estos periodos se transmiten periódicamente paquetes denominados “*comfort noise*” los cuales mejoran la calidad de la llamada reproduciendo ruido de fondo. Cuando finaliza un periodo activo (ON) el transmisor genera siete tramas adicionales (*hangover*) de la misma tasa para asegurar la correcta estimación de los parámetros en el lado del receptor. Enseguida se transmite una trama sin datos que indica el inicio del periodo de silencio, durante este periodo no se transmiten datos, solo se transmite una trama “*comfort noise*” cada ocho tramas. El número

de paquetes generados durante el periodo activo de la conversación es calculado por la siguiente ecuación:

$$NoPaq_{activo} = \frac{Duracion (1026 ms)}{Duracion Trama (20 ms)} + Hangover(7) \quad (14)$$

Para los periodos inactivos de la conversación, el número de paquetes “*comfort noise*” es calculado como sigue:

$$NoPaq_{silencio} = \frac{\frac{Duracion (1171 ms)}{Duracion Trama (20 ms)} - Hangover(7)}{8} \quad (15)$$

En la tabla V se listan los parámetros considerados para la fuente de tráfico VoIP [Jain, 2008].

**Tabla V. Parámetros de Modelo de Tráfico VoIP**

Voz IP (Código AMR)	
Duración Promedio de llamada	Distribución Exponencial Media=210 s
Longitud de Trama	20 ms
Duración periodo ON	Distribución Exponencial Media=1026 ms
Tamaño MAC PDU (ON)	42 bytes
Duración periodo OFF	Distribución Exponencial Media=1171 ms
Tamaño MAC PDU (OFF)	16 bytes
Tasa de bit sin supresión de silencios	16.82 Kbps
Tasa de bit con supresión de silencios	9.71 Kbps

## V.2. 2. Modelo de Tráfico de Video.

El modelo de tráfico de video está basado en la tecnología H.264 del estándar MPEG-4. H.264 es una norma que define un códec de alta compresión desarrollado por la ITU-T junto con el grupo de trabajo MPEG de ISO/IEC con la intención de crear un estándar que igualara o mejorara la calidad de sus antecesores MPEG2, utilizando tasas de bits inferiores.

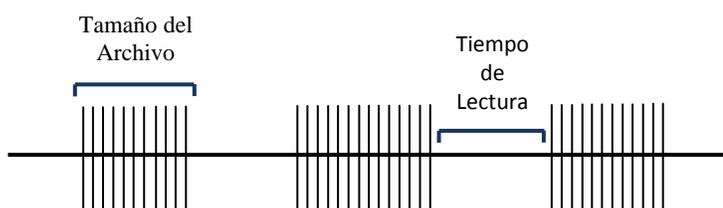
Para el desarrollo de este modelo de tráfico de video, en lugar de realizar la caracterización de la fuente, se utilizó la herramienta WireShark para la captura de paquetes de una transmisión real de un video. Para lograrlo se transmitió un fragmento de video que utiliza la tecnología H.264 del estándar MPEG-4 el cual tiene una resolución de 176x144. La cadena de paquetes capturados se utilizó para la simulación de una fuente de video la cual presentó una media de la tasa de transmisión de 540 Kbps para una sesión de video.

**Tabla VI. Parámetros de Modelo de Tráfico de Video**

Video	
Video Códec	H.264 (MPEG4 parte 10)
Duración promedio de sesión	3600 s
Resolución	176x144 pixeles
Tasa promedio	540 Kbps

## V.2.3. Modelo de Tráfico FTP.

En aplicaciones FTP, una sesión consiste de un conjunto de transferencias de archivos descargados, separados por tiempos de lectura. Los 2 principales parámetros de una sesión FTP son el tamaño del archivo a ser transferido y el tiempo de lectura (figura 8) que representa el intervalo de tiempo entre el final de la transferencia de un archivo y la solicitud de descarga del siguiente.



**Figura 8. Esquema de sesión FTP**

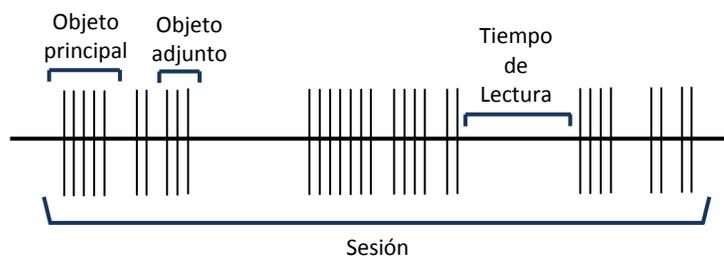
Para cada archivo que se transmite, se utiliza una conexión TCP. Se considera que la distribución del tamaño de los paquetes es de 76% de los archivos transmitidos es enviado en paquetes grande de 1500 bytes y el 24 % restante en enviado en paquetes pequeños de 576 bytes. Para obtener el valor de los tiempos de lectura y el tamaño de los archivos de descarga se consideró que seguían las distribuciones mostradas en la tabla VII. [Jain, 2008].

**Tabla VII. Parámetros de Modelo de Tráfico FTP**

<b>Sesión FTP</b>	
	Distribución Log normal Truncada
Tamaño de Archivo	<i>Media=2 Mbyte</i> <i>DesvEst=0.72 Mbyte</i> <i>Max=5 Mbyte</i>
Tiempo de Lectura	Distribución Exponencial <i>Media=180 s</i>

#### **V.2.4. Modelo de Tráfico HTTP.**

Para la caracterización del modelo de tráfico HTTP, se considera que una sesión está formada por una cantidad de páginas web, cada una de las cuales consta de un objeto principal, regularmente el de mayor tamaño, y varios objetos adjuntos. De manera similar a las sesiones de FTP, entre cada una de las páginas que conforman la sesión HTTP existe un periodo de tiempo denominado tiempo de lectura. Estos componentes se observan esquematizados en la figura 9.



**Figura 9. Esquema de sesión HTTP**

La información generada por los objetos de una sesión HTTP es dividida en paquetes de 1500 bytes y 576 bytes. El 76% del número total de paquetes generados en una sesión corresponde a paquetes de 1500 y el 24% restante a paquetes de 576 bytes. Los valores para el tamaño de los objetos y los tiempos de lectura se obtuvieron siguiendo las distribuciones especificadas en la tabla VIII [Jain, 2008].

**Tabla VIII. Parámetros de Modelo de Tráfico HTTP**

Sesión HTTP	
Número de páginas por sesión	Distribución Log normal <i>Media=17 páginas</i> <i>DesvEst=22 páginas</i>
Tamaño de Objeto Principal	Distribución Log normal Truncada <i>Media=10.71 Kbyte</i> <i>DesvEst=25.03 Kbyte</i> <i>Max=2 Mbyte</i>
Numero de Objetos Adjuntos	Distribución Pareto Truncada <i>Media=5.64</i> <i>Max=53</i>
Tamaño de Objetos Adjuntos	Distribución Log normal Truncada <i>Media=7.758 Kbyte</i> <i>DesvEst=60.16 Kbyte</i> <i>Max=2 Mbyte</i>
Tiempo de Lectura	Distribución Exponencial <i>Media=180 s</i>

### **V.3. Mecanismos de Calendarización Simulados**

Para la parte correspondiente al módulo Calendarizador del sistema WiMAX, se realizó una función en MATLAB en la que se incluyó el algoritmo propuesto; el cálculo de la función de prioridad y todos sus elementos tal y como se describen en el capítulo IV es ejecutada previo a cada nueva asignación. Adicional a esto, y con la finalidad de poder realizar una comparativa del desempeño de nuestra propuesta se desarrollaron dos nuevas funciones correspondientes a otros esquemas de calendarización.

La primera función es la correspondiente al algoritmo de Máxima suma de Tasa es un algoritmo denominado de objetivo específico, que como su nombre lo menciona, está enfocado a maximizar la tasa de transmisión. También se eligió simular el algoritmo Round Robin Ponderado ya que en la literatura analizada sobre sistemas WiMAX este esquema de calendarización se toma recurrentemente como la política que define la asignación de los recursos.

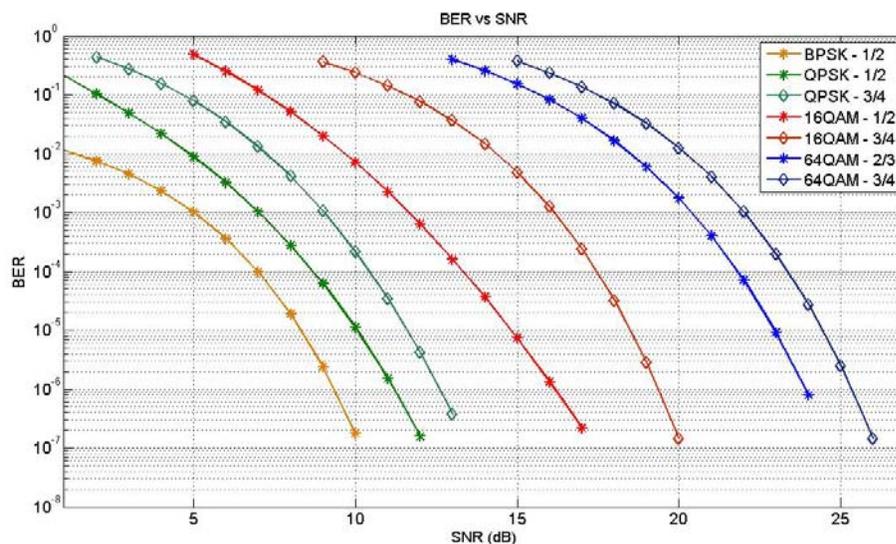
### **V.4. Simulación de Codificación del Canal y Modulación**

Como se mencionó en el capítulo II, WiMAX permite adaptar el esquema de modulación y la tasa de codificación en respuesta a las condiciones de canal que presenten los enlaces. Para la parte de la modulación en el estándar IEEE 802.16e se establece el uso de los diagramas de constelación correspondientes a BPSK, QPSK, 16 QAM y 64 QAM. En cuanto a la codificación, se utiliza un codificador convolucional de tasa de codificación nativa de  $1/2$ , además mediante la técnica de ponchado (puncturing) se alcanzan tasas de  $2/3$  y  $3/4$ . WiMAX permite 7 perfiles de transmisión (combinación de esquema de modulación y tasa de codificación) mostrados en la tabla IX. [IEEE 802.16e. 2006].

**Tabla IX. Perfiles de Transmisión en WiMAX**

Esquema de Modulación	Tasa de Codificación
BPSK	$1/2$
QPSK	$1/2$
	$3/4$
16 QAM	$1/2$
	$3/4$
64 QAM	$2/3$
	$3/4$

Es necesario obtener los valores límite de SNR (Relación Señal a Ruido) para cada uno de los perfiles de transmisión que permiten mantener un nivel de BER (Tasa de Error de Bit) menor a  $10^{-6}$ . Utilizando un canal Rayleigh con multitrayectorias y desvanecimientos selectivos en frecuencia en el sistema WiMAX simulado; se incrementó gradualmente el nivel de SNR desde 0 dB hasta 26 dB; midiendo la tasa de error de bit en la parte del receptor se obtuvieron los resultados mostrados en la figura 10.



**Figura 10. SNR vs BER**

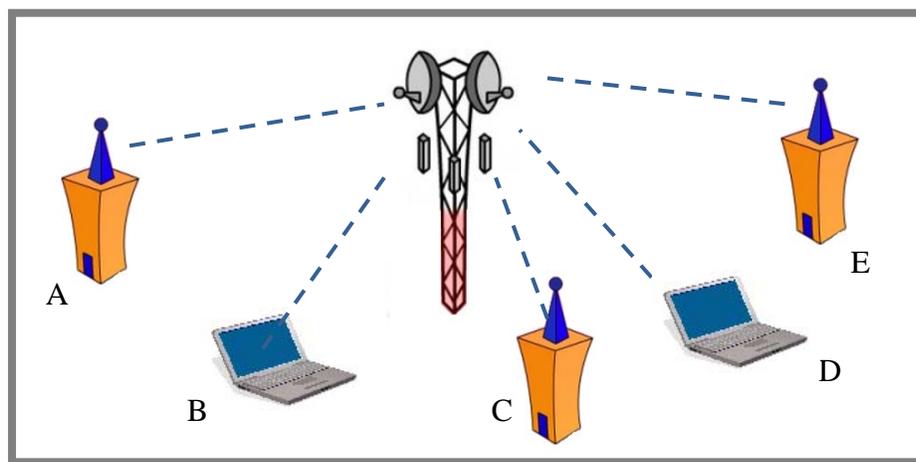
En la figura 10 se observa una grafica de SNR contra BER para cada uno de los perfiles de transmisión listados en la tabla IX, los valores de SNR permitidos para cada uno se listan en la tabla X:

**Tabla X. Límites SNR recibido.**

Esquema de Modulación	Tasa de Codificación	SNR (dB)
BPSK	$1/2$	9.33
QPSK	$1/2$	11.18
	$3/4$	12.59
16 QAM	$1/2$	16.16
	$3/4$	19.34
64 QAM	$2/3$	23.89
	$3/4$	25.31

## V.5. Escenario de Simulación

El escenario de simulación utilizado para la evaluación del Calendarizador propuesto es un sistema Punto a Multipunto con tecnología WiMAX, particularmente lo establecido en el estándar IEEE 802.16e. Consta de una estación base y 5 estaciones suscriptoras vinculadas a ella (representado en la figura 11).



