

**RECOMENDACIONES TÉCNICAS BASADAS EN GESTIÓN DE RECURSOS RADIO
(RRM) PARA MEJORAR EL DESEMPEÑO DE UNA RED DE ACCESO WIMAX FIJO
(IEEE 802.16-2004)**



**Luis David Sarmiento Guerrero
César Fernando Cruz Salamanca**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
Facultad De Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones
Departamento de Telecomunicaciones
Grupo de Radio e InALámbricas – GRIAL
Línea de investigación: Gestión Integrada de Redes, Servicios y Arquitecturas de
Telecomunicaciones
Popayán, Julio de 2010**

**RECOMENDACIONES TÉCNICAS BASADAS EN GESTIÓN DE RECURSOS RADIO
(RRM) PARA MEJORAR EL DESEMPEÑO DE UNA RED DE ACCESO WIMAX FIJO
(IEEE 802.16-2004)**



**Trabajo final de grado presentado
como requisito para optar al título de
Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones**

**Luis David Sarmiento Guerrero
César Fernando Cruz Salamanca**

Director: Víctor Manuel Quintero Flórez

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES
Departamento de Telecomunicaciones
Grupo de Radio e InALámbricas – GRIAL
Línea de investigación: Gestión Integrada de Redes, Servicios y Arquitecturas de
Telecomunicaciones
Popayán, Julio de 2010**

*A Dios por sobre todas las cosas
Porque he sentido su ayuda y su presencia en los momentos más difíciles de mi vida.
A mi familia, quienes después de Dios, son lo más grande e importante y valioso que
tengo.*

*A mi novia por su amor, apoyo y comprensión,
Y a todos cuantos han hecho de mi la persona que soy.*

LUIS DAVID.

*Agradezco principalmente a mis padres por el apoyo incondicional y constante durante el
transcurso de mi carrera y sobre todo en los tropiezos que se presentaron para el
desarrollo de la misma. Han sabido tener paciencia y cabeza fría para esperar el
desarrollo íntegro de su hijo como estudiante universitario y futuro profesional. Sin esto
habría sido aún más difícil cumplir este logro personal. Muchas gracias de nuevo.*

CÉSAR FERNANDO.

AGRADECIMIENTOS

Queremos agradecer de forma especial a los docentes Víctor Manuel Quintero Flórez, Guefry Ágredo Méndez, Claudia Milena Hernández y Harold Romo Romero, por todo el apoyo que nos brindaron para sacar adelante nuestro proyecto tanto a nivel académico como personal.

Agradecemos también la colaboración de la empresa UNE de EPM Telecomunicaciones S.A., y en particular a los ingenieros Yesid Sossa y Héctor Jaime González.

CONTENIDO

CONTENIDO.....	I
ÍNDICE DE FIGURAS	VI
ÍNDICE DE TABLAS	VII
LISTA DE ANEXOS	VIII
LISTA DE ACRÓNIMOS	IX
INTRODUCCIÓN	1
1. FUNDAMENTOS DE WIMAX.....	3
1.1. MODELO DE REFERENCIA OSI PARA WiMAX FIJO	9
1.1.1. Subnivel de Control de Acceso al Medio.....	9
1.1.1.1. Subnivel de Convergencia Específica del Servicio	10
1.1.1.2. Subnivel de Parte Común.....	11
1.1.1.3. Subnivel de Seguridad.....	12
1.1.1.4. Gestión de la Calidad del Servicio	12
1.1.1.4.1. Servicios de concesión sin solicitud.....	13
1.1.1.4.2. Servicios por consulta de tiempo real	13
1.1.1.4.3. Servicios por consulta de tiempo no real	14
1.1.1.4.4. Servicios de Mejor Esfuerzo	14
1.1.1.5. Envío de datos en el enlace de subida y en el enlace de bajada	14
1.1.1.6. Flujo de Servicio.....	15
1.1.2. Nivel Físico.....	16
1.1.2.1. Multiplexación por División de Frecuencia Ortogonal.....	18
1.1.2.1.1. Convolución Circular.....	20
1.1.2.1.2. Prefijo Cíclico.....	20
1.1.2.2. PHY-OFDM de WiMAX fijo	21
1.1.2.3. Subcanalización	22

1.1.2.4.	PHY-OFDMA de WiMAX fijo	22
1.2.	ESCENARIOS TÍPICOS DE DESPLIEGUE DE WIMAX FIJO	24
1.3.	PERFILES DEL WIMAX FORUM.....	24
1.4.	CONCLUSIÓN DEL CAPÍTULO	25
2.	RRM EN WIMAX	26
2.1.	EL CONCEPTO DE RRM	26
2.2.	RRM EN WIMAX	27
2.2.1.	Adaptación del Enlace	27
2.2.2.	Control de Potencia	30
2.2.3.	Asignación de Recursos	31
2.2.3.1.	Control de admisión.....	32
2.2.3.2.	Solicitud de ancho de banda.....	32
2.2.3.3.	Planificador.....	34
2.2.4.	Gestión de Interferencia.....	35
2.2.5.	Tecnologías Avanzadas de Antena.....	36
2.2.5.1.	Sistemas Adaptativos de Antenas.....	36
2.2.5.2.	Soporte para Sistemas adaptativos de antenas (AAS) en el estándar IEEE 802.16-2004.....	37
2.2.5.3.	Múltiples Entradas Múltiples Salidas.....	37
2.2.5.4.	Soporte para Múltiples Entradas Múltiples Salidas (MIMO) en el estándar IEEE 802.16-2004.....	38
2.2.6.	RRM en la arquitectura de red del WIMAX Forum	38
2.2.6.1.	Arquitectura de red del WiMAX Forum.....	39
2.2.6.2.	Arquitectura de red para Gestión de Recursos Radio (RRM).....	40
2.2.7.	802.16g	41
2.2.8.	802.16m.....	41
2.3.	CONCLUSIÓN DEL CAPÍTULO	43

3.	ALGORITMOS Y ESTRATÉGIAS RRM PARA WIMAX FIJO	44
3.1.	PLANIFICADOR	44
3.1.1.	Esquema de Gestión de QoS del Planificador	45
3.1.2.	Concepto de Justicia de un Planificador	45
3.1.3.	Algoritmos de Formación de Tráfico	46
3.1.3.1.	Canasta de fichas.....	47
3.1.3.2.	Canasta goteante	47
3.1.4.	Propuestas de Planificadores	48
3.1.4.1.	Planificadores homogéneos.....	48
3.1.4.1.1.	Round Robin	49
3.1.4.1.2.	Encolamiento con prioridad	49
3.1.4.1.3.	Encolamiento justo	50
3.1.4.1.4.	Encolamiento justo ponderado	50
3.1.4.1.5.	Encolamiento con prioridad justa con déficit	51
3.1.4.1.6.	Primero vencimiento más próximo.....	51
3.1.4.2.	Planificadores heterogéneos	52
3.1.4.2.1.	Planificador de paquetes para soporte de QoS en sistemas de acceso inalámbrico de banda ancha IEEE 802.16	52
3.1.4.2.2.	Estrategia de gestión de flujo de servicio para sistemas de acceso inalámbrico de banda ancha IEEE 802.16 en modo TDD	54
3.1.4.3.	Planificadores diversos.....	56
3.1.4.3.1.	Algoritmo de planificación multinivel (<i>cross-layer</i>) con soporte para QoS en redes inalámbricas.....	56
3.1.4.3.2.	Modelo con base en teoría de colas y optimización para RRM en redes inalámbricas de banda ancha IEEE 802.16	58
3.1.4.3.3.	Estudio de desempeño de algoritmos de planificador UL en redes WiMAX PMP	59
3.2.	ADAPTACIÓN DEL ENLACE	62

3.2.1.	Algoritmo de Planificación Multinivel con Soporte para QoS en Redes Inalámbricas	63
3.2.2.	Algoritmo y Métrica de Adaptación del Enlace para el Estándar IEEE 802.16	63
3.2.3.	Optimización del Esquema de Modulación WiMAX multinivel con Código de Borrado.....	64
3.2.4.	Algoritmo de Adaptación del Enlace en Sistemas WiMAX Basados en MIMO	65
3.3.	CONTROL DE POTENCIA	67
3.3.1.	Asignación de Potencia de Transmisión para Sistemas OFDM Multiusuario ..	67
3.3.2.	Aprovisionamiento Conjunto de Control de Potencia, Formación de Haces y Ancho de Banda para Asignación Óptima de QoS.....	68
3.4.	TECNOLOGÍAS AVANZADAS DE ANTENAS	69
3.5.	GESTIÓN DE INTERFERENCIA.	70
3.5.1.	Medición de Interferencia.....	70
3.5.2.	Técnicas de Diseño	70
3.5.3.	Mitigación por Control de Potencia	71
3.5.4.	Mitigación por Tecnologías de Antenas	71
3.5.5.	Reuso Fraccional de Frecuencia	72
3.5.6.	Recomendaciones para Mitigación de Interferencia entre Operadores	74
3.6.	VENTAJAS ALCANZADAS POR RRM.....	74
3.6.1.	Planificador.....	74
3.6.2.	Adaptación del enlace.....	75
3.6.3.	Control de potencia.....	76
3.6.4.	Gestión de interferencia.....	76
3.7.	CONCLUSIÓN DEL CAPÍTULO	77
4.	RECOMENDACIONES TÉCNICAS BASADAS EN RRM PARA LA MEJORA DEL DESEMPEÑO EN WIMAX FIJO.....	78
4.1.	ANÁLISIS DE CAPACIDAD Y COBERTURA EN UNA RED WiMAX	78
4.1.1.	Cobertura.....	78

4.1.2.	Capacidad	79
4.1.3.	Goodput.....	80
4.1.4.	Capacidad y Cobertura Teórica de WiMAX	80
4.1.5.	Relación entre Capacidad y Cobertura Teórica	82
4.1.6.	Análisis de un Caso de Implementación: UNE-Cali.....	84
4.2.	SOPORTE DE SERVICIOS EXIGENTES EN WiMAX	86
4.2.1.	Requerimientos Técnicos de IPTV.....	86
4.2.2.	Características de WiMAX para el Soporte de IPTV	87
4.2.3.	Prestación de IPTV en WiMAX	92
4.2.3.1.	Caso teórico	92
4.2.3.2.	Caso de implementación de UNE	92
4.3.	RECOMENDACIONES TÉCNICAS PARA MEJORA DEL DESEMPEÑO DE WIMAX	93
4.4.	CONCLUSIÓN DEL CAPÍTULO	99
5.	CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS	100
5.1.	CONCLUSIONES.....	100
5.2.	TRABAJOS FUTUROS	102
	REFERENCIAS.....	104

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Modelo por subniveles de WiMAX/802.16.	10
Figura 1.2. División del subnivel MAC de WiMAX Fijo.	11
Figura 1.3. Comparación de OFDM con FDM.	19
Figura 1.4. Prefijo cíclico de OFDM.	21
Figura 1.5. Subcanalización para la PHY OFDM de WiMAX fijo.	22
Figura 1.6. Subcanalización con subportadoras distribuidas	23
Figura 2.1. Esquema de funcionamiento del mecanismo de adaptación del enlace.	30
Figura 2.2. Esquema de funcionamiento de MIMO.	38
Figura 2.3. Modelo de referencia de red.	39
Figura 2.4. Arquitectura de red RRM con funciones en entidades separadas.	41
Figura 2.5. Arquitectura de red RRM con funciones integradas y retransmisión (Relay). ...	41
Figura 2.6. Pila de protocolos definida en la revisión 802.16m.	42
Figura 3.1. Esquema de gestión de QoS UL/DL para flujos de servicio.	45
Figura 3.2. Formación de tráfico.	46
Figura 3.3. Esquema de funcionamiento del algoritmo canasta de fichas.	47
Figura 3.4. Analogía del algoritmo canasta goteante.	48
Figura 3.5. Esquema de funcionamiento del algoritmo <i>Round Robin</i>	49
Figura 3.6. Esquema de funcionamiento del algoritmo PQ.	50
Figura 3.7. Planificador heterogéneo PQ, EFD, WFQ.	52
Figura 3.8. Esquema de arquitectura genérica del planificador del UL.	53
Figura 3.9. Planificador heterogéneo DFPQ, EFD, WFQ Y RR.	55
Figura 3.10. Umbrales de decisión para adaptación del enlace.	62
Figura 3.11. a) Esquema de reuso (1x3x1) y b) Esquema de reuso (3x3x3).	73
Figura 3.12. Concepto de FFR.	73
Figura 3.13. División de la subtrama para el soporte de FFR.	74
Figura 4.1. Interacción entre los Mecanismos RRM.	99

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Perfiles para WiMAX Fijo.....	25
Tabla 2.1. Codificación FEC.....	29
Tabla 2.2. Resumen de MCS, bits/símbolo, bits útiles transmitidos y SNR.....	29
Tabla 4.1. Valores de N_{FFT} para el nivel PHY OFDMA según el tamaño del canal.....	80
Tabla 4.2. Relación entre el ancho de banda y n	80
Tabla 4.3. Ejemplo de capacidad y cobertura en WiMAX.	81
Tabla 4.4. Parámetros del sistema.	81

LISTA DE ANEXOS

- Anexo A. CONSIDERACIONES DE DISEÑO RADIO PARA WiMAX FIJO.
- Anexo B. CONCEPTOS TÉCNICOS Y CONSIDERACIONES TECNOLÓGICAS DE IPTV.

LISTA DE ACRÓNIMOS

16-QAM	QAM de 16 niveles
3GPP	Third Generation Partnership Project - Proyecto de Cooperación para Tercera Generación
3GPP2	Third Generation Partnership Project 2 - Proyecto de Cooperación para Tercera Generación 2
64-QAM	QAM de 64 niveles
AAC	Advanced Audio Coding - Codificación Avanzada de Audio
AAL2	ATM Adaptation Layer type 2 - Capa de Adaptación para ATM tipo 2
AAS	Adaptive Antenna System - Sistema de Antenas Adaptativas
AAT	Advanced Antenna Technologies - Tecnologías Avanzadas de Antena
ALL-IP	All IP - Completamente IP
AMC	Adaptive Modulation and Coding - Modulación y Codificación Adaptativa
APA	Adaptive Power Allocation - Asignación Adaptativa de Potencia
ARQ	Automatic Repeat reQuest - Solicitud de Repetición Automática
ASN	Access Service Network - Red de Servicio de Acceso
ASP	Access Service Provider - Proveedor de Servicio de Acceso
ATM	Asynchronous Transfer Mode - Modo de Transferencia Asíncrono
AVC	Advanced Video Codec - Codificador Avanzado de Video
AWGN	Additive White Gaussian Noise - Ruido Blanco Gaussiano Aditivo
BE	Best-Effort - Mejor Esfuerzo
BER	Bit Error Rate - Tasa de Bits Errados
BPSK	Binary PSK - PSK Binaria
BS	Base Station - Estación Base
BTC	Block Turbo Code - Código Bloque Turbo
BWA	Broadband Wireless Access - Acceso Inalámbrico de Banda Ancha
CAS	Conditional Access System - Sistema de Acceso Condicional
CBR	Constant Bit Rate - Velocidad de Transferencia de Bit Constante
CC	Convolutional Code - Codificación Convolutiva
CCI	Co-Channel Interference - Interferencia Co-Canal
CID	Connection IDentifier - Identificador de Conexión
CINR	Carrier to Interference-plus-Noise Ratio - Relación Portadora a Ruido mas Interferencia
CN	Core Network - Núcleo de Red
CP	Cyclic Prefix - Prefijo Cíclico
CRC	Cyclic Redundant Check - Revisión de Redundancia Cíclica
CSMA	Carrier Sense Multiple Access - Acceso Múltiple por Detección de Portadora
CSMA/CA	CSMA with Collision Avoidance - CSMA con Evitación de Colisión
CSMA/CD	CSMA with Collision Detection - CSMA con Detección de Colisiones
CSN	Connectivity Service Network - Red de Servicio de conectividad
CTC	Convolutional Turbo Codes - Códigos Turbo Convolutivos
DAMA	Demand Assigned Multiple Access - Acceso Múltiple de Asignación por

	Demanda
DFPQ	Deficit Fair Priority Queueing - Encolamiento con Prioridad Justa con Déficit
DFS	Dynamic Frequency Selection - Selección Dinámica de Frecuencia
DFT	Discrete Fourier Transform - Transformada Discreta de Fourier
DHCP	Dynamic Host Configuration Protocol - Protocolo de Configuración Dinámica de Host
DiffServ	Differentiated Services - Servicios Diferenciados
DL	DownLink - Enlace de Bajada
DL-MAP	Mapa de DL
DVB-H	Digital Video Broadcasting Handheld - Radiodifusión de Video Digital - Portable
EDF	Earliest Deadline First - Primero Vencimiento Más Próximo
EGP	Electronic Program Guide - Guía de Programación Electrónica
ETRI	Electronic and Telecommunications Research Institute - Instituto de Investigación en Telecomunicaciones y Electrónica
ETSI	European Telecommunications Standards Institute - Instituto de Estándares de Telecomunicaciones Europeo
ETSI-BRAN	ETSI Broadband Radio Access Networks - Redes de Acceso Radio de Banda Ancha especificadas por ETSI
FBWA	Fixed Broadband Wireless Access - Acceso Fijo Inalámbrico de Banda Ancha
FDD	Frequency Division Duplex - Duplexación por División de Frecuencia
FDM	Frequency Division Multiplexing - Multiplexación por División de Frecuencia
FEC	Forward Error Correction - Corrección de Errores Hacia Adelante
FFR	Fractional Frequency Reuse - Reuso de Frecuencia Fraccional
FFT	Fast Fourier Transform - Transformada Rápida de Fourier
FIR	Finite Impulse Response - Respuesta al Impulso Finita
fps	frames per second - tasa de cuadros por segundo
FQ	Fair Queueing - Encolamiento Justo
FTP	File Transfer Protocol - Protocolo para la Transferencia de Archivos
GOS	Grade of Service - Grado de Servicio
HAG	Home Access Network - Pasarela de Acceso del Hogar
HDTV	High Definition Television - Televisión de Alta Definición
HiperMAN	High performance radio Metropolitan Area Network - Red Radio de Área Metropolitana de Alto Desempeño
IE	Information Element - Elemento de Información
IEEE	Institute of Electrical and Electronic Engineers - Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos
IFFT	Inverse Fast Fourier Transform - Transformada Rápida de Fourier Inversa
IGMP	Internet Group Management Protocol - Protocolo de Gestión de Grupos de Internet
IPoE	IP over Ethernet - IP sobre Ethernet
IPTV	Internet Protocol TeleVision- Televisión por Protocolo de Internet
IPv4	Internet Protocol v4 - Protocolo de Internet v4
IPv6	Internet Protocol v6 - Protocolo de Internet v6
ISI	Inter-Symbol Interference - Interferencia Inter-Simbólica