**Figura 11. Escenario de Simulación**

Cada una de las 5 estaciones suscriptoras presenta diferentes condiciones de canal de manera que utilizan diferentes perfiles de transmisión, como se muestra en la tabla XI.

**Tabla XI. Estación Suscriptora – Perfil de Transmisión.**

Estación suscriptora	SNR (dB)	Modulación / Codificación
A	13	QPSK - $3/4$
B	17	16 QAM - $1/2$
C	20	16 QAM - $3/4$
D	24	64 QAM - $2/3$
E	26	64 QAM - $3/4$

Para todos los enlaces de las estaciones suscriptoras se mantiene inicialmente un mínimo de una conexión por cada tipo de tráfico, posteriormente se agregan nuevas conexiones según se requiera para incrementar el flujo de tráfico de algún tipo de servicio en particular o del sistema global.

El sistema WiMAX simulado utiliza el esquema de transmisión TDD para el enlace de bajada y el de subida; formando tramas de 48 símbolos OFDM de duración de 5 ms. Se utiliza una relación 2:1 para el enlace de bajada y subida, es decir, para cada trama 32 símbolos OFDM corresponden al enlace de bajada y los 16 restantes al enlace de subida. Cada símbolo generado por una Transformada Rápida de Fourier (FFT) de tamaño de 1024, por lo que cada símbolo OFDM contiene 1024 subportadoras distribuidas utilizando una permutación PUSC (Partially Used Sub-Channel), descrita en el anexo A, la cual agrupa las 1024 subportadoras en 30 subcanales. Estos parámetros previamente mencionados y algunos adicionales son presentados en la tabla XII [Jain, 2008].

**Tabla XII. Parámetros adicionales de Simulación**

<b>Configuración de la Red</b>	
Arquitectura	Punto a Multipunto
Ancho de Banda	10 MHz
Interfaz Aérea	OFDMA
Duplexación	Tramas TDD
Duración de Trama	5 ms
Símbolos por Trama	48
Relación DL:UL	2:1 (32:16 símbolos)
Tamaño de FFT	1024 puntos (1024 subportadoras/símbolo)
Permutación DL	PUSC (subcanales de 24 subportadoras)
Subportadoras/Símbolo	720 – Datos 120 - Pilotos 184 – Nulas
Subcanales DL	30 subcanales/símbolo
Duración Símbolo OFDM	91.43 $\mu$ s (102,86 $\mu$ s con CP*)

\*CP. Prefijo Cíclico (Anexo A.1.3.1.).

# Capítulo VI

---

## Resultados

---

### VI.1. Introducción.

En este capítulo se presentan los resultados del desempeño de la nueva propuesta de calendarización obtenidos bajo el escenario de simulación planteado en el capítulo anterior. Inicialmente se definen los parámetros o métricas de desempeño que proveen la información necesaria para evaluar el módulo de calendarización propuesto. Enseguida se muestran gráficas de los resultados de estos parámetros obtenidos del sistema WiMAX a nivel global y de algunos tipos de servicio por separado.

### VI.2. Métricas de Desempeño

El nivel de calidad de servicio puede ser parametrizado de muchas maneras diferentes, incluyendo parámetros como throughput y retardo que presenta el sistema. En un sistema WiMAX que presenta tráfico con diferentes niveles de calidad de servicio, implica compensaciones diferentes entre las garantías de calidad de servicio y utilización de recursos. En los puntos siguientes se definen las métricas que permiten calcular el comportamiento del esquema propuesto en el capítulo IV. Se muestran parámetros de Calidad de Servicio relevantes para aplicaciones multimedia e indicadores de funcionamiento del algoritmo de calendarización.

### VI.2.1 Throughput.

La palabra throughput es utilizada para describir la capacidad de la red para transmitir información durante un periodo de tiempo determinado [Shin, 2004]. El throughput es la tasa promedio de éxito de entrega de información al receptor a través de un canal de comunicación. Este parámetro es medido en bits por segundo. En general un throughput elevado resulta en mejores condiciones para la Calidad de Servicio, por lo que uno de los parámetros a considerar es el throughput global que presenta el sistema con cada uno de los calendarizadores y particularmente con el propuesto en el presente trabajo de tesis.

$$Throughput_{global} = \frac{\sum_{\forall k|k \in \beta} Rd_k}{t} \quad (16)$$

Donde  $Rd_k$  representa la cantidad de información que las conexiones del servicio  $k$  transmitieron con éxito,  $\beta$  es el conjunto de tipos de servicio (UGS, ertPS, rtPS, nrtPS y BE) y  $t$  es el tiempo de simulación evaluado.

Sin embargo, el throughput global no siempre es apropiado considerarlo como un parámetro de calidad de servicio, por ejemplo en aplicaciones de video se genera tráfico variable que cambia sus requerimientos drásticamente en el tiempo. Por ello se considera también el throughput particular para el tipo de tráfico en el que tiene mayor relevancia, el tráfico nrtPS calculado de forma muy similar al anterior.

$$Throughput_k = \frac{Rd_k}{t} \quad (17)$$

### VI.2.2. Retardo.

Como se ha venido mencionando, en un sistema WiMAX el tráfico que se maneja es tráfico multimedia, por lo que los límites del retardo permitido varían de una aplicación a otra. Las

aplicaciones en tiempo real requieren que la información sea entregada del transmisor al receptor en un tiempo determinado. Por ejemplo, en aplicaciones interactivas de audio en tiempo real (VoIP) es necesario tener retardo extremo a extremo menor a los 150 ms para no ser detectado por el oído humano, aunque puede aceptar retardos de hasta 400 ms conservando la interactividad de la conversación.

El retardo extremo a extremo está formado por diversas fuentes de retardo que se van agregando a través de la serie de componentes que interconectan la fuente de la información con el destino. Para el análisis del retardo de las diferentes clases de tráfico se establecieron valores límite de retardo distintos para cada uno de los tipos de servicios que deben de mantenerse particularmente en el sistema WiMAX (de última milla), es decir, los valores permitidos de retardo hasta que la estación base realice las asignaciones necesarias para transferir la información a las diferentes estaciones suscriptoras. Los valores límite considerados son: para el tráfico UGS y ertPS 10 ms y para el tráfico rtPS de 50 ms de acuerdo a [Rath, 2006].

### VI.2.3. Índice de Equidad de Jain.

La equidad es un criterio de desempeño importante en los esquemas de asignación de recursos, como los esquemas de calendarización. Para medir el nivel de justicia que presenta el esquema propuesto se utiliza una métrica cuantitativa denominada *índice de equidad de Jain* basado en Throughput [Jain, 1984]. Este índice siempre tomará valores entre 0 y 1, esto permite un entendimiento intuitivo de los índices de equidad. Por ejemplo, si se presenta un índice de equidad de 0.1, indica que sería un sistema injusto para el 90% de los usuarios. Este índice es calculado mediante la ecuación:

$$Equidad = \frac{\left(\sum_{i=1}^n T_i\right)^2}{n\left(\sum_{i=1}^n T_i^2\right)} \quad (18)$$

Donde  $T_i$  es el throughput alcanzado por la estación suscriptora  $i$ . Este índice toma valores entre  $1/n$  para el peor de los casos y 1 para el mejor de los casos (sistema totalmente equitativo).

### **VI.3. Resultados de Desempeño Obtenidos.**

En esta sección se presentan los resultados de las simulaciones. En primera instancia se evaluó el desempeño global del sistema WiMAX, para esto se propusieron dos escenarios de simulación:

- Se varió la carga de tráfico de todas las conexiones y se observaron los niveles de throughput que la red WiMAX alcanzó.
- Se varió la carga de tráfico de todas las conexiones y se observaron los valores del índice de equidad entre las estaciones suscriptoras.

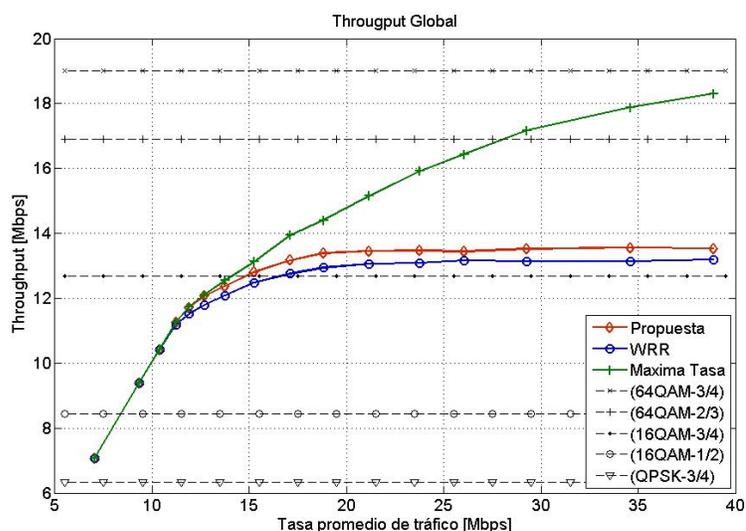
Posteriormente para obtener el desempeño particular para los distintos tipos de servicios se plantearon cuatro escenarios de simulación:

- Se varió la carga de tráfico generado por las conexiones nrtPS y observando el throughput alcanzado por este tipo de tráfico.
- Se varió la carga de tráfico generado por las conexiones UGS y observándose el retardo de este tráfico para cada uno de los perfiles de transmisión presentes.
- Se varió la carga de tráfico generado por las conexiones rtPS y se observó el retardo de este tráfico para cada uno de los perfiles de transmisión presentes.
- Se varió la carga de tráfico generado por las conexiones ertPS y se observó el retardo de este tráfico para cada uno de los perfiles de transmisión presentes.

### VI.3.1. Desempeño Global

Tal como se comentó, con la finalidad de conocer el desempeño global de la red WiMAX se simularon dos escenarios: en el primer escenario (variando la carga de tráfico de todas las conexiones y se observaron los niveles de throughput que la red WiMAX) se evalúa el throughput total que la red WiMAX presenta a medida que se incrementa la carga de tráfico. Es importante mencionar, que en todo momento, el sistema simulado presenta conexiones con los cinco perfiles de transmisión considerados. Para este escenario el aumento de la carga de tráfico se realizó de manera uniforme en cada uno de los flujos de tráfico generado para las conexiones correspondientes a cada perfil de transmisión.

En la figura 12, se muestran los resultados obtenidos por cada uno de los esquemas de calendarización bajo análisis, adicionalmente se muestran en línea punteada los valores teóricos que se alcanzarían para el caso de utilizar un solo perfil de transmisión (esquema de modulación digital y tasa de codificación). En la gráfica puede observarse que el esquema de Máxima Tasa ofrece mayor throughput a medida que la carga de tráfico se incrementa, superando ligeramente los 18 Mbps para el caso de mayor saturación simulado. Por su parte, el esquema de calendarización propuesto supera ligeramente al algoritmo Round Robin Ponderado, alcanzando valores cercanos a los 14 Mbps de throughput.



**Figura 12. Gráfica Throughput Global**

## VI.3.2. Índice de Equidad basado en Throughput

El segundo escenario de la evaluación del desempeño a nivel global se refiere al comportamiento del índice de equidad de Jain con respecto al throughput cuando se varia el tráfico en cada una de las conexiones, es decir, se analiza la justicia con la que el calendarizador realiza las asignaciones del ancho de banda disponible a las diferentes estaciones suscriptoras.