ISP	Internet Service Provider - Proveedor de Servicios de Internet
LAN	Local Area Network - Red de Área Local
LLC	Logical Link Control - Control del Enlace Lógico
LOS	Line Of Sight - Línea de Vista
MAC	Medium Access Control - Control de Acceso al Medio
MAC CPS	MAC Common Part Sublayer - Subnivel Parte Común MAC
MAC CS	MAC Convergence Sublayer - Subnivel de Convergencia MAC
MAN	Metropolitan Area Network - Red de Área Metropolitana
MCM	Multi-Carrier Modulation - Modulación por Multiportadora
MCS	Modulation and Coding Scheme - Esquema de Modulación y Codificación
MediaFLO	Media Forward Link Only - Enlace de Medios Sólo Hacia Adelante
MIMO	Multiple Input Multiple Output - Múltiples Entradas Múltiples Salidas
MOS	Mean Opinion Score - Medio de Opinión
MPDU	MAC Protocol Data Unit - Unidad de Datos del Protocolo MAC
MPEG	Moving Pictures Experts Group - Grupo de Expertos en Imágenes en Movimiento
MPLS	Multi Protocol Label Switching - Conmutación de Etiquetas Multi-protocolo
MSDU	MAC Service Data Units - Unidades de Datos de Servicio MAC
NAL	Network Abstraction Layer - Nivel de Abstracción de Red
NAP	Network Access Provider - Proveedor de Acceso a la Red
NLOS	Non-Line Of Sight - No Línea de Vista
nrtPS	non-real-time Polling Services - Servicios por Consulta de Tiempo No Real
NSP	Network Service Provider - Proveedor de Servicios de Red
NWG	Network Working Group - Grupo de Trabajo de Red
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing - Multiplexación por División de Frecuencia Ortogonal
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access - Acceso Múltiple por División de Frecuencia Ortogonal
OSI	Open System Interconnection - Interconexión de Sistemas Abiertos
PDU	Packet Data Unit - Unidad de Datos de Paquete
PER	Packet Error Rate - Tasa de Paquetes Errados
PHS	Payload Header Suppression - Supresión de Encabezados de la Carga Útil
PHY	PHYSical layer - nivel Físico
PIM	Protocol Independent Multicast - Multicast Independiente del Protocolo
PM	Poll Me - Consúltame
PMP	Point-to-MultiPoint - Punto a Multipunto
PQ	Priority Queueing - Encolamiento con Prioridad
PSK	Phase Shift Keying - Desplazamiento de Fase
PTP	Point To Point - Punto a Punto
QAM	Quadrature Amplitude Modulation – Modulación por Amplitud en Cuadratura
QoS	Quality of Service - Calidad de Servicio
QPSK	Quadrature PSK - PSK en Cuadratura
RC	Resource Control - Control de Recursos
RF	Radio-Frequency - Radio-Frecuencia

ROI	Return Of Investment - Retorno Rápido de la Inversión
RR	Radio Resource - Recursos Radio
RRA	Radio Resource Agent - Agente de Recursos Radio
RRC	Radio Resource Controller - Controlador de Recursos Radio
RRCM	Radio Resource Control and Management - Gestión y Control de Recursos Radio
RRM	Radio Resource Management - Gestión de Recursos Radio
RS	Reed-Solomon
RSSI	Receive Signal Strength Indicator - Indicador de Intensidad de la Señal Recibida
rtPS	real-time Polling Services - Servicios por Consulta de Tiempo Real
RTR	Real Time Retransmission - Retransmisión en Tiempo Real
RTSP	Real-Time Streaming Protocol - Protocolo de Streaming en Tiempo Real
SAP	Service Access Point - Punto de Acceso al Servicio
SDTV	Standard Definition Television - Definición Estándar
SF	Service Flow - Flujo de Servicio
SFID	Service Flow IDentifier - Identificador de Flujo de Servicio
SI	Slip Indicator - Indicador de Deslizamiento
SLA	Service Level Agreement - Acuerdos de Nivel de Servicio
SM	Spatial Multiplexing - Multiplexación Espacial
SNMP	Simple Network Management Protocol - Protocolo Simple de Gestión de Red
SNR	Signal-to-Noise Ratio - Relación Señal a Ruido
SS	Subscriber Station - Estación de Suscriptor
STC	Space -Time Coding - Codificación Espacio temporal
STD	Space -Time Decoding - Decodificación Espacio temporal
SUI	Stanford University Interim - Provisionales de la Universidad de Stanford
TDD	Time Division Duplex - Duplexación por División de Tiempo
TDM	Time Division Multiplexing - Multiplexación por División de Tiempo
TDMA	Time Division Multiple Access - Acceso Múltiple por División de Tiempo
TFTP	Trivial File Transfer Protocol - Protocolo para la Transferencia de Archivos Trivial
UGS	Unsolicited Granted Services - Servicios de Asignación sin Solicitud
UL	Uplink - Enlace de Subida
UL-MAP	Mapa de UL
UPS	UL Packet Scheduling - Planificador de Paquetes del UL
VBR	Variable Bit Rate - Velocidad de Transmisión de Bit Variable
VoD	Video on Demand - Video sobre Demanda
VoIP	Voice over IP - Voz sobre IP
WCDMA	Wideband Code Division Multiple Access - Acceso Múltiple por División de Código de Espectro Ensanchado
WFQ	Weighted Fair Queueing - Encolamiento Justo Ponderado
Wi-Fi	Wireless Fidelity - Fidelidad Inalámbrica
WiMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access - Interoperabilidad Mundial para Acceso por Microondas

WirelessMAN-SC	WirelessMAN Single Carrier - MAN Inalámbrica de Portadora Única
WISP	Wireless ISP - ISP Inalámbrico
WMAN	Wireless MAN - MAN Inalámbricas
xDSL	Digital Subscriber Line - Línea de Abonado Digital

INTRODUCCIÓN

La Interoperabilidad Mundial para Acceso por Microondas (WiMAX, *Worldwide Interoperability for Microwave Access*) se ha planteado como una tecnología de acceso inalámbrico banda ancha para entornos metropolitanos, aceptada globalmente y con un desempeño superior a cualquier otra tecnología de este tipo. El estándar IEEE 802.16-2004, que define el subnivel Control de Acceso al Medio (MAC, *Medium Access Control Layer*) y el Nivel Físico (PHY, *PHYsical Layer*) para WiMAX fijo, es robusto y ha sido diseñado para aprovechar las características y variaciones espacio-temporales de los canales inalámbricos.

Sin embargo, los despliegues prácticos de WiMAX han demostrado que la teoría difiere de la práctica, y que el desempeño en cuanto a cobertura y capacidad de una implementación real es inferior a las estimaciones teóricas para entornos metropolitanos¹. Esto trae como consecuencia la necesidad de un mayor número de emplazamientos para satisfacer los requerimientos de los usuarios. Debido al costo de implementación de cada emplazamiento, se deben buscar mecanismos que mejoren la eficiencia en la utilización de los recursos radio de la red, de forma que sea posible maximizar la capacidad y cobertura de cada celda para minimizar el número de emplazamientos requeridos.

Para mejorar la eficiencia en tecnologías inalámbricas como Acceso Múltiple por División de Código de Espectro Ensanchado (WCDMA, *Wideband Code Division Multiple Access*) se han desarrollado mecanismos dinámicos para la medición, intercambio y control de parámetros relacionados con el uso de los Recursos Radio (RR, *Radio Resource*), los cuales permiten aprovechar las características propias del canal inalámbrico y de la tecnología para optimizar la capacidad y la cobertura de la red como respuesta a las variaciones de las características del canal inalámbrico y de tráfico de red. Estos mecanismos se conocen como Gestión de Recursos Radio (RRM, *Radio Resource Management*) y consisten en algoritmos y estrategias que permiten la gestión dinámica de las características radio de una tecnología inalámbrica. Además, existen técnicas de

¹ Según información técnica suministrada por personal técnico de UNE (correo:yesid.sossa@une.com.co).

antenas múltiples como las Tecnologías Avanzadas de Antena (AAT, *Advanced Antenna Technologies*) que, aunque no forman parte de RRM, se analizan debido a que permiten mejorar la capacidad y cobertura de la red, e influyen en las decisiones tomadas por los mecanismos RRM en cuanto a control de los RRs.

El presente trabajo de grado tiene como finalidad identificar los mecanismos RRM que se pueden implementar en WiMAX fijo para mejorar su desempeño en cuanto a cobertura y capacidad. Para esto, el trabajo se divide en cinco capítulos. El primer capítulo tiene como finalidad brindar una visión de las ventajas promisorias de la tecnología WiMAX, además de brindar un marco conceptual de esta tecnología y del estándar IEEE 802.16-2004. El segundo capítulo brinda una definición del concepto de RRM y de su relación con WiMAX; además, se realiza un análisis detallado de las funciones de WiMAX fijo que se pueden implementar utilizando mecanismos RRM; también se analiza el soporte que brinda el estándar IEEE 802.16-2004 y el WiMAX Forum para su implementación. El tercer capítulo consiste en la recopilación y análisis teórico de una serie de mecanismos RRM o algoritmos y estrategias que han sido propuestas por diversos autores con el fin de mejorar el desempeño de una red WiMAX fijo. Esta recopilación no es exhaustiva debido a la gran cantidad de propuestas existente para implementación de estos mecanismos, y por este motivo se eligen algunas de ellas con base en criterios que se brindan a lo largo del capítulo. El cuarto capítulo contiene un análisis de capacidad y cobertura para un caso teórico y uno de implementación real de una red. A partir de este análisis se evalúa la posibilidad de prestar un servicio con altos requerimientos como Televisión por Internet (IPTV, *Internet Protocol Television*) en los casos teórico y práctico. Finalmente se brinda una serie de recomendaciones para mejorar el desempeño en cuanto a capacidad y cobertura de una red WiMAX fijo a partir de los conceptos de diseño que se presentan en el capítulo dos, en el análisis de capacidad y cobertura teórico y real, y en el análisis de los algoritmos y estrategias RRM que se realiza en el capítulo cuatro.

1. FUNDAMENTOS DE WiMAX

El principal reto de los sistemas de comunicación inalámbricos es lograr la eficiencia, capacidad y calidad de los sistemas cableados. Los sistemas de acceso inalámbrico fijo ofrecen muchas ventajas en comparación con las soluciones cableadas tradicionales, relacionadas con bajos costos de instalación, operación y mantenimiento, fácil y rápido despliegue, flexibilidad, escalabilidad y un Retorno Rápido de la Inversión (ROI, *Return Of Investment*) [1].

WiMAX es una tecnología inalámbrica de acceso a Internet de alta capacidad (banda ancha) con una cobertura² comparable a la de una red de telefonía móvil celular y con velocidades de transmisión de datos comparables a las alcanzadas por las tecnologías de acceso cableadas como la Línea de Abonado Digital (xDSL, *Digital Subscriber Line*). WiMAX presenta una clara definición de su modelo en niveles basada en las aplicaciones de usuario, lo que sumado a sus características de Calidad del Servicio (QoS, *Quality of Service*), permiten que esta tecnología soporte diferentes tipos de servicios (voz, audio, video) de manera eficiente [2] [3].

WiMAX logra cubrir distancias de hasta 50 Km bajo condiciones de Línea de Vista (LOS, *Line Of Sight*) y hasta 8 Km bajo condiciones de No Línea de Vista (NLOS, *Non Line Of Sight*) [4]. Un concepto malinterpretado es que WiMAX puede lograr hasta 70 Mbps sobre una distancia de 50 Km. En realidad, WiMAX opera a altas velocidades de transmisión de datos o sobre largas distancias, pero no ambas: operar a una distancia de cerca de 50 Km incrementa considerablemente la Tasa de Error de Bit (BER, *Bit Error Rate*) y por lo tanto debe operar a una menor velocidad de transmisión de datos. Es importante tener en cuenta que esta velocidad de 70 Mbps se puede alcanzar con canales de 20 MHz en una topología Punto a Punto (PTP, *Point To Point*)³. Bajo muy buenas condiciones de canal, utilizando técnicas de antenas múltiples y Multiplexación Espacial (SM, *Spatial Multiplexing*) se pueden alcanzar velocidades de transmisión de datos mayores [1]. Sin embargo, el máximo ancho de banda se reduce en áreas donde los entes reguladores

² WiMAX es una tecnología pensada para entornos metropolitanos (MAN, *Metropolitan Area Network*).

³ Esta velocidad se puede lograr en distancias cortas que para el caso de PTP son generalmente inferiores a 10 Km.

sólo permiten canales de ancho de banda menores a 20MHz [5]. Típicamente, las redes fijas WiMAX cuentan con antenas direccionales de alta ganancia que permiten lograr un alcance considerable y una velocidad alta de transmisión de datos. En implementaciones comunes y con topología Punto a Multipunto (PMP, *Point to MultiPoint*)⁴, la velocidad de transmisión de datos puede alcanzar hasta 4 Mbps en el DL hasta en 800 m con WiMAX fijo. Como en la mayoría de los sistemas inalámbricos modernos, el ancho de banda disponible es compartido por los usuarios en un determinado sector radio, tal que el desempeño puede deteriorarse cuando existen muchos usuarios conectados en un sector. Debido a estas limitaciones, el consenso general es que WiMAX requiere de una arquitectura de red distribuida, lo cual incluye redes en malla (*mesh*), en grilla, (*grid*), y repetidores de estaciones remotas entre otros, lo cual extiende las redes y le permite servir como tecnología no sólo de acceso sino también de transporte [5].

WiMAX es una tecnología que está basada en el estándar IEEE 802.16-2004⁵, el cual define cuatro interfaces radio para diferentes tipos de entornos: Portadora Única (SC, *Single Carrier*) para operación con topologías PTP; OFDM-PHY que realiza asignación de RRs de forma similar a TDMA; OFDMA-PHY que realiza asignación de RRs conjuntamente en tiempo y frecuencia; y Malla. El estándar es de amplio rango⁶, incluye versiones previas (802.16-2001, 802.16c, 802.16a-2003) y cubre aplicaciones tanto para LOS como para NLOS en las frecuencias de 2-66GHz. El estándar fue ratificado en julio del 2004 y especifica el nivel PHY y el subnivel MAC para WiMAX fijo [6].

Por otra parte, el Foro WiMAX (WiMAX Forum⁷); organización liderada por la industria y sin ánimo de lucro cuya tarea principal es reunir a los fabricantes de *chips*, desarrolladores de *software*, fabricantes de equipos y Proveedores de Servicios de Internet (ISP, *Internet Service Provider*) para asegurar la compatibilidad e interoperabilidad mundial de los equipos; define una arquitectura de red extremo a extremo (*end-to-end*) y perfiles basados en el estándar para garantizar interoperabilidad entre fabricantes y equipos.

⁴ Comunicación de una BS a varias SSs.

⁵ En el presente documento se utiliza la expresión "el estándar" para referirse específicamente al estándar IEEE 802.16-2004; a menos que se especifique lo contrario.

⁶ Diseñado para brindar cobertura uniforme en áreas metropolitanas.

⁷ <http://www.wimaxforum.org/>.

Las características de WiMAX tanto del nivel PHY como del subnivel MAC y su arquitectura Completamente Protocolo de Internet (ALL-IP, *ALL Internet Protocol*) hacen viable la posibilidad de brindar al usuario servicios con requerimientos exigentes (en retardo, ancho de banda, sincronización, QoS, etc.) como el *video-streaming*⁸ e IPTV.

Existen otras características importantes a nivel técnico por las cuales WiMAX se posiciona como una opción muy adecuada, o quizás la más apropiada en ciertos casos, para cualquier operador de telecomunicaciones existente o que quiera salir al mercado y ser competitivo. Estas características se mencionan a continuación:

- **Interoperabilidad y costo-efectividad**

WiMAX goza de un extenso soporte en la industria de telecomunicaciones y en la industria de los computadores a nivel mundial. Gracias al trabajo del WiMAX Forum y al hecho de que WiMAX fijo se basa en los estándares IEEE 802.16-2004 y Red Radio de Área Metropolitana de Alto Desempeño (HiperMAN, *High performance radio Metropolitan Area Network*) del Instituto de Estándares de Telecomunicaciones Europeo (ETSI, *European Telecommunications Standards Institute*), que son estándares abiertos⁹; la interoperabilidad entre la variedad de dispositivos WiMAX está asegurada. Lo anterior incentiva la investigación, el desarrollo y la competitividad, lo cual beneficia a operadores de redes de telecomunicaciones, prestadores de servicios y usuarios en cuanto a precios más bajos en infraestructura y dispositivos [7] [8]. La estandarización facilita el transporte y uso de las Estaciones Suscriptoras¹⁰ (SS, *Subscriber Station*) en diferentes lugares y/o con diferentes proveedores de servicio.

- **Adaptación al entorno**

WiMAX soporta de manera dinámica distintos esquemas de modulación digital por Desplazamiento de Fase (PSK, *Phase Shift Keying*) y por Amplitud en Cuadratura (QAM, *Quadrature Amplitude Modulation*) dependiendo de las condiciones del canal. Además, permite balanceo de carga y análisis de la calidad del enlace¹¹ entre una Estación Base (BS, *Base Station*) y sus SSs subordinadas [9] [10].

⁸ Descarga y reproducción de video de manera simultánea.

⁹ Especificación disponible públicamente para lograr una tarea específica que garantiza que cualquiera la puede usar sin la necesidad de pagar derechos.

¹⁰ Dispositivo terminal de usuario.

¹¹ Análisis de parámetros que indican la cantidad de errores, los niveles de potencia de la señal y la relación de potencias de señal y ruido.

- **Alta velocidad de transmisión de datos**

Si las características del entorno lo permiten, el diseño y despliegue de una red WiMAX con un esquema de modulación QAM de 64 Niveles (64-QAM) permite alcanzar una alta eficiencia espectral con el fin de ofrecer altas velocidades de transmisión de datos [10]. La tecnología de Multiplexación por División de Frecuencia Ortogonal (OFDM, *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) presenta una eficiencia espectral relativamente alta, aunque esto no es definitivo debido a que depende del entorno de propagación y de otros parámetros del sistema. En el capítulo cuatro se realiza un análisis de la eficiencia espectral del sistema.

- **Operación en ambientes NLOS**

WiMAX está basado en la tecnología OFDM que tiene la capacidad de funcionar en entornos NLOS con un buen desempeño debido a que compensa los efectos de la multitrayectoria como la Interferencia Intersimbólica (ISI, *Inter-Symbol Interference*). Adicionalmente, WiMAX opera en el subrango de frecuencias de 2-11GHz del rango de 2-66GHz planteado en el estándar lo cual favorece su desempeño ante el desvanecimiento y la atenuación generada por la penetración en edificios.

- **Cubrimiento de grandes distancias**

WiMAX puede proveer enlaces PTP con velocidades de transmisión de datos equivalentes a múltiples $E1s/T1s$ (2048Kbps/1544Kbps). Por consiguiente, los operadores celulares pueden usar equipos WiMAX para enlaces de *backhaul*¹² de la red de transporte o Núcleo de Red (CN, *Core Network*) para transportar la información entre las BSs y los centros de operación, de conmutación y/o de interconexión de la red celular. Las aplicaciones de acceso inalámbrico de banda ancha de WiMAX certificado incluyen *backhauling* para redes celulares, para Redes de Área Local (LAN, *Local Area Network*) cableadas e inalámbricas, y para MAN Inalámbricas (WMAN, *Wireless MAN*), con la posibilidad de brindar Acceso Inalámbrico de Banda Ancha (BWA, *Broadband Wireless Access*) a hogares y negocios como alternativa a tecnologías xDSL o de acceso por cable [2] [7] [10]. WiMAX puede lograr grandes distancias ya que fue diseñado específicamente para tolerar mayores retardos y variaciones del mismo [11].

¹² Enlaces que transportan grandes cantidades de datos.

- **Calidad de servicio**

WiMAX define prioridades para los diferentes tipos de tráfico haciendo que el uso del canal de comunicaciones sea eficiente. Para aplicaciones que implican transmisión de datos de voz, audio y video, WiMAX provee una protección robusta, es decir, tiene la capacidad de ajustarse a las exigencias técnicas de dichas aplicaciones. Además, permite la coexistencia de tráfico con diferentes velocidades de transmisión de datos¹³. Estas características claves permiten a los Proveedores de Servicios por Internet Inalámbrico (WISP, *Wireless Internet Services Providers*) asegurar QoS a los clientes que la requieran, y cumplir con sus diferentes requerimientos.

WiMAX permite la diferenciación de servicios, o fijación de un nivel acordado de QoS, para asegurar la calidad del servicio ofrecido a los usuarios mediante Acuerdos de Nivel de Servicio (SLA, *Service Level Agreement*) entre el proveedor de servicio y el usuario final. Más aún, un proveedor de servicio puede ofrecer diferentes SLAs a diferentes suscriptores¹⁴ o hasta diferentes usuarios de una misma SS [10]. Por consiguiente, los proveedores de servicios pueden cobrar un valor adicional por la garantía de ciertas características en un determinado servicio [11].

- **Montaje y puesta en marcha en corto tiempo**

WiMAX permite la instalación y despliegue de redes de telecomunicaciones en corto tiempo, por ello se puede utilizar como red de comunicación de emergencia en zonas de desastre [2] [10].

- **Tecnología celular**

El subnivel MAC de WiMAX fue diseñado para un ambiente de acceso inalámbrico PMP.

- **Múltiples aplicaciones y flexibilidad**

WiMAX fijo soporta acceso fijo y nómada en ambientes LOS y NLOS. WiMAX fijo-nómada y el móvil pueden coexistir y masificar el uso del Internet inalámbrico. El WiMAX Forum está comprometido en proveer soluciones optimizadas para el acceso a Internet de banda ancha fijo, nómada, y móvil. Existen además varias opciones de migración disponibles

¹³ Usuarios residenciales demandan menor capacidad que usuarios empresariales.

¹⁴ Persona o entidad que paga por la prestación de un servicio (en este caso de telecomunicaciones).

para aquellos operadores que deseen cambiar de una red 802.16-2004 a una red 802.16e-2005 [6].

- **Trabajos de investigación sobre niveles que no especifica el estándar**

WiMAX es una tecnología estandarizada y definida en los niveles uno y dos del modelo de referencia para Interconexión de Sistemas Abiertos (OSI, *Open System Interconnection*) y no define conectividad en el nivel de red, o nivel 3. El IEEE brinda libertad a terceras partes para innovar y hacer recomendaciones en las implementaciones en los niveles más altos. En el mundo móvil inalámbrico los organismos de estandarización como el Proyecto de Cooperación para Tercera Generación (3GPP, *Third Generation Partnership Project*) y el Proyecto de Cooperación para Tercera Generación 2 (3GPP2, *Third Generation Partnership Project 2*) definen estándares específicos sobre las interfaces de radio y los protocolos a implementar para lograr interoperabilidad entre los equipos de múltiples fabricantes (*multi-vendor*) y para lograr interconexión con diferentes tipos de redes sin importar el fabricante de los equipos, lo que permitirá realizar operaciones de itinerancia (*roaming*¹⁵) de manera transparente.

Los vendedores y operadores han reconocido este asunto y han formado grupos adicionales de trabajo para desarrollar estándares del modelo de referencia de red y contar así con interfaces abiertas para interconexión de redes. Uno de estos es el Grupo de Trabajo de Red (NWG, *Network Working Group*) del WiMAX Forum que se enfoca en la creación de especificaciones del trabajo en red de más alto nivel para sistemas WiMAX fijos, nómadas, portables y móviles más allá de lo que está definido en el estándar 802.16 [5].

- **Arquitectura IP**

La arquitectura ALL-IP de WiMAX facilita el soporte de aplicaciones multimedia, además de que ubica la red sobre la curva de crecimiento de desempeño de los procesadores de propósito general y dispositivos de cómputo. Los equipos de cómputo avanzan mucho más rápido que los equipos de telecomunicaciones porque el *hardware* de propósito general no está limitado a los ciclos de los equipos de telecomunicaciones [5].

¹⁵ Interoperabilidad entre operadores de telecomunicaciones a nivel mundial.

1.1. MODELO DE REFERENCIA OSI PARA WiMAX FIJO

El estándar aplica el modelo OSI usado para describir los diferentes aspectos definidos para la interconexión de sistemas de telecomunicaciones.

Los dos niveles más bajos del modelo OSI son el nivel físico o nivel PHY (o nivel uno), y el nivel de enlace de datos o nivel dos. El IEEE 802 divide el nivel de enlace de datos OSI en dos subniveles llamados Control del Enlace Lógico (LLC, *Logical Link Control*) y MAC. El nivel PHY crea la conexión física entre las dos entidades que se comunican, mientras el subnivel MAC es responsable por el establecimiento y mantenimiento de la conexión (acceso múltiple, planificación, etc.).

El estándar especifica la interfaz radio de un sistema BWA fijo (FBWA, *Fixed Broadband Wireless System*) para el soporte de servicios multimedia. El subnivel MAC soporta principalmente una topología PMP; con una topología opcional en malla.

El estándar define sólo los niveles más bajos; el nivel PHY y el subnivel MAC. El subnivel MAC a su vez se divide en tres subniveles: el Subnivel de Convergencia MAC (MAC CS, *MAC Convergence Sublayer*), el Subnivel de Parte Común MAC (MAC CPS, *Common Part Sublayer*), y el Subnivel de Seguridad MAC.

1.1.1. Subnivel de Control de Acceso al Medio

Con el fin de proveer un servicio de comunicaciones confiable, funciones como procesamiento de encabezado, señalización, procesamiento de carga útil, e interoperabilidad, deben ser parte del subnivel MAC más que del nivel PHY [12].

El subnivel MAC se basa en un protocolo de solicitud-asignación para acceso al medio y soporta diferenciación de niveles de servicio. Su tarea principal es proveer una interfaz entre los niveles superiores y el nivel PHY.

Al subnivel MAC llegan paquetes del siguiente nivel más alto que son denominados Unidades de Datos del Servicio MAC (MSDU, *MAC Service Data Units*) y los organiza en Unidades de Datos del Protocolo MAC (MPDU, *MAC Protocol Data Units*) para su

transmisión inalámbrica, como se observa en la figura 1.1 [12]. En la recepción de paquetes realiza el proceso inverso [12].

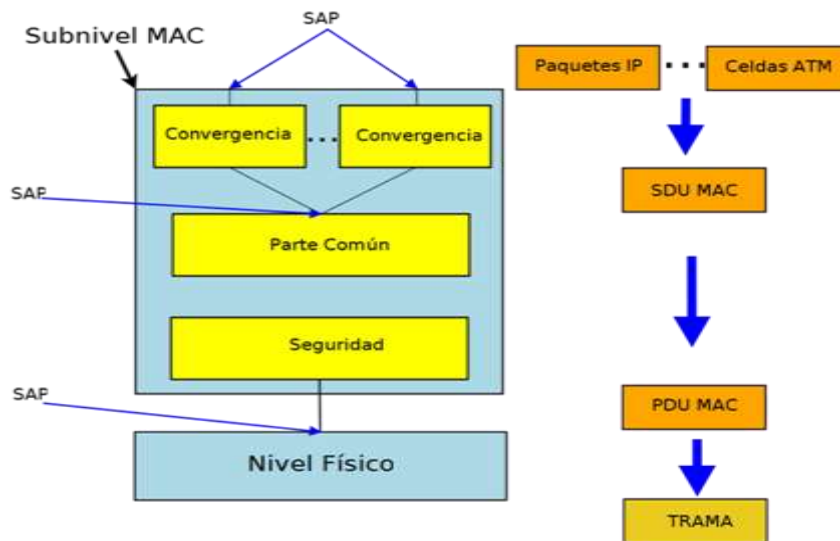


Figura 1.1. Modelo por subniveles de WiMAX/802.16.

1.1.1.1. Subnivel de Convergencia Específica del Servicio

Cada protocolo de nivel superior requiere un subnivel de convergencia para acoplarse a la ida y vuelta (*back-and-forth*) de datos con el subnivel MAC. Este subnivel de convergencia adapta los paquetes de datos de nivel superior al formato MSDU. Para el caso contrario, cuando los datos vienen de niveles inferiores, realiza una clasificación de las MSDUs y la respectiva asociación al flujo de servicio MAC y al Identificador de Conexión (CID, *Connection Identifier*).

En recepción, los datos de red externos se reciben a través del Punto de Acceso al Servicio MAC (SAP¹⁶, *Service Access Point*) del MAC CS como se observa en la figura 1.1. Estos datos son MSDUs recibidas del subnivel MAC inmediatamente inferior que es el subnivel CPS MAC [12].

El subnivel de convergencia puede interactuar con una variedad de protocolos de niveles superiores [1], tales como Modo de Transferencia Asíncrono (ATM, *Asynchronous*

¹⁶ El SAP es una ubicación conceptual en la cual un nivel (o subnivel) OSI puede solicitar los servicios de otro nivel OSI. Es un punto físico o lógico mediante el cual se puede acceder a los servicios [12].

Transfer Mode), Voz Multiplexada por División de Tiempo (TDM, *Time Division Multiplexing*), Ethernet, entre otros; como se puede apreciar en la figura 1.2 [1].

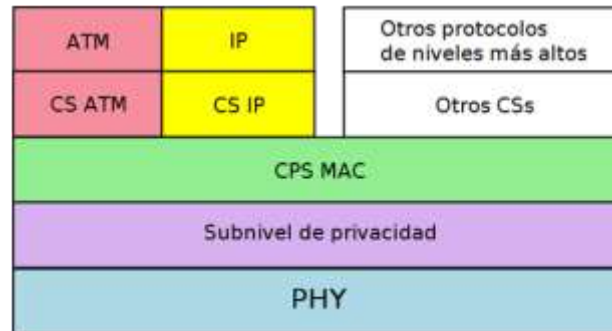


Figura 1.2. División del subnivel MAC de WiMAX fijo.

Dos tipos de subniveles de convergencia específica del servicio están definidos por el subnivel MAC del estándar, el Subnivel de Convergencia ATM definido para servicios ATM, y el Subnivel de Convergencia de Paquetes definido para servicios basados en paquetes como el Protocolo de Internet versión 4 (IPv4, *Internet Protocol version 4*) y el Protocolo de Internet versión 6 (IPv6, *Internet Protocol version 6*).

Dependiendo de los servicios, pueden residir varias aplicaciones sobre estos subniveles. Por ejemplo, la Capa de Adaptación para ATM tipo 2 (AAL2¹⁷, *ATM Adaptation Layer type 2*) en el caso de ATM, e IPv4 o IPv6 sobre Ethernet (IPoE, *IPv4 over Ethernet*) en el caso de paquetes de datos [1] [12]. Dada la predominancia de IP y Ethernet en la industria, el WiMAX Forum ha decidido soportar sólo IP y Ethernet [1] [13]. Además de proveer un mapeo hacia y desde niveles superiores, el CS MAC soporta la función de Supresión de Encabezado de Carga Útil (PHS, *Payload Header Suppression*) MSDU para reducir los *overheads*¹⁸ de niveles superiores [12].

1.1.1.2. Subnivel de Parte Común

En este subnivel, elemento central del modelo por niveles, se construyen las MPDUs, por lo tanto es el núcleo del subnivel MAC, responsable del control de los accesos al sistema

¹⁷ Clase de servicio utilizada en ATM, en este caso hace referencia a datos con velocidades de transferencia de bit variable [13].

¹⁸ Información que se adiciona a la carga útil a medida que va bajando de nivel; información de control, de direccionamiento, de detección y corrección de errores, etc. [13].

por parte de las SSs, de la asignación y gestión de ancho de banda, del establecimiento, gestión y mantenimiento de la conexión, del empaquetamiento, y de la concatenación y fragmentación de los paquetes de datos.

Este subnivel intercambia SDUs MAC con el MAC CS a través del MAC SAP y está estrechamente integrado con el Subnivel de Seguridad [12]. Se encarga además de aplicar la QoS para la planificación y la transmisión de datos sobre el nivel PHY [12]. Entre este subnivel y el nivel PHY se transfieren datos, información de control PHY y datos de estadísticas [12].

1.1.1.3. Subnivel de Seguridad

Este subnivel se encuentra relacionado con la seguridad de los datos, por lo cual es responsable de la autenticación de los datos, la encriptación y desencriptación de los mismos y el establecimiento de claves [12]. El Subnivel de Seguridad intercambia PDUs MAC con el nivel PHY.

Las BSs WiMAX implementan el subnivel MAC como se define en el estándar; una interfaz común que hace a las redes interoperables, asigna una velocidad de transmisión de datos a las SSs acorde con sus necesidades tanto para el Enlace de Subida¹⁹ (UL, *Up Link*) como para el Enlace de Bajada²⁰ (DL, *Down Link*) y en tiempo real [1] [12]. Cualquier otra operación en el UL y/o en el DL se realiza en la BS. Para el DL la BS puede asignar una velocidad de transmisión de datos a cada SS basándose en el tráfico que recibe. Para el UL, las asignaciones se hacen basadas en solicitudes de las SSs [1].

1.1.1.4. Gestión de la Calidad del Servicio

El subnivel MAC de WiMAX fue diseñado desde su comienzo para soportar altas velocidades de transmisión de datos con una QoS similar a la de ATM y a la de la Especificación de Internet para Servicios de Datos sobre Cable (DOCSIS, *Data Over Cable Service Internet Specification*) [1].

¹⁹ Sentido de transmisión de SS a BS.

²⁰ Sentido de transmisión BS a SS.

El subnivel MAC brinda soporte para QoS. QoS hace referencia al alcance de ciertos requerimientos como *throughput*²¹, tasa de error de paquetes²², retardo²³, y *jitter*²⁴, típicamente asociados a una determinada aplicación. Aparte de los requerimientos de QoS específicos de cada aplicación, las redes necesitan con frecuencia ejecutar QoS basada en políticas, tales como la prestación de servicios diferenciados a usuarios según el plan de servicio al que está suscrito [1] [11]. Es decir, este subnivel MAC brinda soporte a un gran número de usuarios con múltiples conexiones por terminal, cada una con su propio requerimiento de QoS [1].

El sistema ofrece soporte para Velocidad de Transmisión de Bit Constante (CBR, *Constant Bit Rate*), Velocidad de Transmisión de Bit Variable (VBR, *Variable Bit Rate*), flujos de tráfico en tiempo real y no tiempo real, y tráfico de datos de Mejor Esfuerzo (BE, *Best-Effort*).

WiMAX soporta 4 tipos de servicios [1]:

- Servicios de Concesión sin Solicitud (UGS, *Unsolicited Grant Service*).
- Servicios por Consulta de Tiempo Real (rtPS, *real-time Polling Services*).
- Servicios por Consulta de Tiempo No Real (nrtPS, *non-real-time Polling Services*).
- Servicios del Mejor Esfuerzo (BE).

1.1.1.4.1. Servicios de concesión sin solicitud

Servicios diseñados para soportar flujos de datos en tiempo real consistentes de paquetes de datos de tamaño fijo distribuidos en intervalos periódicos, tales como T1/E1 y Voz sobre IP (VoIP, *Voice over IP*).

1.1.1.4.2. Servicios por consulta de tiempo real

Servicios diseñados para soportar flujos de datos en tiempo real consistentes de paquetes de datos de tamaño variable que son transmitidos en intervalos periódicos, tales como

²¹ Volumen de información que fluye en las redes de datos.

²² Número de paquetes con errores por unidad de tiempo con respecto al total de paquetes transmitidos.

²³ Tiempo adicional con respecto al tiempo normal que demora un paquete en el recorrido del transmisor al receptor.

²⁴ Variación del retardo.

video en el formato del Grupo de Expertos en Imágenes en Movimiento (MPEG, *Moving Pictures Experts Group*).

1.1.1.4.3. Servicios por consulta de tiempo no real

Servicios diseñados para soportar datos tolerantes a los retardos consistentes de paquetes de datos de tamaño variable, para los cuales se requiere una velocidad de transmisión de datos mínima, tales como Protocolo para la Transferencia de Archivos (FTP, *File Transfer Protocol*).

1.1.1.4.4. Servicios de Mejor Esfuerzo

Servicios diseñados para soportar flujos de datos para los cuales no se requiere un nivel mínimo de prestación del servicio y el cual puede ser manejado bajo la política de recursos disponibles, es decir, si hay recursos disponibles se le asigna ancho de banda, en caso contrario no se transmite ningún paquete [10].