En la figura 13 se muestra la grafica del cálculo de índice de equidad de Jain, descrito en el inicio del presente capítulo, para cuantificar la equidad que presentan los calendarizadores entre los diferentes perfiles de transmisión. En contraste con la grafica del throughput (figura 12) tanto el esquema propuesto como el Round Robin Ponderado presentan mejor desempeño en cuanto al índice de equidad alcanzado valores cercanos a 0.9, siendo el de Máxima Tasa el que ofrece un trato más injusto ya que alcanza valores de 0.5 de índice de equidad. Cuando se incrementa la carga de tráfico en el Calendarizador de Máxima Tasa se presenta una caída drástica del valor de equidad esto es debido a que las conexiones con mejores condiciones, con perfiles de transmisión más altos acaparan los recursos disponibles, dejando relegadas las conexiones con esquemas de modulación y tasas de codificación menores.

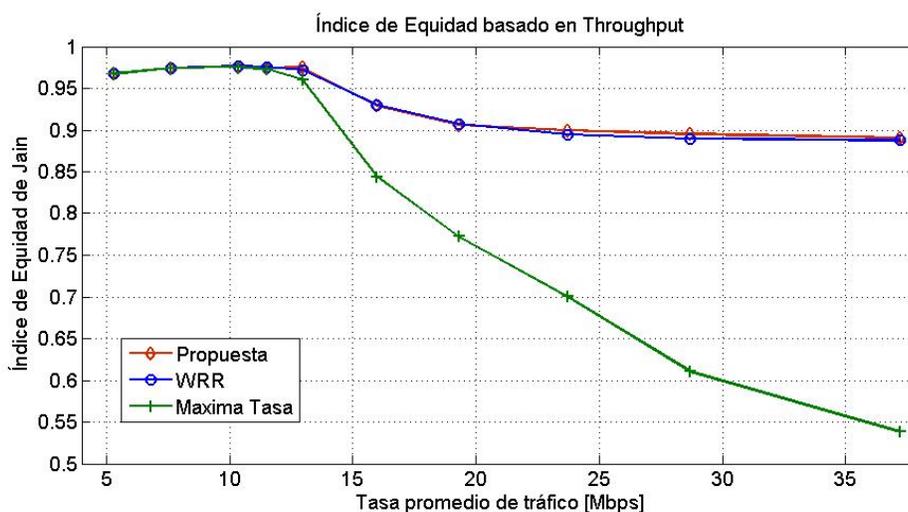


Figura 13. Gráfica Índice de Equidad basado en Throughput

### VI.3.3. Desempeño Particular por Tipo de Tráfico

Con la finalidad de conocer el comportamiento particular de los distintos tipos de tráfico en redes WiMAX se diseñaron escenarios para cada tipo de tráfico donde la estrategia fue incrementar la carga de tráfico y observar el comportamiento de los parámetros críticos de calidad de servicio para cada tipo de tráfico.

#### VI.3.3.1 Desempeño de Tráfico nrtPS

A continuación se presentan los valores de throughput alcanzado por el tráfico nrtPS en función de la carga de tráfico generado por las conexiones de este tipo de servicio. Se varió la carga generada por las aplicaciones de tipo nrtPS, siempre manteniendo tráfico adicional de las clases de servicios restantes.

En la gráfica 15 se observa que a medida que se incrementa la tasa de tráfico generado por los servicios nrtPS se incrementa el throughput. Para el algoritmo de Round Robin Ponderado el crecimiento se presenta de manera suave hasta lograr entre 3 y 3.5 Mbps en su valor máximo, mientras que el esquema de Tasa Máxima supera al Round robin Ponderado con aproximadamente 4 Mbps. Para este tipo de tráfico el Calendarizador propuesto es el que presenta mejores resultados de desempeño de la red WiMAX, superando los 4 Mbps, por lo que se considera como el algoritmo que tiene mayor capacidad para manejar el flujo de tráfico nrtPS.

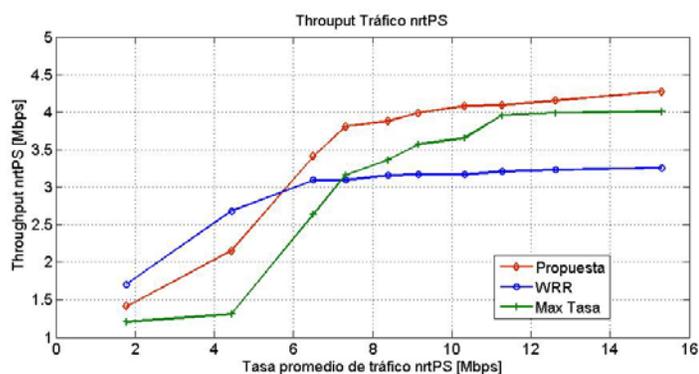
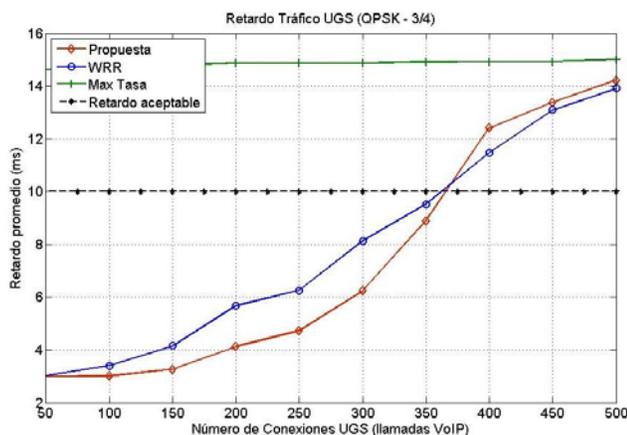


Figura 14. Gráfica Tráfico nrtPS

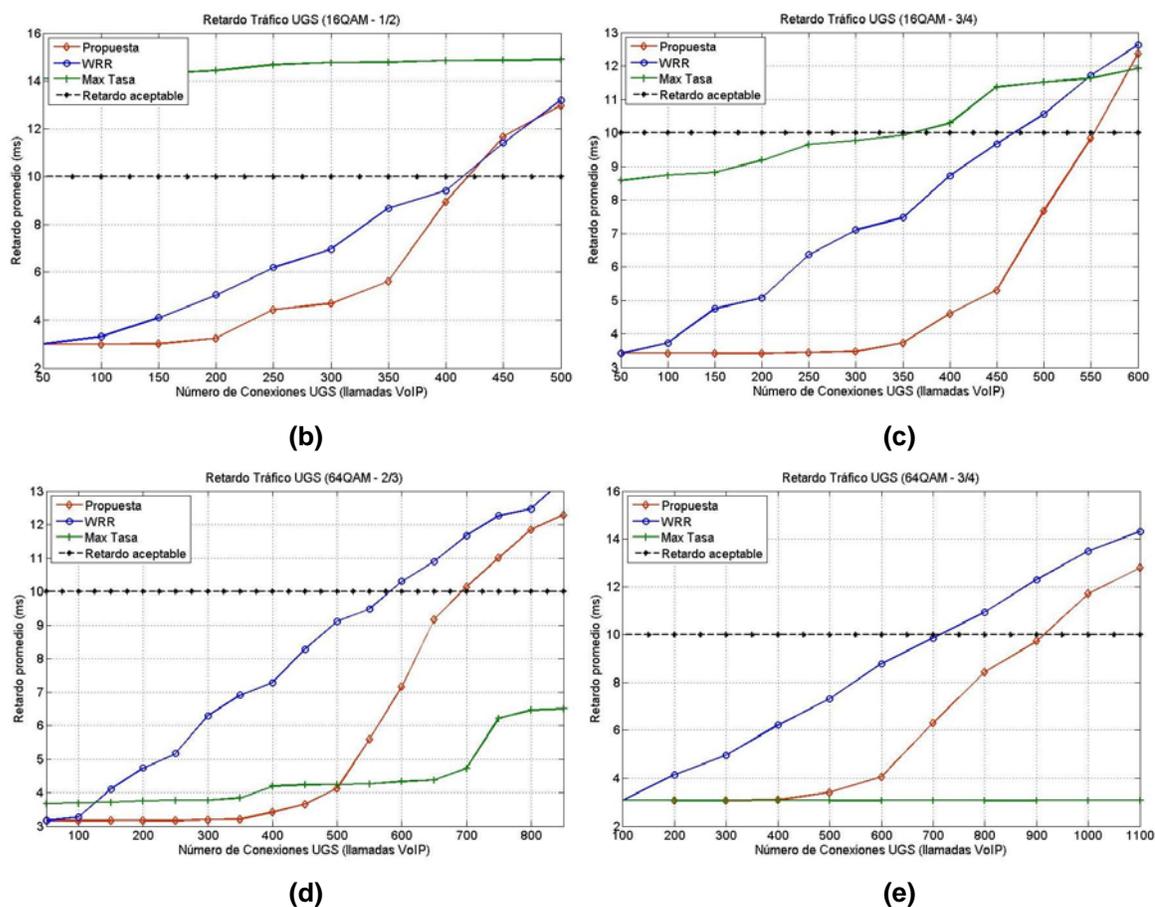
### VI.3.3.2. Desempeño de Tráfico UGS

Los resultados del desempeño del tráfico UGS en una red WiMAX se presentan en función del retardo que presentan las conexiones que pertenecen a este tipo de servicio para los diferentes perfiles de transmisión utilizados. Se varió el número de conexiones de aplicaciones de tipo UGS siempre manteniendo tráfico adicional de las clases de servicios restantes.

En la figura 15 además de las gráficas resultantes de cada uno de los calendarizadores se muestra con línea punteada el límite de retardo permitido para el tráfico UGS planteado en el punto IV.2.2. La grafica (a) corresponde al retardo que presenta el tráfico UGS transmitido utilizando un esquema de modulación QPSK con tasa de codificación 3/4. Se observa que el algoritmo de calendarización propuesto alcanza niveles de retardo aceptables hasta una carga de alrededor de 360 conexiones. Los resultados observados para retardo utilizando el algoritmo Round Robin ponderado bajo las mismas condiciones muestran que el límite de retardo aceptable se encuentra prácticamente en los mismos valores que nuestra propuesta, a rededor de las 360 o 370 conexiones. Por su parte los resultados para el algoritmo de Máxima Tasa muestran que no tiene la capacidad de garantizar las condiciones de retardo necesarias para este tipo de tráfico, presentando en todo momento un retardo de asignación mayor a los 10 ms.



(a)



**Figura 15. Gráficas tráfico UGS**

En las gráficas de la figura 15 también se muestra el comportamiento del retardo ponderado en función del número de conexiones cuando se utiliza el esquema de modulación de 16QAM y de 64QAM. En los incisos (b) y (c) se muestran los resultados correspondientes a una tasa de codificación 1/2 y 3/4 respectivamente con 16 QAM. En ambos casos el algoritmo de Máxima Tasa presenta el peor desempeño (mayor retardo con menor número de conexiones) donde para una tasa de codificación de 1/2 no es capaz de garantizar las condiciones de retardo para un buen desempeño (al igual que con el esquema de modulación QPSK) para el tráfico UGS.

El algoritmo que se propone en este trabajo de tesis soporta alrededor de entre 410 y 420 conexiones manteniendo niveles de retardo aceptables (debajo de los 10 ms). En los resultados correspondientes al esquema WRR se observa una mínima diferencia en el

número de conexiones soportadas con respecto a nuestra propuesta. Para este algoritmo se observa que sigue teniendo un incremento en el número de conexiones que soporta, sin embargo es menor comparado con el crecimiento que presenta nuestra propuesta.

En la gráfica del inciso (c) se considera la tasa de codificación de  $3/4$  donde se aprecian cambios más notorios en los resultados de los 3 modelos de calendarización analizados. El algoritmo de Máxima Tasa presenta una reducción importante en sus valores de retardo, permitiendo gestionar alrededor de 350 llamadas con las garantías de desempeño necesarias. Por su parte el esquema propuesto soporta alrededor de las 550 conexiones resultando el mejor de los esquemas analizados.

Finalmente en (d) y (e) se grafican los resultados del retardo que presenta el tráfico UGS utilizando el mayor esquema de modulación especificado por WiMAX, 64QAM con tasa de codificación  $2/3$  y  $3/4$  respectivamente. En ambas gráficas, conservando el criterio de observar el desempeño por debajo de los 10 ms de retardo, se tiene el comportamiento siguiente: El esquema de máxima tasa presenta un desempeño mucho mejor que cuando se utiliza 16QAM, mientras que, tanto WRR como el esquema de calendarización propuesto siguen la misma tendencia que venían presentando, incrementando el número de conexiones que pueden manejar para WRR manteniéndose por debajo con 600 y 700 conexiones para tasa de  $2/3$  y  $3/4$  respectivamente y para el algoritmo propuesto se alcanzan las 700 conexiones usando tasa de codificación  $2/3$  y alrededor de 900 para el perfil de transmisión mayor.