1.1.1.5. Envío de datos en el enlace de subida y en el enlace de bajada

El subnivel MAC de la tecnología WiMAX es orientado a conexión, es decir, antes del comienzo de una transmisión de datos entre los subniveles MAC de un transmisor A y de un receptor B, se establece un enlace lógico para la comunicación entre estos, por lo que todos los paquetes de datos que van del transmisor A al receptor B harán siempre el mismo recorrido mientras dure la conexión. Este enlace lógico unidireccional se conoce como una conexión entre los dos subniveles MAC. Todas las conexiones en el UL y en el DL son controladas por la BS que brinda el servicio. Las conexiones en la dirección del DL pueden ser *unicast*²⁵ o *multicast*²⁶, mientras que en la dirección del UL son sólo *unicast*.

El flujo de datos de un servicio es mapeado a una conexión y la conexión es asociada a un nivel de QoS. Cada conexión es identificada por un CID el cual sirve como una dirección temporal para transmisiones de datos sobre esa conexión particular.

²⁵ De la BS a una SS.

²⁶ De la BS a un grupo de SSs.

Además de las conexiones para la transferencia de datos de usuario, el subnivel MAC de WiMAX define tres (3) tipos de conexiones para la gestión: básica, primaria y secundaria. Estas conexiones se utilizan en funciones tales como el *ranging*²⁷ [1]. La conexión básica se utiliza para mensajes críticos de corto tiempo; la conexión primaria se utiliza para intercambiar mensajes más tolerantes al retardo y más largos, y la conexión secundaria se utiliza para mensajes de gestión de nivel más alto y datos de configuración de SS.

Cada SS viene con una dirección MAC única de 48 bits que sirve simplemente como un identificador de equipo. Durante la inicialización a cada SS se le asigna una dirección IP mediante Protocolo de Configuración Dinámica de Host (DHCP, *Dynamic Host Configuration Protocol*). Esto permite gestionar a la SS, por ejemplo, utilizando el Protocolo Simple de Gestión de Red (SNMP, *Simple Network Management Protocol*), y también permite la descarga de la configuración de la SS por vía del Protocolo Simple para la Transferencia de Archivos (TFTP, *Trivial File Transfer Protocol*) [13].

1.1.1.6. Flujo de Servicio

WiMAX define el concepto de flujo de servicio (SF, *Service Flow*) como un flujo unidireccional de paquetes con un grupo particular de parámetros de QoS que se asocia a un Identificador de Flujo de Servicio (SFID, *Service Flow Identifier*). Los parámetros de QoS pueden incluir prioridad de tráfico, velocidad máxima de transmisión de datos, velocidad máxima de ráfaga, velocidad mínima tolerable de transmisión de datos, tipo de Solicitud de Repetición Automática (ARQ, *Automatic Repeat-request*), retardo máximo, *jitter* tolerado, tipo y tamaño de MSDU, mecanismo de solicitud de ancho de banda y reglas para la formación de la MPDU de transmisión, entre otros.

La BS establece el SFID y lo mapea a CIDs únicos. Los flujos de servicios también pueden ser mapeados a puntos de código de Servicios Diferenciados (DiffServ, *Differentiated Services*) o a etiquetas del protocolo de Conmutación de Etiquetas Multi-Protocolo (MPLS, *Multi-Protocol Label Switching*) para habilitar una QoS basada en IP extremo a extremo [1].

²⁷ *Ranging* es el procedimiento que sigue una SS para adquirir la sincronización y los ajustes de potencia, de forma que sus transmisiones estén sincronizadas con la trama y dentro de los límites de potencia apropiados [12].

El estándar permite la adaptación de diferentes transmisiones mediante el uso apropiado de las características del subnivel MAC, lo cual es más eficiente que hacerlo en niveles de control que estén por encima de este subnivel [14].

El subnivel MAC de WiMAX usa MPDUs de longitud variable y ofrece flexibilidad para su transmisión de manera eficiente. Por ejemplo, múltiples MPDUs de igual o diferente longitud se pueden agregar en una sola ráfaga para disminuir el *overhead* del nivel PHY. De manera similar, múltiples MSDUs del mismo servicio de nivel superior se pueden concatenar en una sola MPDU para ahorrar información de encabezado MAC. Igualmente, MSDUs grandes se pueden fragmentar en MPDUs más pequeñas y enviarse a través de múltiples tramas [1].

1.1.2. Nivel Físico

El nivel PHY de WiMAX ha sido estandarizado teniendo en cuenta los rangos de frecuencias de 10-66 GHz para entornos LOS y de 2-11 GHz para NLOS. Cada rango tiene ciertas especificaciones a nivel técnico en la interfaz de radio. A continuación se mencionan.

- **Rango de frecuencias de 10-66 GHz**

La interfaz de radio para este rango de frecuencias se conoce como MAN Inalámbrica de Portadora Única (*WirelessMAN-SC, WirelessMAN Single Carrier*).

Debido a la topología PTP de los sistemas WiMAX, la BS transmite una señal TDM. A las SSs se les asignan intervalos o ranuras de tiempo (*time-slots*) de una manera serial. En esta banda se soportan los modos de Duplexación por División de Tiempo (TDD, *Time Division Duplexing*) que permiten comunicaciones *half-duplex*²⁸ y por División de Frecuencias (FDD, *Frequency Division Duplexing*) que permiten comunicaciones tanto *half-duplex* como *full-duplex*²⁹.

²⁸ Comunicación bidireccional no simultánea.

²⁹ Comunicación bidireccional simultánea.

- **Rango de frecuencias de 2-11 GHz**

Este rango de frecuencias se definió inicialmente en la revisión del estándar IEEE 802.16a. Tres tipos de interfaces radio se especifican para esta banda [12]:

- **WirelessMAN-SC2**, que utiliza un formato de portadora única.
- **WirelessMAN-OFDM**, que usa OFDM con una Transformada Rápida de Fourier (FFT, *Fast Fourier Transform*) de tamaño 256³⁰.
- **WirelessMAN-OFDMA**, con Acceso Múltiple por División de Frecuencia Ortogonal (OFDMA, *Orthogonal Frequency Division Multiple Access*) que utiliza OFDM con una FFT de 2048.

El DL en WiMAX opera en modo TDM. En el UL las SSs comparten la capacidad del enlace según su demanda [13]. En el UL se utiliza un Acceso Múltiple por División de Tiempo (TDMA, *Time Division Multiple Access*) complementado con OFDM dado que varias SSs pueden transmitir por el mismo canal.

Estas dos últimas interfaces se pueden utilizar para operación fija, pero no de manera conjunta. OFDMA es más compleja, pero permite soportar capacidades opcionales como AAT, subcanalización para la gestión de interferencia, etc. Sin embargo, el WiMAX Forum sólo ha definido perfiles que utilizan PHY-OFDM y no PHY-OFDMA. Ambas interfaces tienen similitudes, pero se caracterizan por la forma del acceso, como se observará posteriormente en este capítulo. Las asignaciones en las tramas para OFDM son similares a TDM, en donde sólo se asignan símbolos con todas las frecuencias para una SS. En OFDMA, las asignaciones en la trama se asemejan más a un rompecabezas rectangular en donde una asignación se puede distribuir entre varios símbolos OFDM y subcanales.

Un subnivel MAC basado en contienda que ganó mucha popularidad en aplicaciones LAN es el Acceso Múltiple por Detección de Portadora (CSMA, *Carrier Sense Multiple Access*). En CSMA, cada nodo que tiene datos para enviar, debe primero revisar el canal de transmisión. El propósito es minimizar la posibilidad de que se presente colisión de datos, maximizando así el *throughput*. Una variación de CSMA es el CSMA con Detección de Colisiones (CSMA/CD, *CSMA with Collision Detection*), donde cada nodo revisa el canal al mismo tiempo que transmite y de esta forma determina si hubo una colisión al transmitir la información. Si se presenta alguna diferencia entre lo que se envió y lo que se escucha,

³⁰ El tamaño de la FFT indica el número de subportadoras.

el nodo en cuestión concluye que se ha presentado una colisión y no transmite. El estándar Ethernet IEEE 802.3 recomienda el uso de CSMA/CD, pero este no es particularmente adecuado para aplicaciones inalámbricas. Otra variación de CSMA es CSMA con Evasión de Colisión (CSMA/CA, *CSMA with Collision Avoidance*), el cual es más apropiado para aplicaciones inalámbricas, debido a que es más eficiente en el consumo de energía por los dispositivos de usuario.

La necesidad de alta eficiencia espectral de WiMAX excluye la utilización de CSMA, ya que la eficiencia de un subnivel MAC orientado a conexión se puede aproximar al 90%, pero en los sistemas inalámbricos basados en CSMA la eficiencia es de 50 % o menos [1]. El acceso inicial a la red en una red WiMAX fijo se basa en una consulta (*polling*), es decir, la BS pregunta frecuentemente a las SSs si requieren ancho de banda para transmisión [15]. Este método se considera más eficiente que CSMA/CA cuando la distancia entre la BS y la SS es considerablemente alta [15].

1.1.2.1. Multiplexación por División de Frecuencia Ortogonal

El nivel PHY de WiMAX fijo está basado en OFDM. OFDM es el esquema de transmisión escogido para permitir datos de alta velocidad y se utiliza en una gran variedad de sistemas de banda ancha comercial incluyendo DSL, Wi-Fi³¹ (*Wireless Fidelity*), DVB-H³² y MediaFLO³³.

OFDM pertenece a una familia de esquemas de transmisión llamada Modulación Multiportadora (MCM, *Multi-Carrier Modulation*), la cual se basa en la división de un flujo binario de datos de alta velocidad en varios flujos paralelos con velocidad de bit menor, para modular portadoras separadas llamadas comúnmente subportadoras o tonos [1]. Esto es un componente básico para la eliminación de la ISI.

OFDM se basa en la Multiplexación por División de Frecuencia (FDM, *Frequency División Multiplexing*), una tecnología que utiliza múltiples frecuencias para transmitir de manera simultánea múltiples señales en paralelo. OFDM es similar a FDM, pero con mayor

³¹ Tecnología utilizada para la transmisión de datos sobre redes LAN inalámbricas (*Wireless LANs*).

³² *Digital Video Broadcasting Handheld*, Difusión de Video Digital para Dispositivos de mano o Portátiles. Es un estándar abierto desarrollado por DVB (*Digital Video Broadcasting*) que es una organización que promueve internacionalmente estándares de televisión digital [1].

³³ *Media-Forward Link Only*, Flujo de Medios Sólo Hacia Adelante. Tecnología desarrollada por la empresa de Qualcomm para la radiodifusión de televisión móvil y datos a dispositivos portátiles. Se utiliza sólo en los Estados Unidos.

eficiencia espectral ya que el espaciamiento entre los subcanales es menor. De hecho, el ancho de banda requerido se reduce bastante ya que se remueven las bandas de guarda y se permite el traslape espectral entre las señales haciendo que los máximos de los espectros de las mismas coincidan con los nulos de sus adyacentes, logrando así la ortogonalidad entre ellas como se observa en la figura 1.3 [18]. Sin embargo, este uso eficiente del ancho de banda mediante el traslape ortogonal de subportadoras adyacentes incrementa la sensibilidad al Corrimiento en Frecuencia³⁴ (*frequency-offset*) [18].

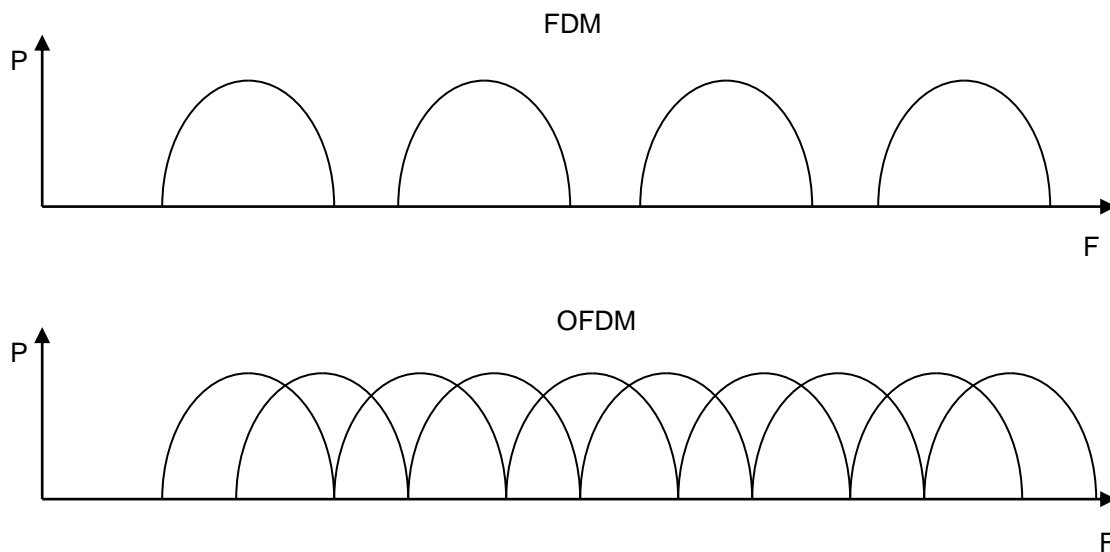


Figura 1.3. Comparación de OFDM con FDM.

Con el fin de evitar el requerimiento de L generadores de señales de Radio-Frecuencia (RF, *Radio-Frequency*), o radios, en el transmisor y en el receptor, considerando L el número de subportadoras, OFDM utiliza una técnica computacional eficiente conocida como Transformada Discreta de Fourier (DFT, *Discrete Fourier Transform*) la cual a su vez permite la implementación de la Transformada Rápida de Fourier (FFT, *Fast Fourier Transform*) y de la Transformada Rápida de Fourier Inversa (IFFT, *Inverse Fast Fourier Transform*). La FFT y la IFFT permiten la generación de una multitud de subportadoras ortogonales usando un solo radio [1]. La utilización de las técnicas DFT, FFT e IFFT junto con la convolución circular y la adición de un prefijo cíclico, permiten una transmisión OFDM robusta contra la ISI.

³⁴ Diferencia entre una frecuencia referencia, en este caso la frecuencia de subportadora, y la frecuencia de la señal recibida.

1.1.2.1.1. Convolución Circular

Cuando un flujo de datos de entrada $x[n]$ se envía a través de un canal $h[n]$ con una Respuesta al Impulso Finita (FIR, *Finite Impulse Response*) lineal e invariante en el tiempo, la salida $y[n]$ es la convolución lineal de la entrada y el canal.

$$y[n] = x[n] * h[n] \quad (1.1)$$

Ahora, aplicando una convolución circular se tiene que,

$$y[n] = x[n] \circledast h[n] = h[n] \circledast x[n] \quad (1.2)$$

En el caso de la convolución circular es posible tomar la DFT de la salida del canal $y[n]$.

$$DFT\{y[n]\} = DFT\{h[n] \circledast x[n]\} \quad (1.3)$$

Lo cual en el dominio de la frecuencia se denota como el producto,

$$Y[m] = H[m]X[m] \quad (1.4)$$

Es decir, mediante la DFT de una convolución circular en el dominio del tiempo se puede llegar a un simple producto en el dominio de la frecuencia. Entonces, con el conocimiento de la respuesta en frecuencia del canal $H[m]$ en el receptor, es fácil recuperar el símbolo OFDM de entrada por el simple cálculo:

$$X'[m] = \frac{Y[m]}{H[m]} \quad (1.5)$$

Donde el valor $X'[m]$ estimado será por lo general imperfecto debido al Ruido Blanco Gaussiano Aditivo (AWGN, *Additive White Gaussian Noise*), a la Interferencia Cocanal (CCI, *Co-Channel Interference*), a la estimación imperfecta del canal y otras imperfecciones.

1.1.2.1.2. Prefijo Cíclico

El Prefijo Cíclico (CP, *Cyclic Prefix*) es el que permite el uso de la FFT y la IFFT ya que es un grupo de bits igual a la primera parte de la trama transmitida, lo que hace que el canal

parezca circular o con información repetida para facilitar la convolución circular. En la figura 1.4 [18] se observa la adición del CP al símbolo OFDM.

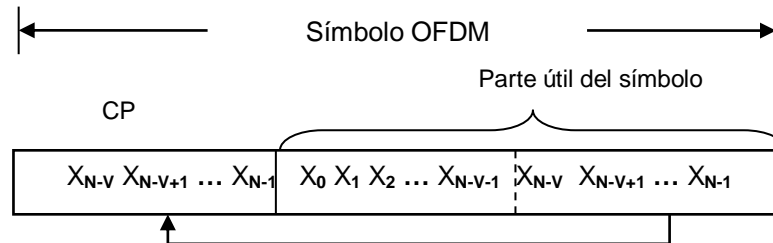


Figura 1.4. Prefijo cíclico de OFDM.

Si la dispersión máxima del retardo del canal tiene una duración de $v+1$ símbolos de datos, la adición de un intervalo de guarda de al menos v símbolos de datos entre los símbolos OFDM hace cada símbolo OFDM independiente de aquellos que vienen antes o después de él.

El CP trae consigo pérdidas en el uso eficiente del ancho de banda dado que el ancho de banda requerido para OFDM se incrementa por un factor de $(N + v)/N$. Además, se debe tener en cuenta la energía requerida para la transmisión de v símbolos, los cuales son descartados en el receptor. Esta pérdida de potencia se puede expresar por la relación $10 \log_{10} [(N + v)/N] \text{ dB}$. Sumado a lo anterior está la adición de bits de *overhead* que trae consigo el CP.

1.1.2.2. PHY-OFDM de WiMAX fijo

Para la versión fija de WiMAX, el tamaño de la FFT es de 256 y es fijo. Este tamaño de la FFT indica el número de subportadoras utilizadas por OFDM. De estas 256 subportadoras 192 se utilizan para transportar datos, 8 se utilizan como subportadoras piloto para propósitos de estimación de canal y sincronización, y el resto se utilizan como bandas de guarda³⁵. Las subportadoras piloto se modulan siempre con PSK Binaria (BPSK, *Binary PSK*) y las subportadoras de datos con BPSK, PSK Cuaternaria (QPSK, *Quadrature PSK*), modulación QAM de 16 niveles (16-QAM) y de 64 niveles (64-QAM) [12].

³⁵ Espacios entre subportadoras para disminuir la probabilidad de que se presenten interferencias.

1.1.2.3. Subcanalización

Las subportadoras disponibles se pueden dividir en varios grupos de subportadoras llamados subcanales. El WiMAX fijo basado en una PHY OFDM permite una forma limitada de subcanalización en el UL solamente. El estándar define 16 subcanales donde 1, 2, 4, 8, o todos se pueden asignar a una SS. Las 192 subportadoras OFDM se distribuyen en 16 subcanales de 12 subportadoras cada uno. Cada subcanal se compone de 4 grupos de 3 subportadoras adyacentes [19]. En la figura 1.5 [19] se puede observar de manera clara la subcanalización y la distribución de los tipos de subportadoras que se presentan en OFDM.

Este uso de OFDM como método de acceso múltiple se denomina OFDMA. En la versión IEEE 802.16e se incluyeron recomendaciones para subcanalización en el DL.

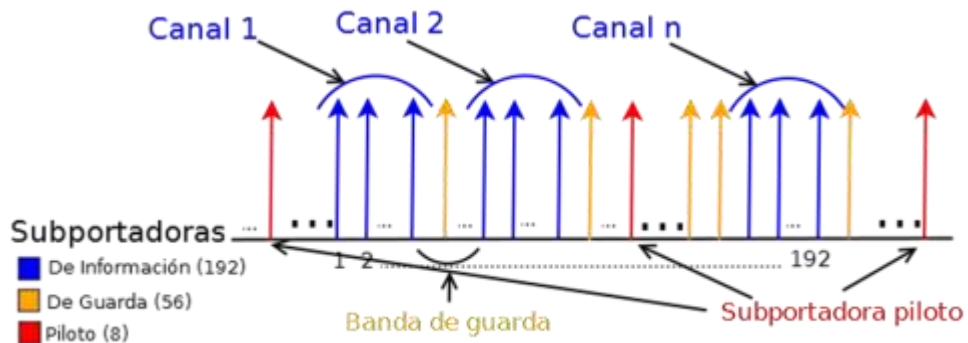


Figura 1.5. Subcanalización para la PHY OFDM de WiMAX fijo.

1.1.2.4. PHY-OFDMA de WiMAX fijo

En OFDMA, como ya se mencionó en la sección 1.1.2.3., las subportadoras OFDM se separan en subgrupos de subportadoras, y cada subgrupo representa un subcanal. En el DL, un subcanal puede ser utilizado para transmitir información a diferentes SSs. En el UL se le pueden asignar a una SS uno o más subcanales para que transmita a la BS.

Las subportadoras que forman un subcanal pueden o no ser adyacentes. Si son adyacentes, tal como se observa en la figura 1.6 [19], se favorece la utilización de la Modulación y Codificación Adaptativas (AMC, *Adaptive Modulation and Coding*) gracias a

la diversidad multiusuario³⁶ que permite el análisis del comportamiento del canal y la asignación de la modulación y la codificación apropiadas para establecer el mejor balance entre *throughput* y robustez³⁷ del enlace. En el caso contrario, cuando las subportadoras de los subcanales están distribuidas de manera pseudoaleatoria³⁸ como se observa en la figura 1.6, se favorece la diversidad en frecuencia que brinda robustez frente al desvanecimiento selectivo en frecuencia, ya que el desvanecimiento selectivo en frecuencia afectaría sólo a una(s) de las subportadoras del subcanal, pero no todas gracias a su distribución [1] [19].

La asignación de subportadoras adyacentes se considera más adecuada para entornos de propagación fija o nómada, mientras que la subcanalización con portadoras distribuidas se considera apropiada para entornos móviles.

La ventaja clave de OFDM sobre los esquemas de portadora única es la eficiencia en el uso de la banda de frecuencias disponible, lo cual conlleva a un *throughput* mayor sobre el enlace [9]. También evita las complejidades de la ecualización adaptativa³⁹, ya que la composición de múltiples portadoras ortogonales entre sí de OFDM hace que el desvanecimiento selectivo en frecuencia afecte sólo a un subgrupo de portadoras; lo que hace más simple el proceso de ecualización; mientras que en un sistema de portadora única la señal portadora debe ser ecualizada con técnicas adaptativas muy complejas [4] [20].

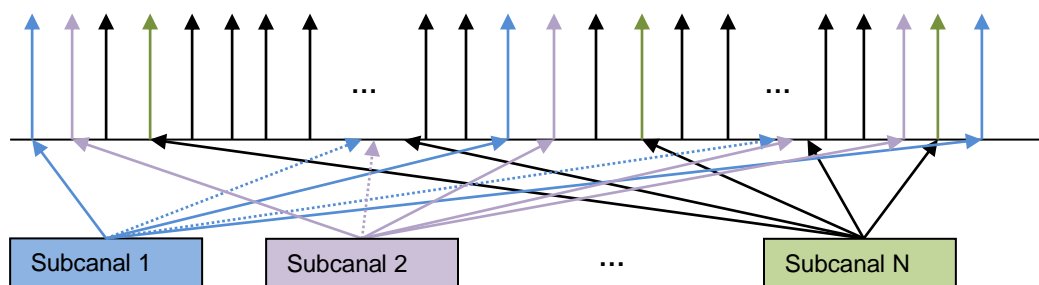


Figura 1.6. Subcanalización con subportadoras distribuidas.

³⁶ La diversidad multiusuario consiste en que en un sistema inalámbrico con múltiples usuarios, es probable que al menos uno de ellos experimente las mejores condiciones del canal. La asignación de subcanales a los usuarios se realiza según su respuesta en frecuencia; tratando de maximizar la SINR recibida. El desvanecimiento selectivo en frecuencia afectaría todas las subportadoras del subcanal dado que son adyacentes y están muy cercanas la una con la otra [1].

³⁷ Resistencia de la señal portadora de la información a los fenómenos físicos que la puedan afectar y distorsionar la información que lleva.

³⁸ Con la ayuda de un algoritmo específico para este proceso.

³⁹ Sistema empleado en la recepción RF para la recuperación de la información.

Por todas estas razones, estándares internacionales como IEEE 802.16, las Redes de Acceso Radio de Banda Ancha especificadas por ETSI (ETSI BRAN, *ETSI Broadband Radio Access Networks*), y el Instituto de Investigación en Telecomunicaciones y Electrónica (ETRI⁴⁰, *Electronic and Telecommunications Research Institute*), han establecido OFDM como la técnica de transmisión preferida [4].

En el estándar, a medida que se conectan más usuarios a la red el *throughput* individual disminuye linealmente, dado que deben compartir el ancho de banda disponible. Esta disminución es mucho menor que la experimentada en el estándar IEEE 802.11. A esta habilidad se le conoce como acceso múltiple eficiente [1].

1.2. ESCENARIOS TÍPICOS DE DESPLIEGUE DE WIMAX FIJO

Según la finalidad de la conexión o las conexiones a realizar mediante el uso de la tecnología WiMAX fijo, si la conexión es NLOS o LOS, y las topologías PMP o PTP, se presentan los siguientes escenarios típicos de la tecnología WiMAX fijo:

- **Backhaul.** Transporte PTP para conectar BSs separadas por largas distancias. Por ejemplo *backhaul* de banda ancha para emplazamientos celulares, lo que constituye las redes de transporte.
- **Acceso (Último kilómetro).** Suscriptores residenciales y de negocios conectados bajo una arquitectura celular.
 - **Servicios de T1 y E1.** Para pequeños negocios y empresas.
 - **Hotzone.** Cobertura de grandes áreas con acceso de banda ancha.
- **Backup.** Enlaces de protección o resguardo, por ejemplo, para las transmisiones por enlaces de fibra óptica.

1.3. PERFILES DEL WIMAX FORUM

Se debe hacer consideración de los perfiles establecidos por el WiMAX Forum para WiMAX fijo al momento de la planificación de una red basada en esta tecnología para lograr una armonía eficiente con los productos existentes en el mercado. Los perfiles para WiMAX fijo establecidos por el WiMAX Forum se resumen en la tabla 1.1 [6].

⁴⁰ Instituto de investigación sin ánimo de lucro en tecnologías de la información del gobierno coreano creado en 1976.

Tabla 1.1. Perfiles para WiMAX fijo.

Banda de Frecuencia (GHz)	Ancho de banda del canal (MHz)	Tamaño de la FFT de OFDM	Duplexación
3.5GHz	3.5MHz	256	FDD
	3.5MHz	256	TDD
	7MHz	256	FDD
	7MHz	256	TDD
5.8GHz	10MHz	256	TDD

1.4. CONCLUSIÓN DEL CAPÍTULO

En este capítulo se brindan los fundamentos de WiMAX fijo a partir del análisis de las debilidades, fortalezas y oportunidades de esta tecnología para implementar redes FBWA, y del análisis del modelo en niveles y subniveles OSI del estándar IEEE 802.16-2004, el cual especifica el subnivel MAC y el nivel PHY de la tecnología. Estos fundamentos brindan la base teórica para la construcción de los capítulos subsiguientes.

2. RRM EN WIMAX

En el presente capítulo se realiza una descripción de los conceptos de RRM y se analiza la aplicación de mecanismos RRM para lograr una compensación dinámica de parámetros y mejorar el desempeño de una red WiMAX fija, en respuesta a la variación de las condiciones del canal inalámbrico y de la red junto con el soporte y las oportunidades que brinda el estándar IEEE 802.16-2004 y el WiMAX Forum para su implementación.

2.1. EL CONCEPTO DE RRM

La capacidad sufre variaciones debido a características de los niveles PHY y MAC. A nivel MAC la capacidad varía principalmente por:

- El comportamiento del tráfico y la carga de la red.
- Los diversos requerimientos de los servicios.
- Las características del estándar.

A nivel PHY la capacidad varía principalmente por:

- El comportamiento dinámico del canal inalámbrico en respuesta a parámetros ambientales, de ruido eléctrico, de desvanecimiento y de interferencia.
- La flexibilidad en los rangos de valores de parámetros que define el estándar.
- La utilización de AMC en UL y DL y el control dinámico de potencia.

Para optimizar la capacidad de la red como respuesta a las variaciones dinámicas de las características de los niveles PHY y MAC se implementan mecanismos RRM. RRM se puede definir como “la medición, intercambio y control de indicadores relacionados con los RR en una red inalámbrica” [21]. Los mecanismos RRM consisten en estrategias y algoritmos para la gestión de características radio que influyen en el desempeño y en la asignación de los RR de la red. Un RR se define como el conjunto de símbolos OFDM, potencia, modulación, codificación y subportadoras que se asignan a una transmisión [22] [19-21]. El Control de Recursos (RC, *Resource Control*) se define como el conjunto de mecanismos que establecen y modifican valores de los parámetros de la interfaz radio,

relacionados con el Grado de Servicio (GoS, *Grade of Service*) de una llamada de voz o con la QoS de una sesión de datos. RRM se aplica en sistemas multi-celda y multi-usuario con esquemas de reuso limitados por CCI más que por ruido.

2.2. RRM EN WiMAX

Aunque existe literatura relacionada [21] [1] [22-28], ningún autor brinda una definición estándar de RRM o de su aplicación en WiMAX. El estándar no menciona el concepto de RRM, aunque las revisiones 802.16g [22-23] y 802.16m [30] posteriores al estándar definen funciones de información específicas para RRM; además, el WiMAX Forum define en [26] la arquitectura de RRM como parte de la arquitectura de red de WiMAX.

A partir de la literatura citada se extrae entonces una serie de mecanismos RRM que se aplican para una red WiMAX fijo y se listan a continuación.

- Adaptación del enlace.
- Control de potencia.
- Control de admisión.
- Planificador.
- Gestión de interferencia.

Aunque las AAT no se consideran como parte de RRM, forman parte de la presente investigación debido a que su utilización permite mejorar la capacidad y la cobertura de la red, y en consecuencia afecta las decisiones tomadas por los mecanismos RRM.

2.2.1. Adaptación del Enlace

La codificación de los datos que ingresan al nivel PHY se compone de tres etapas: aleatorizador (*randomizer*) que evita largas cadenas de unos y ceros; Corrección de Error Hacia Adelante (FEC, *Forward Error Correction*) para corrección de errores; y entrelazado (*interleaving*) que evita que bits codificados consecutivos no se modulen en la misma subportadora protegiendo a los datos contra ráfagas de errores por desvanecimiento selectivo en frecuencia. Los bits codificados se modulan en subportadoras sobre las cuales se aplica el operador IFFT para crear el símbolo OFDM.

El estándar utiliza Modulación y Codificación Adaptativa (AMC, *Adaptive Modulation and Coding*) para modificar dinámicamente el Esquema de Modulación y Codificación (MCS, *Modulation and Coding Scheme*) variando la tasa del FEC y la modulación de las subportadoras según las condiciones de BER y SNR del canal.

La codificación FEC se forma con la concatenación de un código bloque de redundancia cíclica Reed-Solomon (RS) a nivel externo y un Código Convolutivo (CC, *Convolutional Code*) compatible a nivel interno. Opcionalmente se utiliza la Codificación Turbo Bloque (BTC, *Block Turbo Coding*) y la Codificación Turbo Convolutiva (CTC, *Convolutional Turbo Coding*) que tienen mejor desempeño en la corrección de errores con el costo de la complejidad. BTC es producto de la combinación de códigos Hamming binarios extendidos o de códigos de paridad. El CTC utiliza un código convolutivo sistemático recursivo circular binario doble. En la tabla 2.1 [12] se muestran los tamaños de bloque antes y después del codificador RS y la tasa de codificación del CC.

La modulación de las subportadoras depende de la SNR en el receptor. 64-QAM logra mayor eficiencia espectral⁴¹ pero requiere una SNR mayor que las demás modulaciones para que el receptor pueda decodificar correctamente los símbolos de modulación en el receptor. 16-QAM, QPSK y BPSK ofrecen menor eficiencia espectral que 64-QAM pero tiene requerimientos menores de SNR.

El mecanismo AMC modifica dinámicamente el MCS de un enlace para optimizar la capacidad en respuesta a la variación de las condiciones de propagación y es de utilidad en canales afectados por desvanecimiento. Un MCS más eficiente logra mayor capacidad por ancho de banda (eficiencia espectral) pero es más susceptible al ruido y a la interferencia, por lo que requiere una SNR más alta para mantener una BER determinada. La tabla 2.2 [12] resume los MCSs que se utilizan en WiMAX y la cantidad de bits transmitidos por símbolo de modulación⁴², la cantidad útil de bits transmitidos por subportadora y la SNR requerida.

⁴¹ La eficiencia espectral de 64-QAM, 16-QAM, QPSK y BPSK es 3, 2, 1 y 0.5 bps/Hz respectivamente.

⁴² Un símbolo de modulación hace referencia a un punto de la constelación de modulación. No se debe confundir con un símbolo OFDM.

Tabla 2.1. Codificación FEC.

Modulación	Código RS	Tasa de codificación Convolutacional	Tamaño de bloque sin codificar	Tamaño de bloque codificado	Tasa total de codificación
BPSK	(12,12,0)	1/2	12	24	1/2
QPSK	(32,24,0)	2/3	24	48	1/2
QPSK	(40,36,2)	5/6	36	48	3/4
16-QAM	(64,48,8)	2/3	48	96	1/2
16-QAM	(80,72,4)	5/6	72	96	3/4
64-QAM	(108,96,6)	3/4	96	144	2/3
64-QAM	(120,108,6)	5/6	108	144	3/4

Tabla 2.2. Resumen de MCS, bits/símbolo, bits útiles transmitidos y SNR.

Modulación	Bits/símbolo de modulación	Tasa total de codificación	Bits transmitidos por subportadora	SNR requerida
BPSK	1	1/2	0.5	6.4
QPSK	2	1/2	1	9.4
QPSK	2	3/4	1.5	11.2
16-QAM	4	1/2	2	16.4
16-QAM	4	3/4	3	18.2
64-QAM	6	2/3	4	22.7
64-QAM	6	3/4	4.5	24.4

El Estándar no define de forma explícita los algoritmos de adaptación del enlace pero si define los requerimientos y la funcionalidad de soporte para su implementación. AMC utiliza las medidas de calidad del canal del Indicador de Intensidad de Señal Recibida (RSSI, *Receive Signal Strength Indicator*)⁴³ y la Relación Portadora a Ruido e Interferencia (CINR, *Carrier to Interference-plus-Noise Ratio*)⁴⁴ para elegir el MCS más apropiado de cada enlace UL y DL entre la BS y las SSs independientemente. En TDD se utiliza la misma frecuencia en el UL y DL de forma que mismas condiciones que mide la BS en el UL se asumen para el DL. En FDD las frecuencias de UL y DL son diferentes y no se puede asumir las mismas condiciones en ambos sentidos. En este caso la BS estima la calidad del canal para el UL realizando mediciones en recepción, mientras que para el DL se obtiene realimentando las mediciones realizadas en recepción por la SS. La SS también puede comparar estas mediciones con valores internos de referencia para

⁴³ RSSI y CINR son mediciones de calidad de canal establecidas en el estándar que se comunican de SS a BS para efectos de control dinámico de parámetros radio.

⁴⁴ En el estándar se utiliza el valor de SNR para realizar cálculos de la sensibilidad requerida en el receptor para decodificar correctamente los símbolos de una modulación. Se debe tener en cuenta que en la práctica se debe considerar la CINR para cálculos.

solicitar cambio de MCS cuando se requiera. La figura 2.1 muestra un ejemplo del esquema de funcionamiento de adaptación del enlace que muestra el empleo de cuatro MCS diferentes según su proximidad a la estación base y las condiciones de propagación.

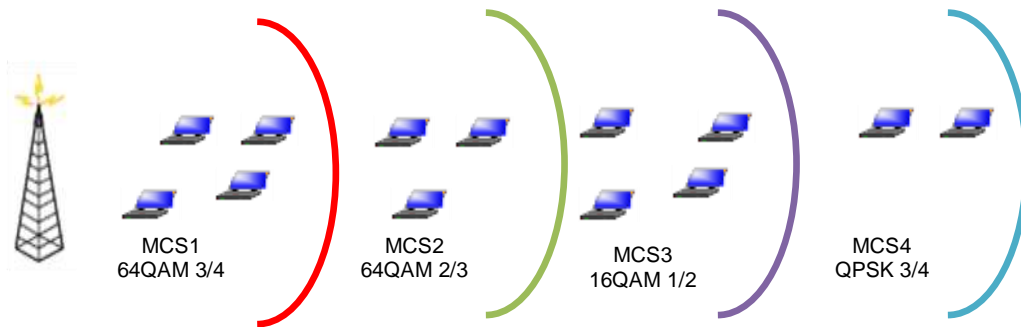


Figura 2.1. Esquema de funcionamiento del mecanismo de adaptación del enlace.