### **VI.3.3.3 Desempeño para Tráfico rtPS**

De manera similar a los resultados presentados para tráfico UGS se presentan los resultados del parámetro de desempeño de retardo ponderado (debajo del límite umbral de 50 ms) versus número de conexiones alcanzadas para las aplicaciones rtPS, observando dicho comportamiento para esquemas de modulación QPSK, 16 QAM y 64 QAM variando los índices de codificación.

Es decir, se analiza el retardo que presentan las conexiones que pertenecen a este tipo de servicio para los diferentes perfiles de transmisión variando el número de conexiones de aplicaciones de tipo rtPS (Fuente de tráfico de video descrita en el capítulo V) siempre manteniendo tráfico adicional de las clases de servicios restantes.

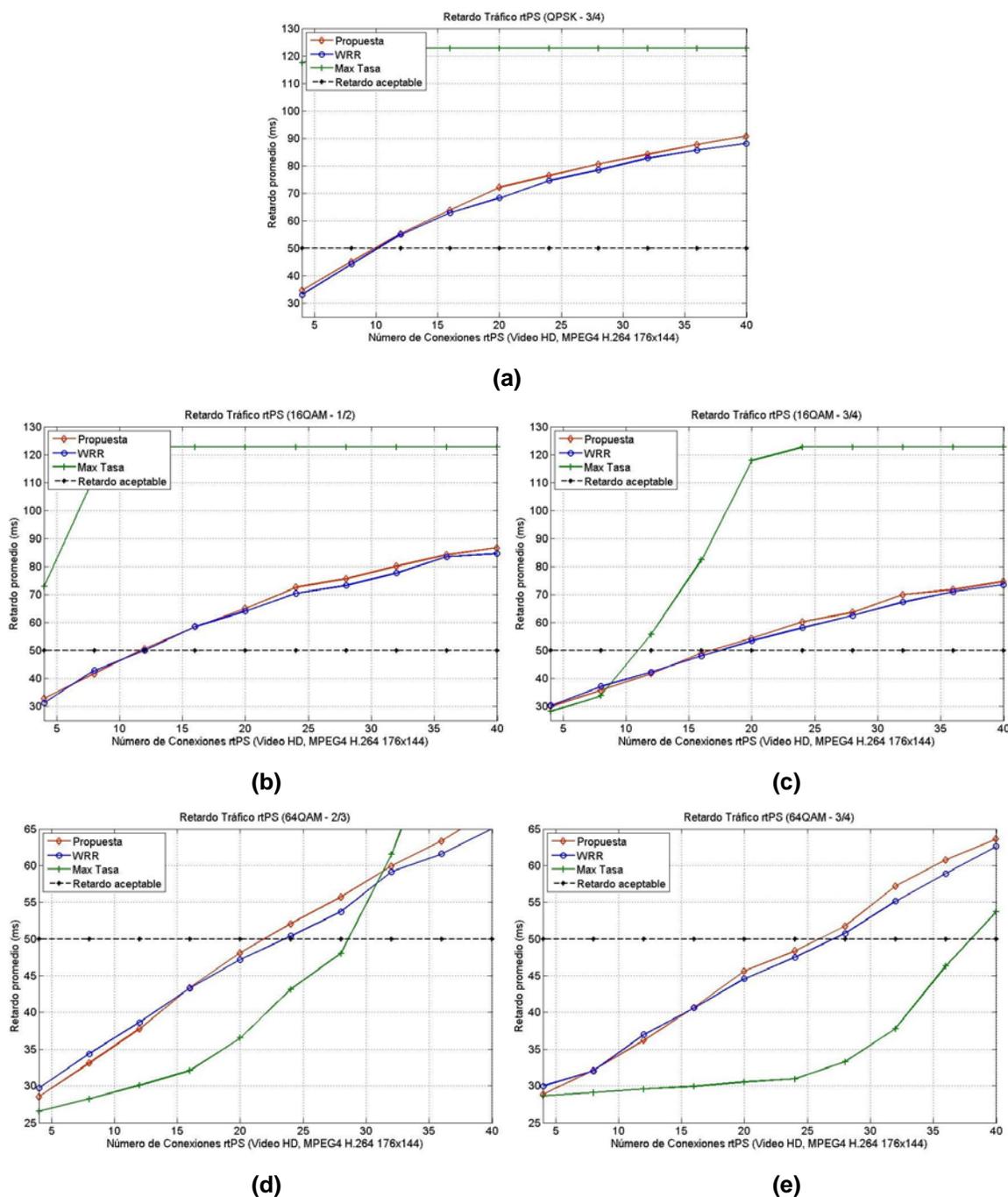


Figura 16. Gráficas Tráfico rtPS

Se muestra en línea punteada el límite de retardo permitido para el tráfico rtPS planteado en el punto IV.2.2 (50 ms). En la gráfica (a) se observa el retardo que presenta el tráfico rtPS transmitido utilizando un esquema de modulación QPSK con tasa de codificación  $3/4$ . Se observa que tanto para el algoritmo de calendarización Round Robin ponderado (WRR) como para el algoritmo propuesto solo es posible alcanzar alrededor de 10 conexiones de video antes de llegar al límite de retardo permitido. Los resultados del algoritmo de Máxima Tasa muestran que en ningún momento se tiene la capacidad de conexiones con la garantía de desempeño que marca el estándar de un retardo menor a los 50 ms.

Utilizando un esquema de modulación 16QAM con tasa de codificación  $1/2$  y  $3/4$  respectivamente se observa en las graficas (b) y (c) de la figura 16 el retardo que presenta el tráfico rtPS transmitido. En la gráfica inciso (b) el desempeño de WRR y del algoritmo propuesto soporta alrededor de 12 conexiones. El algoritmo de Máxima Tasa con ese perfil de transmisión (16QAM,  $1/2$ ) no es capaz de garantizar las condiciones necesarias de retardo para un buen desempeño de este tipo de tráfico.

En la gráfica inciso (c) de igual forma tanto WRR como nuestra propuesta soporta alrededor de 17 sesiones de video. Por su parte el algoritmo Máxima Tasa presenta una reducción importante en sus valores de retardo, permitiendo ya operar alrededor de 11 conexiones con las garantías necesarias, es importante resaltar que aumentar la tasa de codificación a  $3/4$  permite ya tener conexiones de video.

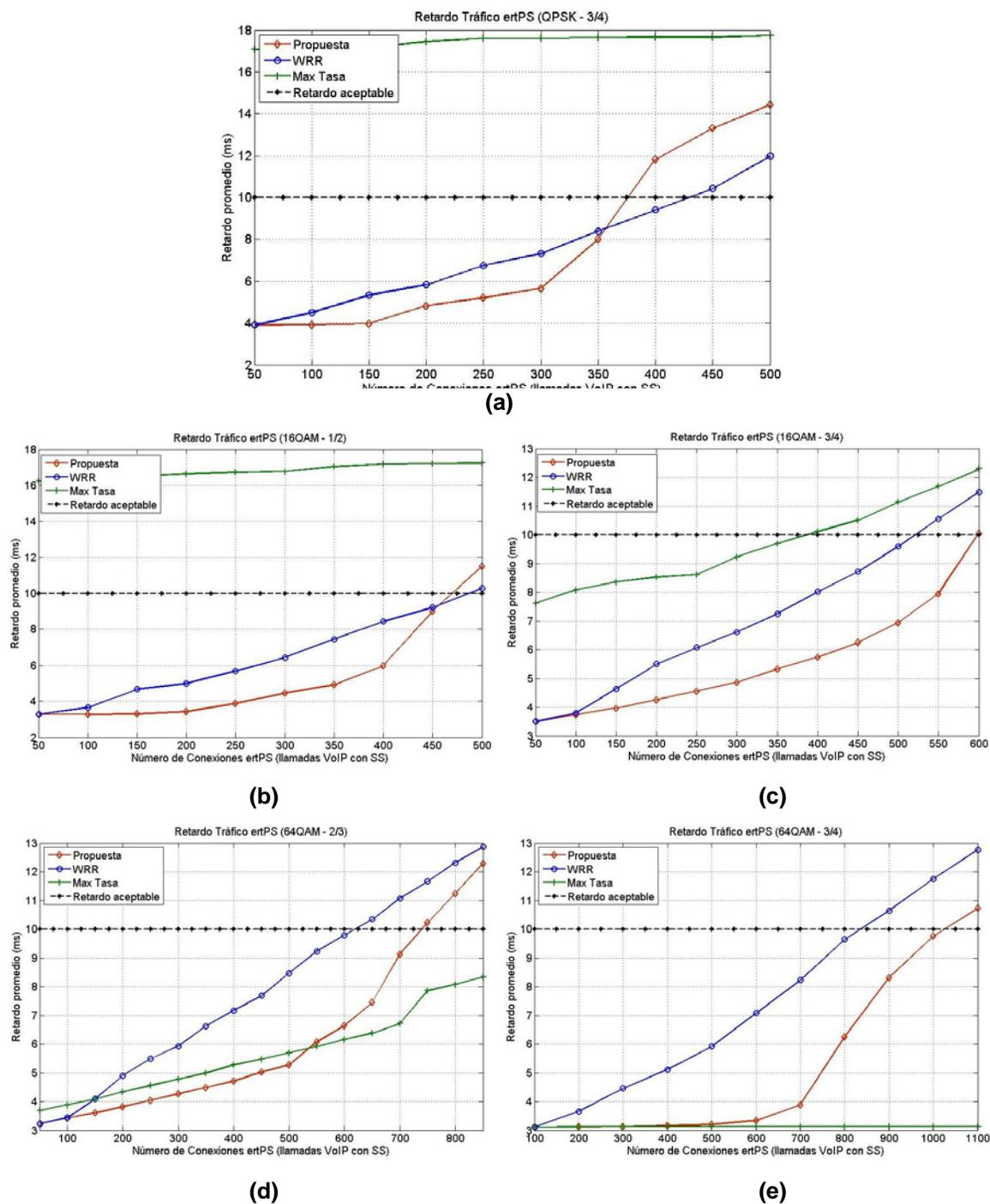
Por último se analizan los resultados para el esquema de modulación 64QAM en (d) y (e), el Calendarizador propuesto y el algoritmo WRR siguen el mismo comportamiento, incrementando el número de conexiones que pueden manejar bajo el umbral de retardo alrededor de 23 conexiones de video con una tasa de codificación de  $2/3$  y 27 conexiones para el caso de tasa de codificación  $3/4$ . Como era de esperarse para el esquema de modulación de mayor nivel el algoritmo de máxima tasa observamos que presenta un desempeño mucho mejor alcanzando los 28 para tasa  $2/3$  y alrededor de 38 para el perfil de transmisión mayor.

Por último en las gráficas (d) y (e) de la figura 16 se analizan los resultados para el esquema de modulación 64QAM. Es posible observar que tanto el Calendarizador propuesto como el algoritmo WRR siguen el mismo comportamiento que para el caso de 16QAM, incrementando el número de conexiones que pueden manejar bajo el umbral de retardo consiguiendo tener alrededor de 23 conexiones de video con una tasa de codificación de  $2/3$  y 27 conexiones para el caso de tasa de codificación  $3/4$ . Como era de esperarse para el esquema de modulación de mayor nivel el algoritmo de máxima tasa observamos que presenta un desempeño mucho mejor alcanzando los 28 para tasa  $2/3$  y alrededor de 38 para el perfil de transmisión mayor.

#### **VI.3.3.4. Desempeño de Tráfico ertPS**

Finalmente se presentan los resultados de retardo ponderado en relación al número de conexiones que se pueden realizar, estos resultados obtenidos para el tráfico ertPS (VoIP con supresión de silencios) bajo el escenario parecido a los anteriores, es decir, incrementando el número de conexiones de canales VoIP y manteniendo tráfico adicional de las clases de servicios restantes. Se considera el umbral de retardo correspondiente para este tipo de tráfico.

Al utilizar un perfil de transmisión de modulación QPSK y tasa de codificación  $3/4$  en en la gráfica (a) de la figura 17, se observa que el algoritmo de Máxima Tasa que no tiene la capacidad de garantizar las condiciones de retardo requeridas por este tipo de tráfico para ser considerada con desempeño aceptable. El algoritmo de calendarización propuesto en este trabajo de tesis alcanza niveles de retardo por debajo del umbral y permite hasta 380 conexiones. El algoritmo Round Robin ponderado permite establecer alrededor de 420 conexiones superando ligeramente al algoritmo propuesto.