2.2.2. Control de Potencia

El mecanismo de control de potencia se utiliza para mejorar el desempeño individual de cada SSs y para controlar los niveles de interferencia global en un ambiente multicelda y multiusuario. La BS envía comandos de control de potencia a cada SS para regular el nivel de potencia de transmisión con base en un control realimentado de lazo cerrado, de forma que la potencia de transmisión del suscriptor se pueda mantener en un nivel suficiente para una comunicación confiable, pero evitando un aumento innecesario de la interferencia sobre otras SSs y BSs.

La BS puede elegir entre modificar la potencia de transmisión o el MCS que se asigna a un enlace como respuesta a la variación de las condiciones del canal. En distancias relativamente grandes y en canales con desvanecimiento, la BS incrementa la potencia de transmisión para mantener la SNR requerida en recepción siempre y cuando la CCI que genere no sea significativa; de otro modo, la BS elige utilizar una modulación con menor eficiencia espectral, aunque esto traduce en mayor consumo de símbolos OFDM y/o subportadoras por parte del usuario para satisfacer los mismos requerimientos. Por otra parte, en mejores condiciones del enlace una SS puede utilizar modulaciones más eficientes o reducir la potencia de transmisión.

El estándar no especifica un algoritmo de control de potencia, pero si los lineamientos para que el fabricante defina su implementación. El objetivo del algoritmo de control de potencia es llevar la potencia total recibida de una SS a un nivel deseado. En el UL el algoritmo de control de potencia debe implementar procedimientos de ajuste inicial y periódico de potencia evitando la pérdida de datos. Cuando se utiliza subcanalización, no todos los usuarios tienen asignadas la misma cantidad de subportadoras y el algoritmo debe mantener constante la relación entre la potencia total recibida en la BS y el número de subportadoras activas en la transmisión. La SS también debe mantener esta relación sin necesidad de un control adicional por parte de la BS.

Las decisiones de control de potencia dependen de la información de RSSI y CINR. Los valores se comparan con niveles de referencia y la diferencia resultante se realimenta a la SS y BS según corresponda para propósitos de ajuste de potencia. El algoritmo debe diseñarse para soportar atenuaciones o fluctuaciones de potencia a velocidades de 30dB/segundo con variaciones de al menos 10dB [12]. También se debe tener en cuenta la interacción entre el amplificador de potencia y los diferentes MCS de modo que no se saturen los amplificadores de potencia RF ni se violen los límites de potencia establecidos cuando se cambia entre distintos MCS. Cada SS reporta a la BS su potencia total actual y la potencia máxima disponible para cada una de las modulaciones. La BS utiliza esta información para asignar el MCS, ajustar el nivel de potencia y asignar subcanales cuando se soporta subcanalización. Los valores de potencia de transmisión se deben reportar como mensajes de gestión MAC en pasos de control de 0.5dBm en un rango desde -64dBm hasta +63.5dBm. En algunas situaciones la SS debe corregir su nivel de potencia de transmisión sin control previo por parte de la BS.

2.2.3. Asignación de Recursos

Las redes inalámbricas operan en medios compartidos y requieren mecanismos para gestionar de forma efectiva el acceso de los usuarios a los recursos limitados de la red. El estándar no especifica el algoritmo de asignación de recursos pero especifica que se debe alojar en un planificador (*scheduler*) que se ubica en el subnivel CPS MAC de la BS y de la SS, y define los requerimientos para su implementación.

En el DL, el planificador de la BS determina los recursos que se asignan a cada usuario. En el UL los recursos se asignan mediante un mecanismo de solicitud-asignación. Las SSs utilizan mecanismos que define el estándar para transmitir solicitudes de recursos al planificador de la BS, el cual se encarga posteriormente de asignar los recursos en el UL. La BS también puede implementar un mecanismo de control de admisión que funcione en conjunto con el planificador para asegurar recursos de las nuevas conexiones.

El planificador, los mecanismos de solicitud de ancho de banda y el control de admisión constituyen tres mecanismos diferentes para garantizar QoS en WiMAX, y tienen un gran impacto en la forma en que opera el sistema, en su desempeño respecto a capacidad y cobertura y en los servicios que puede desplegar.

2.2.3.1. Control de admisión

El Control de Admisión de Conexión (CAC, *Connection Admission Control*) es un mecanismo que se implementa en el subnivel MAC como parte del esquema QoS en WiMAX. Cada vez que una SS requiere establecer una nueva conexión debe realizar una consulta al CAC para determinar si los recursos radio existentes pueden satisfacer los requerimientos QoS de esa conexión sin que exista detrimento en cualquiera de las conexiones previamente establecidas [1] [19].

De manera general, el CAC determina la capacidad disponible después de realizar todas las asignaciones previas y realiza un cálculo sobre la capacidad restante para determinar si puede soportar los requerimientos de una nueva conexión con base en parámetros QoS definidos para el servicio como retardo, velocidad mínima de transmisión de datos, etc. Diferentes autores como [27-29] realizan su propia definición e implementación de las reglas que debe utilizar el CAC para aceptar o rechazar una nueva conexión.

2.2.3.2. Solicitud de ancho de banda

Una SS solicita recursos para cada conexión de forma independiente. Los mecanismos de solicitud de ancho de banda dependen del tipo de servicio de la conexión. Las solicitudes de ancho de banda se realizan utilizando mensajes de gestión MAC que consisten en un encabezado sin carga útil, o también mediante un subencabezado dentro de la carga útil

de una transmisión de datos, esta última opción se conoce como solicitud *piggyback*⁴⁵. Una asignación de ancho de banda consiste en un grupo de símbolos OFDM, potencia, modulación y codificación (además de subcanales en OFDMA) que se utilizan para la transmisión de datos. Adicionalmente, cuando se utilizan AAT existe la opción de realizar asignaciones simultáneamente a dos SSs separadas espacialmente, en cuyo caso la asignación se realiza también en el espacio.

Para servicios UGS la BS asigna ancho de banda constante en intervalos de tiempo periódicos para transmisión de datos sin requerir señalización adicional entre SS y BS. El encabezado de los paquetes en el UL tiene dos bits especiales: Indicador de Deslizamiento (SI, *Slip Indicator*) y Consúltame (PM, *Poll Me*). El bit SI se utiliza para solicitar ancho de banda adicional cuando la cola de transmisión se encuentra llena mientras las condiciones que produjeron el llenado se normalizan. El segundo bit, PM, se utiliza cuando la SS debe solicitar ancho de banda para otras conexiones no UGS.

Para servicios rtPS la BS asigna oportunidades de transmisión a la SS en intervalos periódicos de tiempo para que realice solicitudes de ancho de banda por la cantidad de bytes que requiera transmitir. A diferencia de UGS, éste mecanismo requiere señalización y permite el manejo de flujos variables de datos asignando recursos de forma más eficiente y manteniendo los requerimientos de tiempo real.

Para servicios nrtPS la BS asigna un ancho de banda dedicado para que un grupo de SSs compitan entre ellas para enviar sus solicitudes utilizando un algoritmo de resolución de contención llamado Contención Exponencial Binaria Truncada (*Trunkated Bynary Exponencial Backoff*). Sólo participan de la contienda las SSs que tienen datos pendientes por transmitir. La BS elige un tamaño de ventana de contención dentro del ancho de banda dedicado, la SS selecciona uno de los intervalos de tiempo de contención⁴⁶ disponibles en esta ventana para realizar la solicitud. La resolución de la contención es exitosa si en el UL-MAP se detalla una asignación de ancho de banda para transmitir dirigida a la conexión. Si no recibe ninguna asignación la contención se considera perdida y se repite el proceso. Los datos se descartan luego de varias contenciones perdidas.

⁴⁵ El termino *piggyback* hace alusión a cuando un paquete jala a otro que se le anexa mediante un resorte enroscado como una cola de cerdo.

⁴⁶ Un intervalo de contención es una asignación de tiempo y frecuencia que cualquier SS puede utilizar para transmitir solicitudes de ancho de banda.

Este mecanismo es eficiente para aplicaciones con requerimientos flexibles o con periodos de inactividad. Cuando una aplicación lo requiera, la BS puede permitir que la SS solicite ancho de banda de forma individual similar a como sucede para rtPS.

Para servicios BE se puede utilizar todas las formas de solicitud de ancho de banda descritas para los otros tipos de servicios. Dentro de la subtrama del UL se designan los segmentos que se destinan para realizar solicitudes individuales y por contención.

Dependiendo de la carga de tráfico o del ancho de banda disponible, un operador puede definir cuando un usuario utiliza un encabezado sin carga útil o un subencabezado *piggyback* para solicitar ancho de banda, puede configurar los tamaños de las ventanas de contención y definir el conjunto de usuarios que realizan contención y cuáles solicitan ancho de banda en asignaciones dedicadas. Cuando un grupo de usuarios realiza contención se economiza ancho de banda respecto a las solicitudes individuales; pero las aplicaciones de tiempo real requieren mayor control en la solicitud-asignación de recursos por lo que no se recomienda su utilización para estos servicios.

2.2.3.3. Planificador

El planificador de WiMAX consiste en un algoritmo o un esquema organizado de algoritmos que dirige la asignación de ancho de banda de la red de forma eficiente para satisfacer los requerimientos de QoS de las conexiones bajo la limitante de los recursos disponibles. El operador de la red debe tener la posibilidad de manipular el planificador para ajustarlo a los objetivos de desempeño de la red. El estándar define los siguientes requerimientos para la implementación del planificador [12]:

- Soportar una definición detallada basada en parámetros de los requerimientos de QoS y de mecanismos para señalar condiciones de tráfico.
- Soportar realimentación de información del MCS y el nivel de potencia de cada SS.
- Soportar asignación dinámica de recursos en el subnivel MAC en tiempo, frecuencia y espacio para cada trama de acuerdo con las condiciones del usuario y de la red.
- Soporte para subcanalización con flexibilidad en la elección de las subportadoras para explotar esquemas de diversidad.

El planificador distribuye el ancho de banda disponible en la BS entre sus conexiones en un esquema trama a trama. Al inicio de cada trama, el planificador consulta las solicitudes pendientes de ancho de banda de las conexiones en ambos sentidos del enlace y les asigna ancho de banda teniendo en cuenta los siguientes aspectos [12]:

- El tipo de servicio especificado.
- Requerimientos QoS de velocidad de transmisión y retardo del flujo de servicio.
- La disponibilidad de recursos en transmisión.
- MCS, potencia de transmisión y subcanalización (cuando está habilitada).

La asignación de ancho de banda que obtiene una SS (para una o más conexiones) se conoce como ráfaga (*burst*). La ráfaga es el conjunto de símbolos OFDM y subportadoras que conforman la asignación total de ancho de banda de la SS en un solo sentido durante una misma subtrama. La ráfaga utiliza los mismos parámetros físicos de transmisión de potencia, MCS y de antenas múltiples, el conjunto de estos parámetros se conoce como perfil de ráfaga (*burst profile*). Luego de definir la asignación de recursos, la BS transmite al inicio de la trama los mensajes de gestión de subnivel MAC Mapa de UL (UL-MAP) y Mapa de DL (DL-MAP) que informan a las SSs la presencia de ráfagas en el UL y en el DL respectivamente. Los mapas contienen un Elemento de Información (IE, *Information Element*) por cada ráfaga especificando el CID, el inicio de la asignación dentro de la trama, su duración y los parámetros físicos de transmisión.

La BS transmite las ráfagas de las SSs, que junto con los datos de control y encabezados forman la subtrama DL de un sector. Todas las SSs en ese sector escuchan la subtrama completa pero sólo retienen la información dirigida a sus conexiones. La subtrama UL se forma con la transmisión de las ráfagas desde cada SS, junto con los datos de control y encabezados que pueden generarse desde la BS o desde las SSs.

2.2.4. Gestión de Interferencia

En una arquitectura celular el aislamiento espacial entre transmisores no es perfecto de forma que existe CCI que afecta el desempeño global de la red. La CCI tiene una naturaleza dinámica por lo que una correcta planeación de frecuencias permite limitar sus

efectos pero no los elimina por completo. Por este motivo se requiere la implementación de mecanismos para evasión y promediado⁴⁷ de interferencia [32].

En [30] se menciona que la gestión de interferencia es una característica de RRM que se realiza a nivel MAC y PHY mediante la siguiente funcionalidad⁴⁸:

- Nivel MAC:
 - Reporte de medición/evaluación de interferencia.
 - Mitigación de interferencia a través de la asignación de recursos y del reuso flexible de frecuencias.
- Nivel PHY
 - Control de potencia de transmisión.
 - Aleatorización de la interferencia.
 - Mediciones de la interferencia.
 - Cancelación de la interferencia.
 - Precodificación y formación de haces en la transmisión.

2.2.5. Tecnologías Avanzadas de Antena

Las AAT permiten mejorar el rango de cobertura y capacidad en el nivel físico de la red utilizando arreglos de antenas que aprovechan las características de tiempo y espacio del canal inalámbrico. El estándar permite la implementación de Sistemas de Antenas Adaptativas (AAS, *Adaptive Antenna System*) y Múltiples Entradas Múltiples Salidas (MIMO, *Multiple Input Multiple Output*) [12] como tecnologías diferentes y complementarias.

2.2.5.1. Sistemas Adaptativos de Antenas

Los AAS utilizan más de un elemento de antena en transmisión y recepción para modificar el patrón de radiación de la antena. Por motivos de tamaño del arreglo y la complejidad de cada elemento de antena, la BS utiliza de dos a ocho elementos de antena por arreglo

⁴⁷ El promediado de interferencia busca que la potencia de interferencia sea similar para todos los usuarios mediante las distribuciones de subportadoras no adyacentes a los subcanales.

⁴⁸ Este documento presenta los lineamientos del Documento de Descripción del Sistema (SDD, *System Description Document*) para la revisión IEEE 802.16m.

mientras que las SSs utilizan uno o dos. De forma ideal, para cada elemento del arreglo adaptativo se debe poder configurar amplitud y fase de forma independiente.

2.2.5.2. Soporte para Sistemas adaptativos de antenas en el estándar IEEE 802.16-2004

El estándar provee mecanismos para una implementación opcional de AAS. La BS puede dividir las tramas de nivel físico en segmentos dedicados para transmitir tráfico AAS y no AAS. La BS transmite también en los mensajes UL-MAP y DL-MAP la información necesaria para que las SSs con AAS y sin AAS puedan transmitir en su respectivo segmento de manera adecuada.

Existe la posibilidad de que los lóbulos principales del patrón de radiación del arreglo no se encuentren dirigidos a una SS específica con AAS, si ésta no está transmitiendo o si aún no ingresa a la red. Cuando una SS quiere conectarse a la red debe seguir el procedimiento de sincronización, ajuste de parámetros y *ranging* para que la BS obtenga los parámetros de la SS, y luego continuar el procedimiento de acceso a la red. Durante la sincronización la SS utiliza la ganancia de procesamiento del preámbulo de la trama⁴⁹ para sincronización en tiempo y frecuencia. Después, la SS espera los mensajes de descripción del canal, y si los recibe con suficiente nivel de potencia como para decodificarlos, entonces la SS ajusta sus parámetros según la información recibida, continúa con el proceso de acceso a la red y la BS ajusta sus arreglos para dirigirlos a la SS. En el caso de que la SS no pueda decodificar correctamente los mensajes de descripción del canal, ésta utiliza segmentos en la subtrama que se destinan para que la SS alerte de su presencia a la BS de forma que esta última pueda acomodar sus arreglos adaptativos a la nueva SS. Los arreglos adaptativos necesitan información del canal para funcionar correctamente; esta información se obtiene de las mediciones de CINR y RSSI.

2.2.5.3. Múltiples Entradas Múltiples Salidas

La tecnología MIMO consiste en utilizar Codificación Espacio Temporal (STC, *Space-Time Coding*)⁵⁰ en una señal para transmitirla simultáneamente a través de N_T antenas y

⁴⁹ El preámbulo de la trama es una secuencia de bits repetidos muy bien conocida por la SS que se utiliza para sincronización al inicio de la trama.

⁵⁰ La Codificación Espacio Temporal es un método de transmisión que mejora la confiabilidad en un enlace, transmitiendo símbolos redundantes codificados de forma diferente a través de múltiples antenas que generan múltiples caminos [1].

recibirla utilizando Decodificación Espacio temporal (STD, *Space-Time Decoding*) para combinar las componentes recibidas a través de N_R antenas en el receptor. STC permite reducir el margen de desvanecimiento y mitigar los efectos de la interferencia, la figura 2.2 [1] muestra el esquema de funcionamiento de MIMO. MIMO aprovecha las características de diversidad de espacio-tiempo del canal NLOS para mejorar el desempeño con el costo de un incremento en la complejidad del receptor.

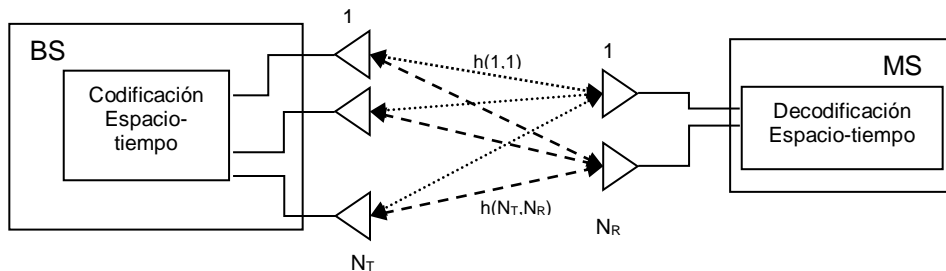


Figura 2.2. Esquema de funcionamiento de MIMO.

2.2.5.4. Soporte para Múltiples Entradas Múltiples Salidas en el estándar IEEE 802.16-2004

El estándar define mecanismos para el soporte de MIMO como una capacidad opcional de WiMAX que se puede utilizar con OFDM y OFDMA. MIMO permite implementar diversidad de transmisión utilizando codificación STC. El estándar soporta un esquema de diversidad espacial 2x1 con dos antenas en transmisión en la BS y una en recepción en la SS y utiliza el código Alamouti [1] para realizar la codificación STC. En STC se envían dos símbolos diferentes desde dos antenas diferentes al mismo tiempo desde la misma BS, y se recibe utilizando una sola antena en la SS. La transmisión repite dos veces cada símbolo. También es posible realizar la transmisión en un arreglo de cuatro antenas para transmitir un símbolo por cada par de antenas. El estándar brinda los lineamientos para la implementación de STC tanto para OFDM como para OFDMA.

2.2.6. RRM en la arquitectura de red del WiMAX Forum

El documento “Arquitectura de Sistemas de Red Extremo a Extremo WiMAX” del NWG incluye una sección dedicada a RRM que describe requerimientos funcionales, entidades funcionales, modelo de referencia, procedimientos y protocolos de la arquitectura de red

[26]. El alcance de [26] comprende redes fijas y móviles por lo que muchas de sus características se orientan hacia movilidad, que están fuera del ámbito del presente trabajo de grado.

En el documento se establecen procedimientos y herramientas para el intercambio eficiente de información de medidas y decisiones de control en la arquitectura de red del WiMAX Forum. El WiMAX Forum propone una serie de requerimientos funcionales para RRM entre los que cabe resaltar que la funcionalidad que soporta se basa en una arquitectura genérica que permite la utilización eficiente de los RRs y la comunicación eficiente entre las entidades que controlan los RRs de una BS o de un grupo ellas.

El WiMAX Forum establece un grupo de primitivas⁵¹ para el soporte de procedimientos de información entre las entidades funcionales RRM del modelo [26], de ellas, las siguientes aplican para WiMAX fijo:

- Reporte de capacidad disponible por BS.
- Reporte del nivel de servicio PHY por SS/MS.
- Actualización de los RR en BS vecinas.

2.2.6.1. Arquitectura de red del WiMAX Forum

En la figura 2.3 [26] se presenta la arquitectura de red extremo a extremo del WiMAX Forum. Sus elementos funcionales se describen a continuación:

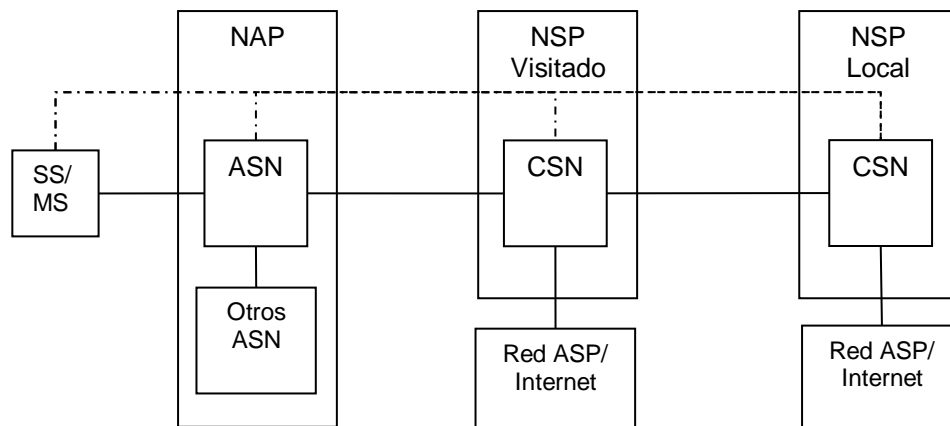


Figura 2.3. Modelo de referencia de red.

⁵¹ Una primitiva corresponde a una operación entre entidades agente y gestor en un sistema de gestión de red.

- Red de Servicio de Acceso (ASN, *Access Service Network*): Provee el acceso radio a las SSs. Equivalente a una BS.
- Proveedor de Servicio de Acceso (ASP, *Access Service Provider*): Entidad de negocio que provee aplicaciones y servicios.
- Red de Servicio de Conectividad (CSN, *Connectivity Service Network*): Conjunto de funciones de red que provee servicios de conectividad IP.
- Proveedor de Acceso a la Red (NAP, *Network Access Provider*): Entidad de negocios que provee infraestructura de acceso radio WiMAX.
- Proveedor de Servicios de Red (NSP, *Network Services Provider*): Entidad de negocio que provee conectividad IP y servicios WiMAX.
- SS: Equipo de usuario que provee conectividad con la red de acceso.

2.2.6.2. Arquitectura de red para Gestión de Recursos Radio

Las figuras 2.4 y 2.5 [26] muestran las dos posibilidades para el modelo funcional genérico que el WiMAX Forum establece para RRM.

- Agente de Recursos Radio (RRA, *Radio Resource Agent*): Se localizada en la BS, utiliza procedimientos y definiciones del estándar 802.16 para obtener medidas e indicadores de los RR disponibles en la misma BS y en las SSs a las que ésta sirve. Los datos de las mediciones se almacenan en bases de datos para luego ser enviadas a un Controlador de Recursos Radio (RRC, *Radio Resource Controller*) o a un RRA en una BS vecina, o para tomar decisiones de optimización y asignación de recursos en la misma BS o en sus SSs subordinadas.
- RRC: Se localiza en la BS o simplemente en la ASN. Toma decisiones coordinadas entre un grupo de BSs. Utiliza la información de medidas e indicadores RRM obtenidos desde cada RRA. Una de sus aplicaciones es la distribución de carga de tráfico entre BSs vecinas.
- Retransmisor RRC (RRC *Relay*): Es una entidad funcional adicional pero no fundamental que se utiliza para comunicar dos o más RRCs que no pueden ser conectados directamente a través de una interfaz estándar.

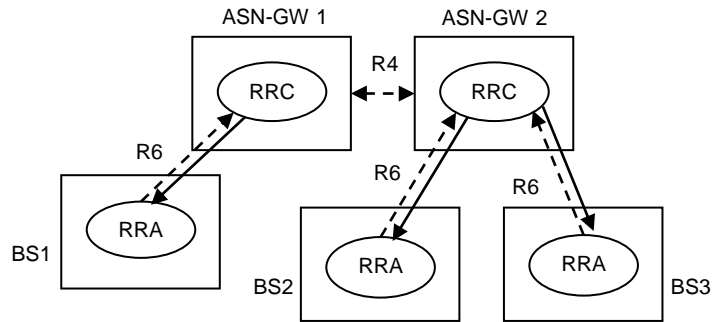


Figura 2.4. Arquitectura de red RRM con funciones en entidades separadas.

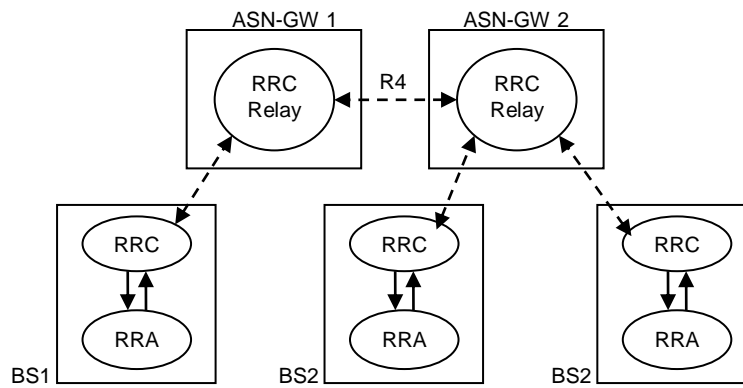


Figura 2.5. Arquitectura de red RRM con funciones integradas y retransmisión (Relay).

2.2.7. 802.16g

En [24] se presenta la revisión 802.16g del estándar que “*define procedimientos de gestión como mejora al estándar de interfaz radio IEEE 802.16 para sistemas inalámbricos fijos y móviles de banda ancha*” y que busca estandarizar procedimientos e interfaces para la gestión eficiente de recursos en sistemas basados en el estándar IEEE 802.16-2004. El documento considera a RRM como parte del plano de gestión de la interfaz radio e integra el trabajo realizado por el WiMAX Forum en la estandarización de las primitivas definidas para RRM en [21], como parte del modelo de gestión de red.

2.2.8. 802.16m

La revisión 802.16m [30] busca mejorar el desempeño del estándar IEEE 802.16 con la adición de características y funcionalidad. Esta revisión adopta a RRM como una funcionalidad contenida en un bloque Gestión y Control de Recursos Radio (RRCM, *Radio*

Resource Control and Management) que forma parte del subnivel MAC CPS como se muestra en la figura 2.6 [30].

De acuerdo con la revisión, RRM modifica los parámetros de la red radio con base en la carga de tráfico e incluye balance de carga de tráfico, CAC y control de interferencia, aunque no especifica los parámetros radio que se deben controlar ni los mecanismos de control. La figura 2.6 muestra la relación de RRM como parte del bloque RRCM, y a su vez la de este bloque dentro del subnivel MAC CPS en la estructura de protocolos del modelo de referencia OSI para WiMAX que se presentó en el capítulo uno. La figura 2.6 también identifica algunas de las funcionalidades que intervienen en el control de los recursos en el subnivel de convergencia y en el subnivel MAC CPS tanto en los planos de datos como de control del subnivel MAC. La revisión no define una nueva arquitectura de protocolos ni la modifica en ninguna forma, sólo busca complementarla para lograr su objetivo.

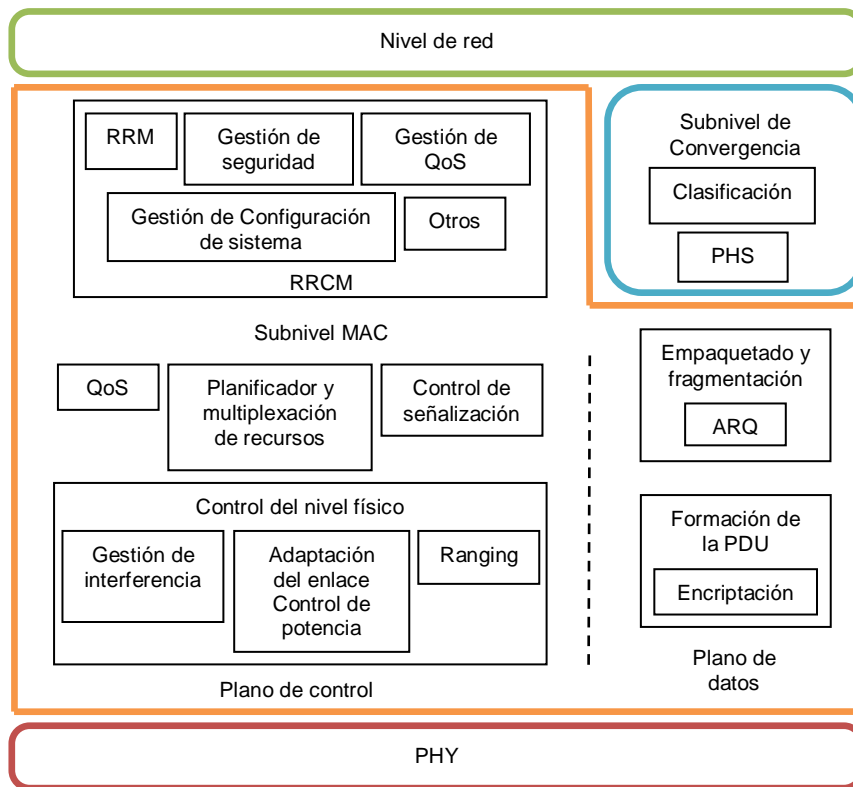


Figura 2.6. Pila de protocolos definida en la revisión 802.16m.

2.3. CONCLUSIÓN DEL CAPÍTULO

En este capítulo se introdujo el concepto de RRM y su aplicación a WiMAX. Posteriormente, a partir del análisis de diferentes fuentes y autores se definió una serie de mecanismos RRM, y se realizó un análisis del soporte y de los requerimientos técnicos que se brinda en el estándar IEEE 802.16-2004, en otros documentos y revisiones IEEE 802.16 y en el WiMAX Forum para la implementación de estos mecanismos en redes FBWA. Estos análisis van a permitir la investigación en el capítulo siguiente, de una serie de algoritmos y estrategias que implementan los mecanismos RRM definidos en el presente capítulo.

3. ALGORITMOS Y ESTRATÉGIAS RRM PARA WiMAX FIJO

En este capítulo se identifican nuevas tecnologías, estrategias y/o algoritmos RRM que permiten obtener un mejor desempeño de una red WiMAX fijo. La identificación parte de la descripción de mecanismos RRM que se realizó en el capítulo dos.

3.1. PLANIFICADOR

El planificador hace parte de los mecanismos de asignación de recursos en WiMAX y su objetivo es dirigir la asignación de ancho de banda de la red de forma eficiente para satisfacer los requerimientos de QoS de las conexiones bajo la limitante de los recursos disponibles, como se vio en la sección 2.2.3.3. el planificador permite la gestión de QoS con base en los diferentes tipos de servicios: UGS, rtPS, nrtPS y BE, que se introducen en la sección 1.1.1.4.

En esta sección se presentan conceptos principales del diseño del planificador. Además, se presentan los resultados de una investigación exploratoria que consiste en la recopilación de algoritmos y esquemas de planificación propuestos por diferentes autores y su respectivo análisis. Debido a la gran cantidad de propuestas de algoritmos y esquemas de planificadores que se pueden encontrar en artículos publicados y en tesis de maestría durante la exploración, y a la complejidad que representa el análisis de cada una de estas propuestas, esta investigación exploratoria no pretende lograr una recopilación exhaustiva sino que se eligen un grupo limitado de propuestas para su análisis con base en la diferenciación de la base conceptual de la construcción del algoritmo, en el número de citas por parte de otros autores y en la presentación de análisis de desempeño mediante simulación de los algoritmos por parte de los autores. Cada autor realiza análisis de desempeño de los algoritmos y esquemas en condiciones de simulación que buscan evaluar objetivos particulares de diseño; por lo tanto, en el alcance del presente trabajo no se realizan comparaciones directas de desempeño.

3.1.1. Esquema de Gestión de QoS del Planificador

En [33] se presenta como ejemplo un esquema funcional de gestión de QoS que contiene al planificador y la señalización que se requiere entre los diferentes módulos como se muestra en la figura 3.1 [33], aunque este esquema puede variar según el autor.

De forma genérica, el esquema funcional básico consta de los siguientes módulos: CAC, clasificación de conexiones, gestión de colas de tráfico, formación de tráfico y Planificador de Paquetes del UL (UPS, *UL Packet Scheduling*).

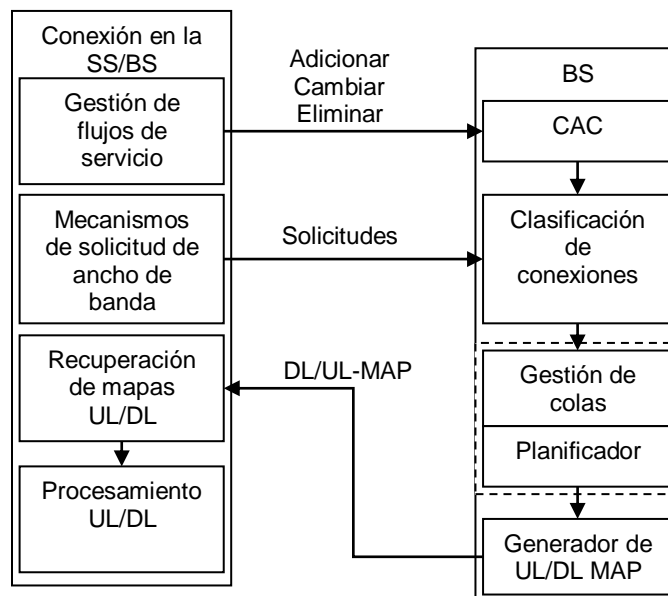


Figura 3.1. Esquema de gestión de QoS UL/DL para flujos de servicio.

3.1.2. Concepto de Justicia de un Planificador

El concepto de justicia hace referencia a la capacidad de asignar ancho de banda de forma equitativa entre usuarios con diferentes tipos de servicio y requerimientos QoS. En una asignación totalmente justa se asigna la misma cantidad de recursos entre todos los usuarios mientras que una asignación totalmente injusta favorece a uno o pocos usuarios en detrimento de los demás. Un planificador se puede diseñar de acuerdo con tres enfoques de justicia:

- **Justicia máxima-mínima:** Maximiza la justicia entre los usuarios con asignaciones lo más equitativas posible. En un sistema con AMC, las asignaciones iguales de

recursos a los usuarios disminuyen la capacidad del canal debido a los usuarios que utilizan un MCS con menor eficiencia espectral, de forma que este enfoque de justicia no brinda una capacidad óptima en el enlace.

- **Maximización de capacidad:** Explota las buenas condiciones del canal de algunos usuarios asignándoles una gran cantidad de recursos de forma que se pueda alcanzar la mayor capacidad global. La capacidad del canal es mayor en este enfoque, pero provoca escasez de recursos a usuarios que se encuentran en malas condiciones del canal permanentes, por lo que no es apropiado para brindar QoS.
- **Justicia proporcional:** Asigna recursos de forma proporcional entre los usuarios para maximizar la capacidad, pero soportando requerimientos de QoS, y cumpliendo con un objetivo adecuado de justicia. Esta justicia se implementa asignando a cada flujo de datos pesos que dependen de las condiciones del enlace o del volumen de tráfico de cada flujo. Los pesos determinan la cantidad de recursos a asignar.

3.1.3. Algoritmos de Formación de Tráfico

Los algoritmos de formación de tráfico no forman parte de RRM, pero se presentan en esta sección debido a que mejoran el funcionamiento de los planificadores limitando la cantidad de de paquetes por unidad de tiempo que un usuario puede inyectar a las colas de espera de transmisión, y permitiendo que las solicitudes de paquetes ingresen al planificador de forma predecible. La figura 3.2 [34] muestra el efecto de los algoritmos de formación de tráfico sobre el tráfico de la red. Los algoritmos más comunes son la Canasta de Fichas (*Token Bucket*) y la Canasta Goteante (*Leaky Bucket*).

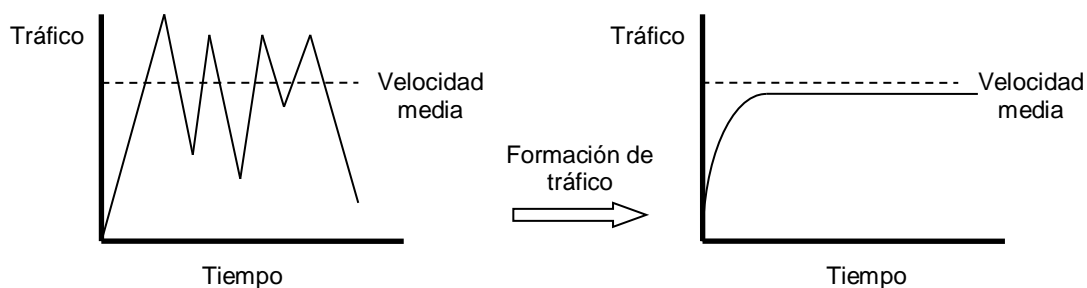


Figura 3.2. Formación de tráfico.