**Figura 17. Gráficas Tráfico ertPS**

Cuando se utiliza esquema de modulación 16QAM para diferentes tasas de codificación es posible observar cómo se incrementa el número de conexiones de tráfico

ertPS, Las gráficas (b) y (c) de la figura 17 muestran como la propuesta de algoritmo presentada permite alcanzar alrededor de 470 conexiones para una tasa  $1/2$  y hasta 600 para tasa de codificación  $3/4$ . Por su parte el esquema WRR, ver gráfica (b) de la misma figura muestra como WRR supera ligeramente la propuesta alcanzando 500 conexiones con la tasa decodificación de  $1/2$ , sin embargo al cambiar la tasa a  $3/4$  ver gráfica (c) solo permite alcanzar hasta un máximo de 530 conexiones. El algoritmo de Máxima Tasa para el escenario de 16QAM y tasa decodificación de  $1/2$  no permite ninguna conexión. Al incrementar la tasa de codificación a  $3/4$  ya es posible manejar alrededor de 380 llamadas con un retardo menor a los 10 ms, tal como se observa en la gráfica (b).

Al transmitir tráfico ertPS utilizando un esquema de modulación 64QAM con tasas de codificación  $2/3$  y  $3/4$  respectivamente y de acuerdo con los resultados arrojados por el simulador, se observa que para el primer caso, ver gráfica (d), el esquema propuesto soporta alrededor de 750 conexiones manteniendo niveles de retardo por debajo del umbral. Para el esquema WRR al el número de conexiones soportadas es cercano a 600 con tasa de codificación de  $2/3$  y para el segundo caso en la gráfica (e) se observa el retardo que presenta el tráfico rtPS el algoritmo de nuestra propuesta supera considerablemente al algoritmo de calendarización WRR. Con 64QAM y tasa de codificación de 34 el algoritmo Máxima Tasa mantiene niveles de retardo siempre muy por debajo del límite umbral.

# Capítulo VII

---

## Conclusiones

---

### VII.1. Resumen

La tecnología WiMAX debido a sus características de operación se perfila como la tecnología inalámbrica a utilizarse para comunicaciones multimedia de banda ancha y enlaces conocidos como de “última milla”. En todo sistema de comunicación inalámbrica es imperante la óptima utilización de los canales de comunicación, parte importante para lograr transmitir tráfico multimedia en WiMAX es una eficiente técnica de calendarización.

A raíz del análisis de la tecnología WiMAX y debido a que no se establece en el estándar, el presente trabajo propone un nuevo esquema de calendarización que garantiza el logro de los requerimientos de calidad de servicio para aplicaciones multimedia y que ofrezca un óptimo desempeño de la red. Para la evaluación del algoritmo de calendarización propuesto, se diseñó el escenario de una red WIMAX y se simuló utilizando Matlab. Lo anterior permite cumplir con los objetivos planteados.

En los siguientes puntos se presentan las conclusiones y aportaciones, seguidas de algunas recomendaciones de posibles trabajos futuros.

### VII.2. Conclusiones

Del análisis de las versiones de estándares IEEE 802.16, se optó por desarrollar un esquema de calendarización para el estándar 802.16e en particular debido a que en éste se define el uso de una interfaz de capa física basada en OFDMA, la cual otorga mayor flexibilidad a los sistemas WiMAX.

En esta tesis se hizo un análisis de diferentes esquemas de calendarización de recursos, entre ellos el denominado Algoritmo de Equidad proporcional cuyo fundamento es tomado para el funcionamiento de la propuesta de calendarización aquí planteada. Se realizaron modificaciones pertinentes al Algoritmo de Equidad proporcional para poder garantizar que se cumplan los requerimientos de calidad de servicio, como throughput y retardo, específicos de cada aplicación. El algoritmo de equidad proporcional fue elegido debido a que además de ser sencillo de aplicar, se caracteriza por lograr un equilibrio práctico entre throughput y equidad, propiedades indispensables en sistemas de comunicaciones punto a multipunto con tráfico tan variado como el tráfico Multimedia.

En cuanto a los resultados globales que se obtuvieron, particularmente en la gráfica de la figura 12 mostrada en el capítulo VI en la que se midió el throughput global, se observa que el algoritmo de Máxima Tasa supera por cerca de 4 Mbps tanto al algoritmos Round Robin ponderado como al algoritmo propuesto, lo que indica que este es capaz de transportar mayor cantidad de información. Sin embargo en la siguiente gráfica de la figura 13 donde se obtuvo el nivel de justicia a la hora de repartir los recursos, el esquema Máxima Tasa ofreció un pobre desempeño, alcanzando los 0.5 puntos de índice de equidad de Jain lo que implica según lo especificado en [Jain, 1984], que se realiza una asignación injusta para el 50% de los usuarios.

Al comparar el esquema propuesto y el algoritmo Round Robin Ponderado, a nivel global se observa que la propuesta es superior obteniendo alrededor de 500 Kbps mas para el throughput; manteniendo valor equiparable del índice de equidad de Jain, ambos mantienen alrededor de 0.9 puntos de índice de equidad.

Al analizar los resultados por separado, para cada uno de los tipos de servicios se concluye que utilizar el Algoritmo de Calendarización Propuesto permite a un sistema WiMAX manejar un mayor número de sesiones de aplicaciones en Tiempo Real que los otros esquemas analizados, garantizando los requerimientos de retardo establecidos en [Rath, 2006]. Tanto para aplicaciones en tiempo real que generan paquetes de tamaño fijo (tráfico UGS) como para aplicaciones en tiempo real que cambian sus requerimientos con

el tiempo (tráfico ertPS), el esquema de calendarización propuesto es capaz de manejar alrededor de 200 sesiones más que el algoritmo Round Robin Ponderado con el mayor perfil de transmisión.

Además realiza asignaciones de ancho de banda de manera que ofrece mayor throughput (alrededor de 1 Mbps más que Round Robin y 300 Kbps más que Máxima Tasa) para las conexiones correspondientes a aplicaciones que no generan tráfico en tiempo real, lo que resulta en mejores condiciones para ofrecer calidad de servicio a un mayor número de usuarios optimizando el uso de los recursos disponibles.

### **VII.3. Aportaciones**

Se realizó la definición de una nueva función de prioridad para la asignación de recursos siguiendo el funcionamiento del algoritmo de Equidad Proporcional. Que constituye la base para proponer un nuevo esquema de calendarización para el manejo de tráfico multimedia en un sistema WiMAX. El Algoritmo de Calendarización Propuesto es capaz de cubrir el hueco que presenta el estándar IEEE 802.16e al no definir la política a seguir para la asignación de recursos de canal de transmisión.

### **VII.4. Recomendaciones y Trabajos futuros**

Se recomienda como trabajo futuro de investigación la realización de un análisis de desempeño del esquema propuesto, aplicado tanto para el enlace de subida, como para el enlace de bajada de un sistema WiMAX.

Además se recomienda efectuar un estudio a profundidad sobre el impacto de los valores de la constante de suavizamiento asignados para las diferentes clases de servicio, con la finalidad de lograr establecer una metodología analítica para encontrar los valores óptimos de la constante de suavizamiento a utilizar.

## Referencias

- Borin, J.F.; da Fonseca, N.L.S. 2008. Scheduler for IEEE 802.16 networks. *Communications Letters, IEEE*. 12 (4): 274 – 276 p.
- Chen, Jenhui. Wang, Chih-Chieh. Chang, Chiang-Wei. Lien, Wei-Jen. 2006. The design and implementation of WiMAX module for ns-2 simulator. *WNS2*. 202: 1-8 p.
- Chen, Yeong-Sheng. Geng, Der-Jiunn. Hsu, Yu-Ming. Wang, Sheng-De. 2009. An enhanced uplink scheduling algorithm for video traffic transmission in IEEE 802.16 BWA systems. *International Conference On Communications And Mobile Computing*. ACM. Leipzig, Alemania. 21-24 Junio. 1330-1334 p.
- Ganz, Aura. Ganz, Zvi. Wongthavarawat, Kitti. 2003. *Multimedia Wireless Networks: Technologies, Standards, and QoS*. Prentice Hall PTR. Primera edición. New Jersey. 352 pp.
- Guojun, Dong. Jufeng, Dai. 2007. Scheduling Algorithm for Multimedia Services in IEEE 802.16e OFDM system. *Transactions of Tianjin University*. 14 (1): 31-36 p.
- IEEE 802.16-2004. 2004. IEEE Standard for Local and metropolitan area networks - Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems. IEEE-SA Standards Board, New York. 841pp.
- IEEE 802.16e. 2006. IEEE Standard for Local and metropolitan area networks - Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems - Amendment 2: Physical and Medium Access Control Layers for Combined Fixed and Mobile Operation in Licensed Bands and Corrigendum 1. IEEE-SA Standards Board, New York. 822 pp.
- Jain, Raj. Ramadas, Krishna. 2008. *WiMAX System Evaluation Methodology*. WiMAX Forum. Version 2.1. 209 pp.
- Jain, R., Chiu, D.M., and Hawe, W. 1984. A Quantitative Measure of Fairness and Discrimination for Resource Allocation in Shared Systems. DEC Technical Report. DEC-TR-301.
- Jeffrey, G. A. Arunabha, G. y Rias M. 2007, *Fundamentals of WiMAX, Understanding Broadband Wireless Networking*, Prentice Hall, Primera edición. New Jersey. 449 pp.

- Lee, Howon. Kwon, Taesoo. Cho, Dong-Ho. 2005. An enhanced uplink scheduling algorithm based on voice activity for VoIP services in IEEE 802.16d/e system. *Communications Letters, IEEE*. 9: 691-693 p.
- Ma, Maode. 2009. *Current Technology Developments of WiMax Systems*. Springer. New York. 300 pp.
- Ordóñez Pinzón, Hermelinda. 2009. Departamento de Matemáticas y Estadística. Universidad Nacional de Colombia. Documento en línea Disponible en: [http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/sedes/manizales/4030006/lecciones/capitulocinc\\_o/5\\_2\\_3.html](http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/sedes/manizales/4030006/lecciones/capitulocinc_o/5_2_3.html). Consultado el: 10 de enero de 2010
- Piper, Ben. 2008. Broadband Subscriptions to Reach 415 Millions This Year. *BBP Build The Fiber-Connected Community*. 30(6). 11 p.
- Rath, H.K. Bhorkar, A. Vishal, Sharma. 2006. An Opportunistic Uplink Scheduling Scheme to Achieve Bandwidth Fairness and Delay for Multiclass Traffic in Wi-Max (IEEE 802.16) Broadband Wireless Networks. *GLOBECOM '06*. IEEE. San Francisco, California, USA. 27-30 Noviembre. 1-5 p.
- Schwartz, Mischa. 2005. *Mobile Wireless Communications*. Cambridge University Press. Primera Edición. Cambridge. 457 pp
- SCT, 2008, Coordinación de la Sociedad de la Información y del Conocimiento, Agenda de Conectividad. Impulso a la Conectividad Social Red Nacional de Educación e Investigación Redes Estatales de Educación, Salud y Gobierno. México. Documento en línea Disponible en: <http://www.sct.gob.mx/coordinacion-de-la-sociedad-de-la-informacion-y-el-conocimiento/>. Consultado el: 10 de enero de 2010
- Shin, Jitae., Lee, Daniel C., Jay Kuo, C.-C. 2004. *Quality of service for Internet multimedia*. Prentice Hall, Primera edición. New Jersey. 205 pp.
- Sjoberg, J., Westerlund, M., Lakaniemi, A., y Q. Xie. 2002. "Real Time Transport Protocol (RTP) Payload Format and File Storage Format for the Adaptive Multi-Rate (AMR) and Adaptive Multi-Rate Wideband (AMR-WB) Audio Codecs". RFC 3267. 49 pp.
- Vaniel, Fiona, 2009. *World Broadband Statistics Report - Q2 2009*. Point Topic Ltd. London. 26 pp.
- Wang, Hua. Dittmann, L. 2007. Adaptive Radio Resource Allocation in Hierarchical QoS Scheduling for IEEE 802.16 Systems. *GLOBECOM '07*. IEEE. Washington, DC, USA. 26-30 Noviembre. 4769-4774 p.

WiMAX Forum. 2009. WiMAX Deployments Go Global with 519 in 146 Countries. Press Release. Documento en línea Disponible en: <http://www.wimaxforum.org/news/2030>. Consultado el: 10 de enero de 2010

WiMAX Forum. 2009. WiMAX operators and vendors from around the world announce new deployments, growing commitment at the 2nd Annual WiMAX Forum Global Congress. Press Release. Documento en línea Disponible en: <http://www.wimaxforum.org/node/1161>. Consultado el: 10 de enero de 2010

WiMAX Forum. 2009. Member Roster. Documento en línea Disponible en: <http://www.wimaxforum.org/about/member-roster>. Consultado el: 10 de enero de 2010.

# ANEXOS

## Anexo A. Capa Física y Subcapa MAC de WiMAX

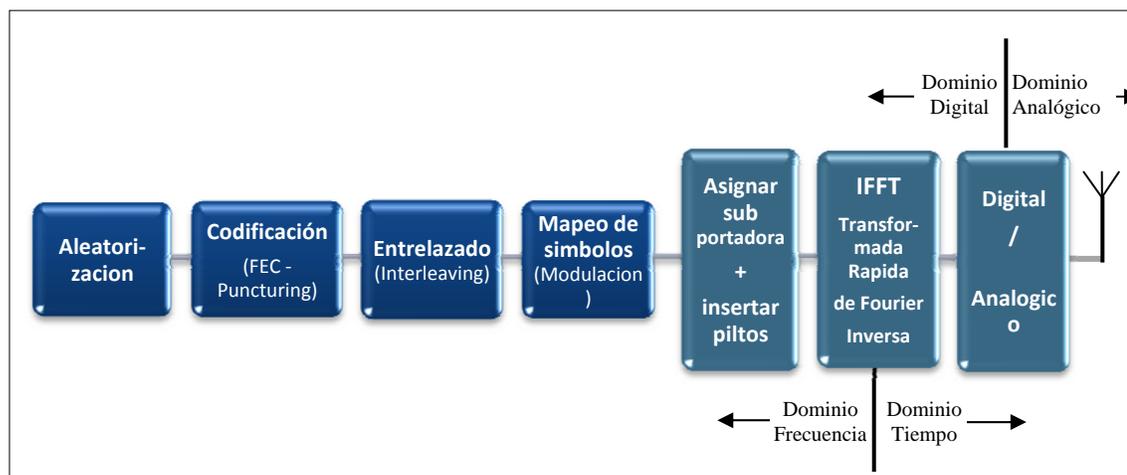
### A.1 Capa Física de WiMAX (PHY)

En el conjunto de estándares IEEE 802.16 se definen los parámetros correspondientes a la capa física, la cual establece la conexión física entre ambos lados, generalmente en ambos sentidos (enlace de bajada y de subida). La capa física es responsable por la transmisión de la secuencia de bits. Se define el tipo de señal utilizada, el tipo de modulación y demodulación, potencia de transmisión entre otras características físicas más. Las diferentes versiones del estándar desarrollados por el grupo IEEE 802.16 se definen cuatro diferentes perfiles de capa física:

- *WirelessMAN-SC*, capa física de portadora única definida para bandas de frecuencias de 11GHz o superiores, diseñada para trabajar en sistemas con condiciones de línea de vista. Estipulada en el primero de los estándares IEEE 802.16.
- *WirelessMAN-SCa*, es una nueva versión de la anterior, de las mismas características pero para trabajar en el rango de frecuencias de 2 a 11GHz
- *WirelessMAN-OFDM*, capa física basada en OFDM de 256 subportadoras especificada para trabajar en el rango de frecuencias entre 2 y 11 GHz, gracias a esto es capaz de trabajar con sistemas que no presenten condiciones de línea de vista. Los detalles de esta interfaz de capa física aparecen en el estándar IEEE 802.16d-2004, correspondiente al llamado WiMAX fijo.
- *WirelessMAN-OFDMA*, capa física basada en OFDMA con símbolos de 128, 512, 1,024, o 2,048 subportadoras para las frecuencias entre 2 y 11GHz. Al igual que *WirelessMAN-OFDM* tiene la capacidad de trabajar sin condiciones de línea de vista. Interfaz descrita en el estándar correspondiente a los perfiles de WiMAX móvil, IEEE 802.16e-2005.

Los cuatro diferentes perfiles de capa física listados anteriormente son los correspondientes a los grupos de estándares del grupo IEEE 802.16, de las cuales solo 2 son

las correspondientes a WiMAX las especificadas en los estándares 802.16d-2004 y 802.16e-2005, que son los que utilizan OFDM, WirelessMAN-OFDM para WiMAX fijo y WirelessMAN-OFDMA para WiMAX móvil. Enfocándonos en ellos podemos esquematizar los elementos de la capa física de WiMAX como se muestra en la figura 18.



**Figura 18. Capa Física de WiMAX**

Los primeros componentes corresponden a las funciones relacionadas con la codificación del canal; código corrector de errores, interlineado, mapeo de símbolos. Lo siguiente es lo concerniente a la construcción del símbolo OFDM en el dominio de la frecuencia. Aquí los datos son mapeados a las subportadoras correspondientes, al igual que las señales piloto que se insertan en las subportadoras correspondientes para poder estimar y rastrear la información del estado del canal. Al final se muestra la parte correspondiente a la conversión del símbolo OFDM del dominio de la frecuencia al dominio del tiempo y eventualmente a una señal análoga que pueda ser transmitida por el aire. En los puntos siguientes describimos cada uno de los componentes de la capa física como se definen en el estándar IEEE 802.16e-2005.

### **A.1.1. Codificación del Canal**

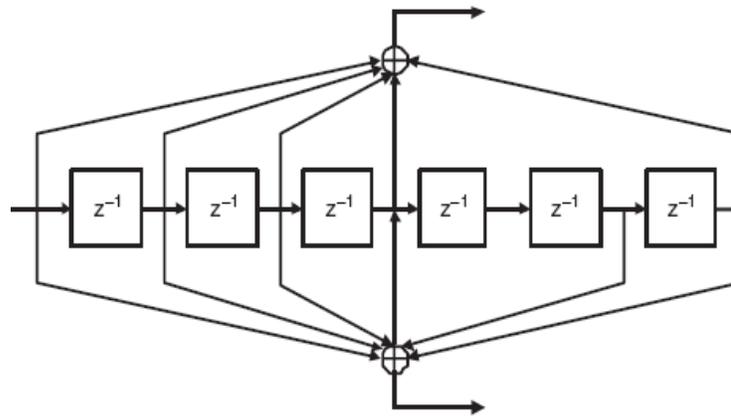
La codificación del canal podemos dividirla en 5 procesos: (1) *Aleatorización* de datos, se realiza tanto para el enlace de subida como para el de bajada, se utiliza una secuencia de bits para completar la longitud máxima de la entrada del codificador FEC, la cual se es

agregada al final de la cadena de bits de datos. Esto nos ofrece encriptación de capa 1 para prevenir que usuarios malintencionados decodifiquen los datos. (2) *Código corrector de errores*, el esquema de codificación obligatorio para el estándar IEEE 802.16e-2005 está basado en un Código Convolutivo binario no recursivo, aunque también se define el uso de técnicas de codificación más complejas como turbo códigos. (3) *Concordancia de tasa*, se busca la concordancia de la tasa de codificación deseada, utilizando *puncturing* o ponchado; técnica por la cual se pasa de un código de tasa 1/2 a otra tasa m/n suprimiendo unos bits a la salida del codificador de acuerdo a una matriz de perforación. (4) *HARQ*, como alternativa opcional el estándar IEEE 802.16e-2005 define mecanismo de retransmisión HARQ (hibrid Acknoegdmente Request) para solicitar retransmisiones de paquetes perdidos en caso de ser necesario. (5) *entrelazado*, técnica que consiste en organizar los bits de forma no contigua para proteger la información frente a errores que afecten bits contiguos.

Los 5 pasos que conforman la parte de la codificación del canal se realizan para cada *bloque FEC*, cada uno de los cuales consta de un número entero de subcanales. El número máximo de subcanales en un bloque FEC depende del esquema de codificación y modulación. Si se presenta el caso en que el número de subcanales requeridos para transmitir un bloque FEC es mayor que el máximo, el bloque es segmentado y cada uno de los subbloques es codificado por separado y posteriormente concatenados secuencialmente para formar un solo bloque de datos codificado, esta segmentación se realiza para reducir la complejidad y los requerimientos de memoria del algoritmo decodificador en el receptor.

#### **A.1.1.1 Código Corrector de Errores (FEC)**

El esquema de codificación obligatorio para la corrección de errores es un codificador convolutivo binario no recursivo de longitud límite de 7 y una tasa de codificación nativa de 1/2 como se muestra en la figura 19. Como se menciona para poder alcanzar la tasa de codificación deseada se utiliza la técnica de *puncturing*. En la tecnología WiMAX se utilizan, además de la tasa de codificación de 1/2, la de 2/3 y 3/4; alcanzadas mediante las matrices descritas en la tabla XIII.



**Figura 19. Codificador Convolutcional**

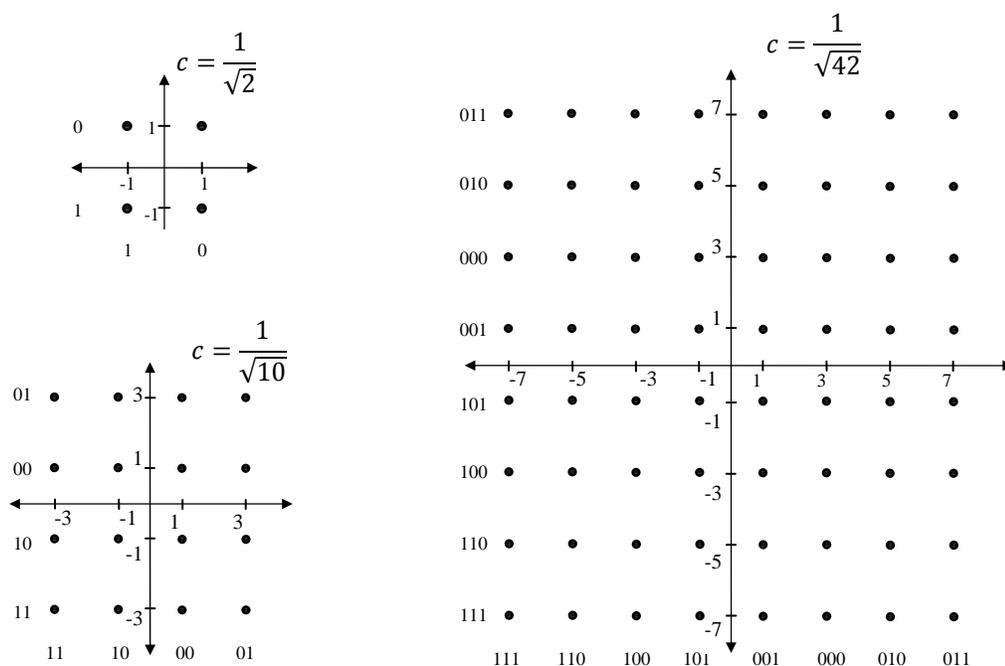
Para inicializar el codificador en cada bloque FEC, cuando utilizamos OFDM, la serie de bits de información es rellenada con 8 bits en cero al final. Si utilizamos OFDMA se utiliza el concepto conocido como “tailbiting” que implica copiar los 6 bits del final del bloque de datos al principio, en ambos casos estos bits agregados expulsan los bits que quedaron en el codificador por el bloque anterior.

**Tabla XIII. Ponchado - Puncturing**

<i>Tasa de Codificación</i>	<i>Matriz</i>
$\frac{1}{2}$	$\begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}$
$\frac{2}{3}$	$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$
$\frac{3}{4}$	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \end{bmatrix}$

### **A.1.2. Modulación.**

La cadena de bits codificados son ingresados en serie al modulador, en esta parte la secuencia de bits es convertida a una secuencia de símbolos de valor complejo, para lograrlo la cadena de bits es mapeada a un determinado diagrama de constelación según el esquema de modulación seleccionado.



**Figura 20. Diagramas de Constelación QPSK, 16QAM y 64QAM**

El estándar IEEE 802.16e-2005 define el uso de manera obligatoria de diagramas de constelación de QPSK y 16-QAM, y de manera opcional el esquema de modulación 64-QAM. Las constelaciones deberán de ser normalizadas multiplicando el punto de constelación con el factor  $c$  indicado para alcanzar una potencia promedio igual. En la figura 20 podemos observar los diagramas de constelación de los esquemas de modulación soportados por WiMAX con su respectivo factor  $c$ .

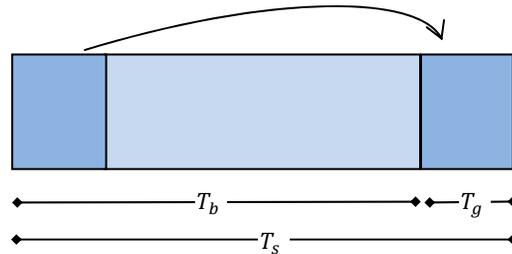
### A.1.3. Símbolo OFDM.

Los símbolos OFDM podemos describirlos tanto en el dominio del tiempo, como en el dominio de la frecuencia, a continuación se describe el símbolo en ambos dominios, y posteriormente se enuncian los principales parámetros de ellos.

#### A.1.3.1. Símbolo OFDM en el dominio del tiempo

Al aplicar la transformada inversa rápida de Fourier (IFFT) a los símbolos de información a transmitir se crea una forma de onda; lo que podría describirse como el símbolo OFDM en el dominio del tiempo. El tiempo de duración de la forma de onda generada por la IFFT

determina el tiempo útil del símbolo OFDM ( $T_b$ ). Adicionalmente, al inicio del símbolo se agrega lo que se denomina como Prefijo Cíclico (CP), que es básicamente una copia de la última parte de la información que conforma el tiempo útil del símbolo ( $T_g$ ). Ilustrado en la figura 21.



**Figura 21. Símbolo OFDM en el dominio del Tiempo**

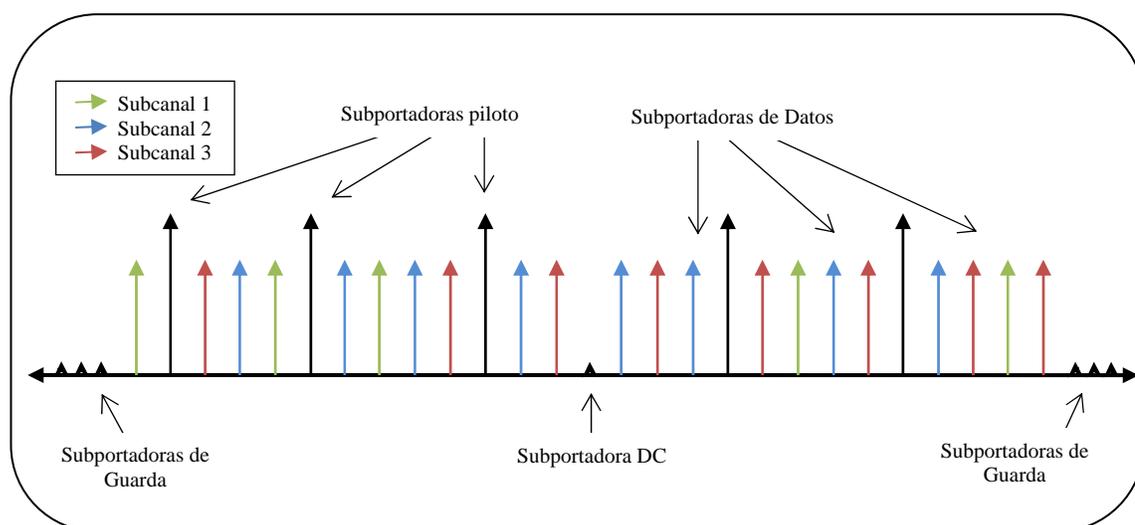
Ya que el prefijo cíclico es una copia del final del tiempo útil del símbolo, las muestras que se necesitan en el receptor para desarrollar la FFT pueden tomarse en cualquier parte de la longitud total del símbolo ( $T_s$ ). Esto ofrece mayor inmunidad contra las multitrayectorias y una mayor tolerancia para contra errores de sincronización de símbolos.

#### **A.1.3.2. Símbolo OFDM en el dominio de la frecuencia.**

La estructura básica de un símbolo OFDM en el dominio de la frecuencia está conformada por un grupo de subportadoras, el número de subportadoras que contiene el símbolo está determinado por el tamaño de la IFFT. Para el caso de WiMAX fijo, maneja símbolos OFDM de 256 subportadoras y para el caso de WiMAX móvil que maneja OFDMA pueden ser de 128, 512, 1024 o 2048 subportadoras. Dentro de estas subportadoras existen 3 diferentes tipos dependiendo de su función:

- *Subportadoras de Datos.* Utilizadas para transmitir la información o carga útil.
- *Subportadoras Piloto.* Subportadoras de señalización asignadas para diversos propósitos de estimación.
- *Portadoras Nulas.* No transmiten ninguna información, reservadas como bandas de guarda y portadora DC.

Si es el caso que se utiliza OFDMA las subportadoras se agrupan formando subcanales lógicos. Lo que significa que las subportadoras que conforman un subcanal no necesariamente tienen que ser adyacentes, lo que favorece para soportar la escalabilidad, el acceso múltiple y ayuda en caso de uso de tecnología avanzada de arreglos de antenas.



**Figura 22. Símbolo OFDM en el dominio de la Frecuencia**

### A.1.3.3. Parámetros fundamentales del Símbolo OFDM

Un símbolo OFDM está caracterizado en primera instancia por 4 parámetros nativos, en función de los valores de estos parámetros nativos se definen otros denominados parámetros derivativos. Estos 2 grupos de parámetros son descritos en las tablas XIV y XV.

**Tabla XIV. Parámetros Nativos del símbolo OFDM**

Parámetros Nativos	
$BW$	Ancho de banda total
$N_{usado}$	Numero de subportadoras Útiles (incluye la subportadora DC)
$n$	Factor de muestreo. En conjunto con $BW$ y $N_{usado}$ determina el espaciamiento de subportadoras y el tiempo de símbolo útil. Valor 8/7.
$G$	Relación del tiempo de CP con respecto al tiempo útil del símbolo. Valores posibles 1/32, 1/16, 1/8 y 1/4.

**Tabla XV. Parámetros Derivativos del símbolo OFDM**

Parámetros Derivativos		
$N_{FFT}$	Número de puntos en la FFT	
$F_s$	Frecuencia de muestreo	$F_s = \text{floor}(n BW/8000) * 8000$
$\Delta f$	Espaciamiento entre subportadoras	$\Delta f = F_s/N_{FFT}$
$T_b$	Tiempo útil del símbolo	$T_b = 1/\Delta f$
$T_g$	Tiempo de CP.	$T_g = G * T_b$
$T_s$	Tiempo del símbolo OFDMA	$T_s = T_b + T_g$

#### A.1.4. Esquemas de Transmisión.

El estándar IEEE 802.16e-2005 soporta tanto Duplexación por División de Tiempo (TDD) como Duplexación por División de Frecuencias (FDD). Sin embargo en la práctica comúnmente se opta por utilizar TDD debido a que presenta importantes ventajas, como por ejemplo: requiere solo de un canal para transmitir el enlace de bajada como el de subida en dos distintas ranuras de tiempo, por lo tanto tiene una eficiencia espectral más alta que FDD. Además al utilizar TDD se pueden ajustar dinámicamente las proporciones utilizadas para la información de subida y la de bajada, también es flexible para manejar tráfico de ancho de banda simétrico o asimétrico.

#### A.1.5. Permutación de Subportadoras y Subcanalización.

Como se a mencionado anteriormente, en WiMAX móvil se utiliza OFDM como técnica de acceso al medio, lo que permite que las subportadoras del símbolo se agrupen para formar subcanales. Un subcanal está formado por una cantidad  $n$  de subportadoras de datos y pilotos determinada por el esquema de permutación que se utilice. El esquema de permutación que se utilice determina, además de la cantidad, la manera en que se agrupan las subportadoras en un subcanal. WiMAX define principalmente 2 esquemas: FUSC (Full Usage of the subchannels) y PUSC (Partial Usage of the subchannels).

En el caso del esquema FUSC, todas las subportadoras son usadas para crear subcanales compuestos de 48 subportadoras cada uno distribuidas uniformemente a través de toda la banda de frecuencias. En este esquema de permutación las subportadoras piloto son asignadas en primera instancia y enseguida las subportadoras restantes se agrupan para formar los subcanales. El conjunto de subportadoras piloto utilizadas en este esquema de permutación está dividido en 2 grupos variables y 2 grupos constantes. El índice de las piloto pertenecientes a los grupos variables cambia de un símbolo a otro, mientras que en las de los grupos constantes se mantienen.

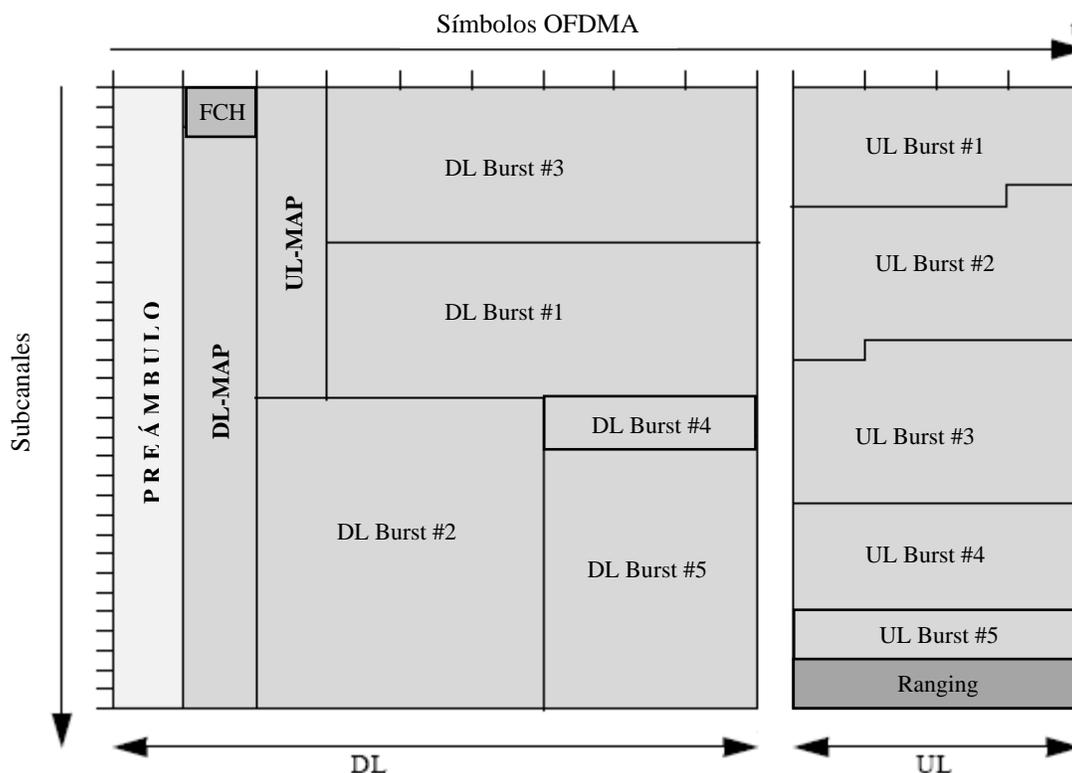
Para el caso del esquema PUSC todas las subportadoras del símbolo, excepto las nulas, son divididas en 6 grupos y una vez agrupadas se realiza la permutación de manera independiente para cada uno de estos grupos para formar los subcanales. Esta permutación forma *clusters* de 14 subportadoras adyacentes, un par de *clusters* forman un subcanal de transmisión.

#### **A.1.6. Ranura y estructura de trama**

Una ranura en OFDMA es la unidad más pequeña de los recursos de la capa física que puede ser asignando para un usuario. La definición de una ranura OFDMA depende de la estructura del símbolo OFDMA, que varía del UL y DL y del esquema de permutación que se utilice:

- Cuando se utiliza la permutación distribuida FUSC, una ranura es un subcanal a través de un símbolo OFDMA.
- Para el caso del DL que utiliza la permutación distribuida PUSC, una ranura es un subcanal a través de dos símbolos OFDMA.
- Para el UL que utiliza la permutación distribuida PUSC, una ranura es un canal a través de 3 símbolos OFDMA.
- Para permutación adyacente de subportadoras, una ranura es un subcanal a través de 2, 3 o 6 símbolos OFDMA.

Una trama TDD de WiMAX está dividida principalmente en 2 subtramas, la correspondiente al enlace de subida y la del enlace de bajada; a su vez cada una de ellas dividida en varias zonas esquematizadas en la figura 23.



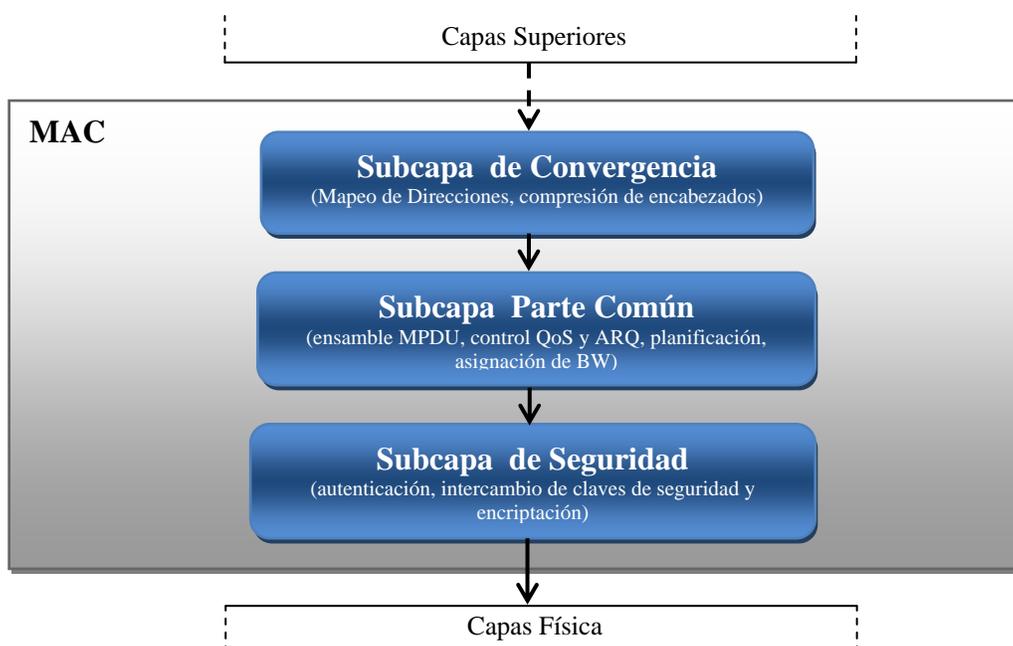
**Figura 23. Trama TDD sistema WiMAX**

En el primer símbolo OFDM se transmite el preámbulo, que transporta información para procedimientos de capa física como sincronización tiempo y frecuencia, estimación inicial del canal, estimación del ruido y la interferencia. En el segundo símbolo se transporta en las primeras subportadoras el encabezado de control de trama (FCH). Enseguida están los mensajes DL-MAP y UL-MAP en los cuales se especifican las regiones de datos asignadas a los diferentes estaciones suscriptoras. Los símbolos restantes se dividen entre los diferentes usuarios para la transmisión de la carga útil.

## **A.2. Capa MAC.**

La capa MAC de WiMAX, esquematizada en la figura 24, está conformada por 3 subcapas: la Subcapa de Convergencia (CS), subcapa de parte común, y la subcapa de seguridad. La

CS corresponde a la interfaz entre la capa MAC con las capas superiores, recibe los paquetes de datos de capas superiores conocidos como MAC SDU (Service Data Units). En esta subcapa se desempeñan todas las operaciones dependientes de la naturaleza de los protocolos de capas superiores. La subcapa de parte común se encarga de las operaciones propias de la capa MAC, totalmente independiente de las capas superiores. La subcapa de seguridad, como su nombre lo indica garantiza la seguridad de la información, realiza actividades de encriptación, autorización y apropiado intercambio de las claves de encriptación entre la BS y MS.



**Figura 24. Capa MAC de WiMAX**

La capa de Control de Acceso al Medio (MAC) de WiMAX es la responsable de establecer reglas para compartir los recursos del canal entre los múltiples accesos de los usuarios, algunas de sus funciones principales son:

- Segmentar/concatenar los SDUs recibidos de capas superiores en MAC PDUs (protocol data units), la unidad básica de carga de la capa MAC.
- Seleccionar la apropiada modulación, tasa de codificación y nivel de potencia a ser usado para la transmisión de MAC PDUs.

- Actividades concernientes a la retransmisión de MAC-PDUs en caso de utilizarse mecanismos de ARQ.
- Se encarga de control de Calidad de Servicio y manejo de prioridades de los MAC PDUs
- Calendarizar MAC PDUs sobre los recursos disponibles en capa Física.
- Proveer medidas de seguridad de la información y manejo de claves.

#### **A.2.1. Subcapa de Convergencia (CS).**

Una función clave de la subcapa de convergencia es la del mapeo de direcciones de capas superiores, como por ejemplo las direcciones IP. La capa MAC de WiMAX, al ser orientada a conexión, asigna un identificador unidireccional a cada una de las conexiones entre la estación base y la estación suscriptora denominado CID (connection identifier). Este identificador puede ser visto como el equivalente a una dirección de capa MAC temporal que apoya para el control del tráfico. Este identificador es utilizado para mapear las direcciones de capas superiores, para ello, es necesario mantener registros de la dirección de capas superiores con su respectivo CID. Este mapeo es indispensable ya que en las dos capas inferiores (MAC y PHY) las direcciones de capas superiores no son visibles.

Otra importante tarea de la subcapa de convergencia es la supresión de encabezados. En el transmisor se remueve las partes repetitivas de los encabezados de cada SDU. Por ejemplo en el caso de paquetes IP, cada paquete de una conexión contiene la dirección IP de la fuente y destino y para esa conexión esta no cambia de un paquete al siguiente por lo que puede ser removido antes de transmitirlo. De manera similar en el receptor la parte repetitiva del encabezado es reinsertada en el SDU antes de entregarlo a capas superiores. El mecanismo de supresión de encabezados se plantea en el estándar como una característica opcional.

#### **A.2.2. Construcción y Transmisión de MAC PDU**

Los paquetes que llegan a la capa MAC de las capas superiores, nombrados MAC SDUs son ensamblados para crear paquetes conocidos como MAC PDUs, la unidad de carga

básica manejada por las capas MAC y PHY. Dependiendo del tamaño de la carga útil que contengan los SDUs que llegan a la subcapa de convergencia de MAC pueden presentarse dos casos; transportar múltiples SDUs en un solo MAC PDU o fragmentar un SDU para transportarle en múltiples PDUs. Cuando un SDU es fragmentado, la posición de cada fragmento es etiquetado con un numero lo que permite a la capa MAC en el receptor re ensamblar los fragmentos en el orden adecuado.

Un MAC PDU, ilustrado en la figura 25, típicamente está formado por 3 partes: un encabezado genérico de tamaño fijo utilizado para llevar mensajes de control de capa MAC o datos de la subcapa de convergencia, seguido por la carga útil que es de tamaño variable dependiendo de cantidad de información a transportar y finalmente el código corrector de errores CRC (Cyclic Redundancy Check). Además del típico PDU descrito, el estándar define otro que es utilizado para solicitar ancho de banda adicional a la estación base, este solo consiste de un encabezado de solicitud de ancho de banda sin carga útil ni código corrector de errores.



**Figura 25. MAC PDU**

Ya una vez construido el MAC PDU es entregado al calendarizador que se encarga de programar la transmisión de estos sobre los recursos de capa física disponibles. El calendarizador se vale de los identificadores de capa 2 (CID) de los MAC PDU para estimar los requerimientos de calidad de servicio y en base a estos determinar la optima asignación de recursos de la capa física, trama por trama.

### **A.2.3. Solicitud y Asignación de Ancho de Banda.**

Para el caso del enlace de bajada, las decisiones relacionadas con la asignación de ancho de banda a las diversas conexiones, son tomadas exclusivamente por la estación base. Aquí el mecanismo de calendarización asigna los recursos basándose en el CID para poder conocer

sus requerimientos de calidad de servicio. Las asignaciones del ancho de banda del enlace de bajada son difundidos a las estaciones suscriptoras a través del mensaje de control DL-MAP transmitido al inicio de cada trama.

En el enlace de Subida, la estación suscriptora es la que solicita los recursos. Estas solicitudes se hacen en términos de bytes de información, no se hacen en términos de recursos de capa física como número de subcanales o de símbolos OFDM debido a que la modulación y tasa de codificación de las conexiones cambian dinámicamente.

## Glosario

16QAM	Modulación de amplitud en cuadratura de 16 estados. 16 posibles combinaciones con símbolos de 4 bits
3G	término genérico utilizado para los sistemas de comunicaciones móviles de nueva generación,
3GPP	(Third Generation Partnership Project). Es el conjunto de especificaciones técnicas para operar una red 3G basada en GSM
64QAM	Modulación de amplitud en cuadratura de 64 estados. 64 posibles combinaciones con símbolos de 6 bits
AMR	Formato de archivo de codificación de sonido cuyo principal objetivo es la compresión eficaz de frecuencias de conversación.
BER	Tasa de error de bit. Relación de bits recibidos con errores respecto a los bits enviados.
BPSK	modulación por desplazamiento de fase binaria
BS	Estación base
CBR	Tipo de tasa de bit en el que la velocidad de bits no varía.
CID	Identificar que utiliza WiMAX a nivel de capa MAC para identificar cada conexión.
CC	Codificador Convolutivo
CP	Prefijo Cíclico.
CRC	Control de Redundancia Cíclica.
CS	Subcapa de convergencia de la capa MAC
DL	Enlace de Bajada
DL-MAP	Mensaje de control usado por WiMAX para difundir las asignaciones del ancho de banda disponible en el enlace de bajada a las estaciones suscriptoras
DSL	Línea de abonado digital. Término utilizado para referirse a todas las tecnologías que proveen una conexión digital sobre línea de abonado de la red telefónica básica o conmutada

ETSI	(European Telecommunications Standards Institute) Instituto Europeo de Normas de Telecomunicaciones es una organización de estandarización de la industria de las telecomunicaciones con proyección mundial.
FDD	Duplexación por división de frecuencia
FEC	Forward error control. Mecanismo de corrección de errores que permite corrección en el receptor.
FFT	Transformada Rápida de Fourier
FTP	Protocolo de Transferencia de archivos
GPS	(Generalized Processor Sharing) disciplina de servicio para compartir la capacidad de un enlace de comunicaciones congestionado de manera eficiente, flexible y justa.
GSM	Sistema Global para las comunicaciones Móviles
HTTP	Protocolo de transferencia de Hipertexto. Protocolo usado para tráfico Web.
IFFT	Transformada rápida de Fourier inversa.
MAC	Subcapa de Control de acceso al medio. Correspondiente a la capa de enlace de datos.
MPEG	como MPEG, es un grupo de trabajo del encargado de desarrollar estándares de codificación de audio y vídeo
MS o SS	Estación móvil o estación suscriptora
Multimedia	Objeto o sistema que utiliza múltiples medios de expresión para presentar o comunicar información.
NS2	Network simulador 2. Simulado de redes de eventos discretos.
OFDM	Multiplexación por división de frecuencias ortogonales
OFDMA	Accesos por división de frecuencias ortogonales
PDU	(Protocol Data Units), Unidades de Datos de Protocolo. Se utiliza para el intercambio entre unidades parejas, dentro de una capa del modelo OSI.
Perfil de transmisión	Combinación de tasa de codificación y esquema de modulación definidos por WiMAX utilizados para

transmitir información.

PHY	Capa física, capa 1 de acuerdo al modelo OSI.
Ponchado	Proceso de eliminación de algunos bits de paridad después de la codificación de un código corrector de errores.
QPSK	Modulación por desplazamiento de fase de 4 símbolos, cada uno de 2 bits
RR	Round Robin es un algoritmo de calendarización que asigna a cada conexión una porción de tiempo equitativa y ordenada.
SDU	Paquetes de comunicación entre capas adyacentes.
SFID	Service Flow ID. Identificador utilizado por WiMAX
SNR	Relación señal a Ruido margen entre la potencia de la señal y la potencia del ruido que lo corrompe, medido en decibelios
TCP	Protocolo de control de transmisión
TDD	Duplexación por división de tiempo
TDM	Acceso múltiple por división de tiempo.
Throughput	Caudal eficaz que se envía.
Tiempo real	Sistema digital que interactúa activamente con dinámica conocida en relación con sus entradas, salidas y restricciones temporales,
UL	Enlace de Subida
Ultima milla	conexión entre el último equipo del proveedor de servicio y el equipo del cliente
UL-MAP	Mensaje de control usado por WiMAX para difundir las asignaciones del ancho de banda disponible en el enlace de subida a las estaciones suscriptoras
Unicast	Envío de información de un único transmisor a un único receptor
VBR	(Variable Bit Rate) = Es un tipo de tasa de bit en el que la velocidad de bits no es constante, sino que va adaptándose a las necesidades en cada momento.
VoIP	Voz sobre protocolo de internet. Recursos que hacen

posible que la señal de voz viaje a través de internet.

Wi-Fi	Wireless fidelity es un sistema de envío de datos sobre redes computacionales utilizando ondas de radio.
Wire Shark	Analizador de protocolos anteriormente conocido como Ethereal, permite ver todo el tráfico que pasa a través de una red (usualmente una red Ethernet aunque es compatible con algunas otras)
WMAN	Red inalámbrica de Área Metropolitana
WRR	Round Robin ponderado, Variación del algoritmo Round Robin donde se le asignan pesos distintos a las conexiones