3.1.3.1. Canasta de fichas

Este algoritmo funciona de la siguiente manera:

- Se depositan fichas en la canasta a una velocidad determinada.
- Cada ficha equivale a un determinado número de bits. El administrador de la red define la equivalencia entre una ficha y el número de bits que representa.
- Para enviar un paquete, el formador de tráfico debe extraer de la canasta un número de fichas equivalente al tamaño del paquete.
- Si no hay suficientes fichas para enviar el paquete, éste espera hasta que la canasta se llene con la cantidad necesaria.

La canasta de fichas se define con los parámetros b y r que representan respectivamente la profundidad de la canasta y la velocidad con la que se depositan fichas en la canasta. El valor de b limita el tamaño de las ráfagas de tráfico que pueden ingresar en la red y r determina la velocidad de transmisión a largo plazo durante periodos de alta generación de tráfico. La figura 3.3 [34] muestra el esquema del algoritmo en donde R representa la velocidad de salida.

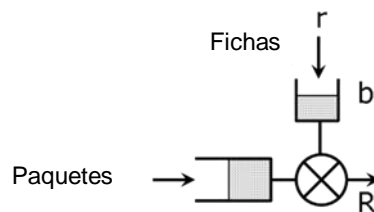


Figura 3.3. Esquema de funcionamiento del algoritmo canasta de fichas.

3.1.3.2. Canasta goteante

Este algoritmo recibe su nombre debido a la similitud de su funcionamiento con una canasta abierta por arriba y con un pequeño orificio en el fondo como se ve en la figura 3.4 [34], y funciona de la siguiente manera:

- Cuando llegan paquetes a la canasta goteante, estos se representan por fichas. El administrador de la red define la equivalencia entre una ficha y el número de bits que representa.
- La capacidad total de la canasta es L fichas e inicialmente contiene cero fichas.

- Si una ficha representa n bits, y llega un nuevo paquete de k bits de longitud a la canasta, a esta se agregan k/n nuevas fichas a las previamente existentes en la canasta. Si al agregar las nuevas fichas, la cantidad de fichas resultante es mayor que L significa que el nuevo paquete desborda la capacidad de la canasta y se debe postergar o descartar.
- Una ficha “gotea” de la canasta a una velocidad determinada. Esta ficha representa el permiso para inyectar un número determinado de bits en la red correspondiente a alguno de los paquetes representados en la canasta.

El algoritmo canasta de fichas permite el ingreso de ráfagas de tráfico en la red. Algunos formadores de tráfico utilizan la Canasta de Fichas en cascada con la Canasta Goteante para controlar la velocidad de ingreso de información a la red y evitar ráfagas de tráfico.

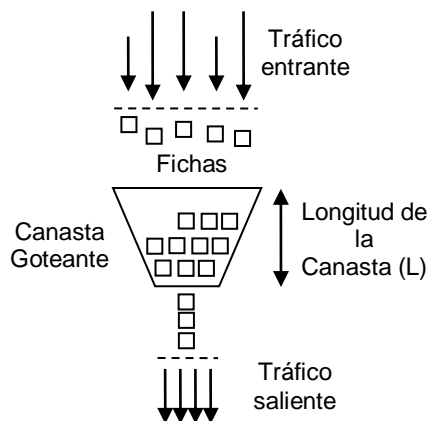


Figura 3.4. Analogía del algoritmo canasta goteante.

3.1.4. Propuestas de Planificadores

Las propuestas de planificadores se presentan siguiendo la clasificación utilizada en [35] según la cual se dividen en planificadores homogéneos, heterogéneos y diversos.

3.1.4.1. Planificadores homogéneos

Los planificadores homogéneos utilizan algoritmos simples para asignar ancho de banda a las diferentes conexiones, y los más destacados se presentan a continuación.

3.1.4.1.1. Round Robin

El algoritmo *Round Robin* [36] es la solución más simple de asignación de ancho de banda. Los paquetes de cada conexión se ubican en una cola de espera y el planificador extrae un paquete de cada cola activa⁵² para su transmisión, luego avanza a la siguiente cola y realiza el mismo proceso iterativamente hasta visitar todas las colas; cuando visita la última cola completa una vuelta y el ciclo empieza nuevamente desde la primera. Aunque la complejidad de *Round Robin* es baja, no es práctico por sus limitantes para garantizar QoS, puesto que sólo maneja paquetes de igual tamaño y cada conexión recibe la misma capacidad en un esquema de justicia máxima-mínima. La figura 3.5 [36] muestra el esquema de funcionamiento del algoritmo *Round Robin*.

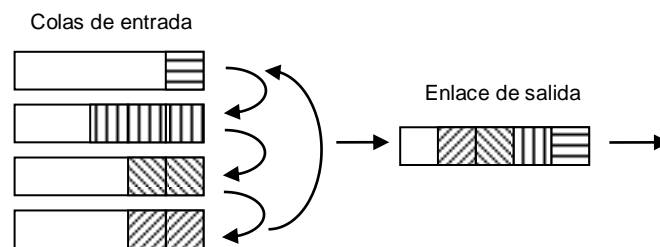


Figura 3.5. Esquema de funcionamiento del algoritmo *Round Robin*.

3.1.4.1.2. Encolamiento con prioridad

El algoritmo Encolamiento con Prioridad (PQ, *Priority Queueing*) [36] asigna una prioridad a cada paquete y lo ubica en una cola diferente según esta prioridad. El planificador visita primero la cola con mayor prioridad hasta que no haya más paquetes por transmitir; luego visita la siguiente cola en orden de prioridad descendente y así sucesivamente. Si en un momento dado está visitando una cola y llega un paquete a una cola de mayor prioridad, el planificador pasa a visitar inmediatamente la cola de mayor prioridad; esto crea la desventaja de que una cola con alta prioridad y con un alto flujo de paquetes recibe recursos en exceso y provoca escasez de recursos en colas de baja prioridad, por lo que no es apto para combinar tráfico rtPS y BE debido a que las colas correspondientes a ambos servicios deben ser configuradas con prioridades muy diferentes que pueden garantizar la satisfacción de requerimientos para rtPS y generar escases prolongada de

⁵² Una cola que tenga al menos un paquete para transmitir.

recursos en BE. Este algoritmo aplica un esquema de justicia proporcional y la figura 3.6 [36] muestra su funcionamiento.

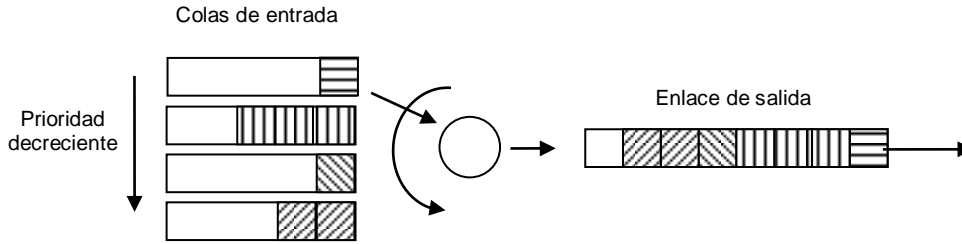


Figura 3.6. Esquema de funcionamiento del algoritmo PQ.

3.1.4.1.3. Encolamiento justo

El algoritmo de Encolamiento Justo (FQ, *Fair Queueing*) [36] mejora la latencia y la eficiencia en el uso de los recursos. Los paquetes de un mismo tipo de servicio se ubican en colas que se visitan como en *Round Robin*. Cada cola logra una velocidad R/N , en donde R es la capacidad del enlace y N es el número de colas activas. Respecto a PQ, FQ no realiza diferenciación de servicios y evita la escasez de recursos para las colas. Respecto a *Round Robin*, FQ tiene en cuenta la capacidad total del enlace y asigna ancho de banda de forma más homogénea debido a que el ancho de banda asignado no depende del tamaño del paquete sino de la cantidad de colas activas y de la capacidad del enlace. FQ aplica el esquema de justicia máxima-mínima.

3.1.4.1.4. Encolamiento justo ponderado

El algoritmo Encolamiento Justo Ponderado (WFQ, *Weighted Fair Queueing*) [37] se basa en FQ pero asigna pesos a cada cola que determinan la cantidad de información que pueden transmitir en cada turno. Si W_i es el peso asociado a la cola activa i , para n colas se debe cumplir la condición de la ecuación 3.1. Además, para un ancho de banda total B , el ancho de banda que recibe la cola i viene dado por la ecuación 3.2.

$$\sum_{i=1}^n W_i = 1, \quad W_i \in [0,1] \quad (3.1)$$

$$B_i = \frac{B W_i}{\sum_{j=1}^n W_j} \quad (3.2)$$

WFQ planifica los paquetes con base en el tiempo de llegada, tamaño y peso de la cola asociada. Para cada nuevo paquete, el planificador calcula un tiempo virtual que representa el tiempo dentro del cual se debe transmitir el paquete, y luego reorganiza los paquetes en orden ascendente. WFQ en conjunto con el algoritmo Canasta Goteante a la entrada de cada cola garantiza velocidad y retardo extremo a extremo. WFQ aplica justicia proporcional y soporta colas con paquetes de longitud variable sin que los paquetes de gran tamaño provoquen escasez de recursos.

3.1.4.1.5. Encolamiento con prioridad justa con déficit

El algoritmo Encolamiento con Prioridad Justa con Déficit (DFPQ, *Deficit Fair Priority Queueing*) [38] busca integrar los beneficios y mejorar las falencias de PQ, FQ y *Round Robin* para su aplicación en WiMAX. Para DFPQ se definen seis colas, rtPS, nrtPS y BE para el UL y el DL, y se organizan los paquetes de una conexión en colas según su prioridad. Para cada una de ellas se define una constante denominada *Quantum* y una variable global denominada contador de déficit. El planificador visita primero la cola de mayor prioridad; el contador de déficit se inicializa con el valor de *Quantum* y por cada paquete transmitido el contador de déficit se actualiza con el valor de la diferencia entre el contador de déficit y el tamaño del paquete. Se transmiten paquetes hasta que el contador de déficit sea menor o igual a cero, se vacíe la cola o se agote la capacidad del enlace. Cuando se vacía la cola, el contador de déficit se inicializa en cero, de lo contrario, su valor se conserva hasta la siguiente visita del planificador. Si después de atender la cola con la prioridad más alta aún queda capacidad disponible en el enlace, el planificador visita la siguiente cola en orden descendente de prioridad y repite el mismo proceso hasta agotar la capacidad del enlace o hasta visitar la última cola, y continúa de la misma forma desde el inicio. DFPQ aplica un esquema de justicia proporcional.

3.1.4.1.6. Primero vencimiento más próximo

El algoritmo Primero Vencimiento más Próximo (EDF, *Earliest Deadline First*) [39] se basa en una cola única en donde cada paquete se organiza y se transmite según su requerimiento de retardo máximo permitido, su tamaño, su tiempo de procesamiento y su orden de llegada.

3.1.4.2. Planificadores heterogéneos

En [35] y [40] se presentan dos estudios independientes que demuestran que los planificadores homogéneos no satisfacen adecuadamente los requerimientos de QoS de todos los tipos de servicio en condiciones de alto tráfico. Por ejemplo, EDF favorece a servicios con límite de retardo más estricto, mientras que WFQ mantiene alta justicia y desempeño pero no es adecuado para manejar retardo, de forma que no es eficiente utilizar un algoritmo único para todos los tipos de servicio, y para superar este inconveniente se han propuesto los planificadores heterogéneos. A continuación se presentan los dos más significativos con relación a las características que se presentaron en la sección 3.1.

3.1.4.2.1. Planificador de paquetes para soporte de QoS en sistemas de acceso inalámbrico de banda ancha IEEE 802.16

En [31] se propone un planificador heterogéneo de dos niveles jerárquicos como se muestra en la figura 3.7 [31]. La capacidad disponible en el UL se divide en el primer nivel entre los cuatro tipos de servicios, UGS, rtPS, nrtPS, y BE, utilizando el algoritmo PQ, y en el segundo nivel se divide dependiendo del tipo de servicio.

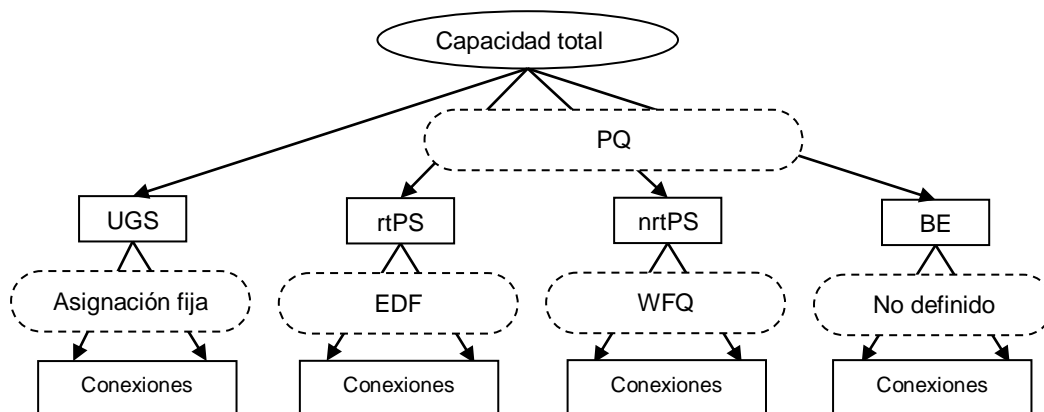


Figura 3.7. Planificador heterogéneo PQ, EDF, WFQ.

Inicialmente se asigna el ancho de banda requerido por las conexiones UGS, el excedente se asigna con EDF para rtPS, WFQ para nrtPS, y aunque no se especifica un algoritmo para BE, éste puede utilizar FQ o WFQ.

La gestión de conexiones y asignación de ancho de banda se basa en el esquema de gestión de QoS de la figura 3.8 [31]. Las SSs hacen solicitudes al CAC para establecer una conexión nueva. El CAC determina si el ancho de banda actual soporta el requerimiento de ancho de banda de la nueva conexión; y evalúa si la nueva conexión afecta los retardos de las conexiones rtPS existentes. Si la conexión se autoriza, pasa al clasificador que la ubica en una cola según su tipo de servicio y antes de cada cola pasan por un módulo de formación de tráfico. En el módulo Colas de Paquetes se realizan las solicitudes de ancho de banda al Planificador de Paquetes del UL (UPS, *UL Packet Scheduler*) y se espera la correspondiente asignación de ancho de banda. El UPS se divide en tres módulos: Información, Base de Datos del UPS y Asignación del Servicio. El módulo Información obtiene la cantidad, el tamaño y el retardo de los paquetes en las colas rtPS; y la cantidad y el tamaño para nrtPS y BE. El módulo Base de Datos del UPS organiza esta información en registros matriciales para rtPS, donde el registro de la fila i columna j contiene la cantidad de bits de la conexión i que se deben transmitir en la trama j para satisfacer el retardo de los paquetes; y la información de los paquetes UGS, nrtPS y BE se organizan en un registro lineal que contienen la cantidad de bits en espera de cada conexión. El módulo asignación de servicio contiene el planificador que asigna ancho de banda trama a trama utilizando la información de la base de datos.

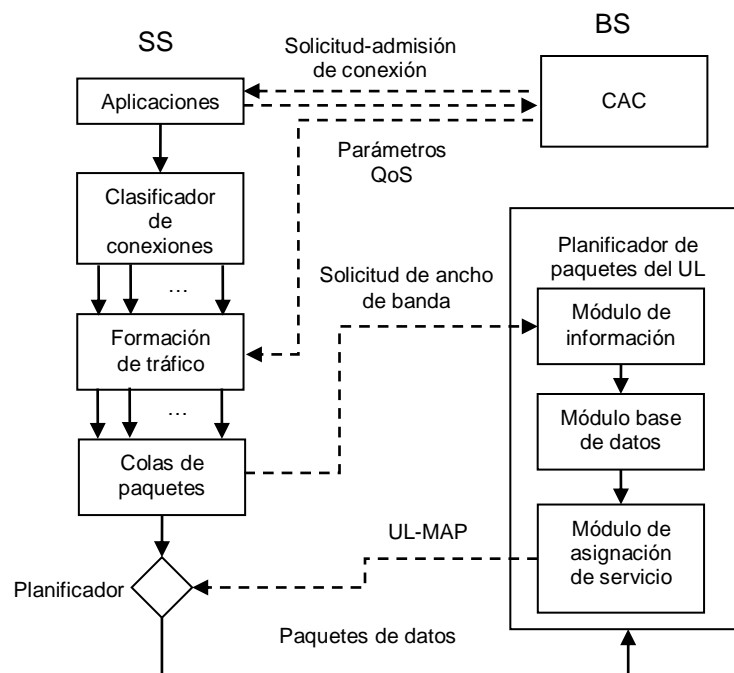


Figura 3.8. Esquema de arquitectura genérica del planificador del UL.

Los autores evaluaron el desempeño del planificador en términos del ancho de banda y retardo para rtPS. La simulación utilizó tres fuentes de tráfico rtPS y una fuente de tráfico BE que genera tráfico constante. La capacidad del enlace en el UL se definió de 5 Mbps y el tamaño de la trama de 10 ms. El desempeño se evaluó mediante curvas de llegada y de servicio. La curva de llegada muestra para cada inicio de trama la cantidad de bits que llegaron a las colas hasta ese momento y el tamaño actual de las mismas. La curva de servicio muestra los bits que el UPS transmite durante la trama. El análisis de resultados muestra que la información se planifica dentro de los límites de retardo sin pérdidas por vencimiento del retardo de los paquetes y que las curvas de servicio corresponden a las de llegada con una diferencia equivalente al límite de retardo.

3.1.4.2.2. Estrategia de gestión de flujo de servicio para sistemas de acceso inalámbrico de banda ancha IEEE 802.16 en modo TDD

En [33] se presenta una propuesta de asignación de recursos para TDD que tiene en cuenta la división de la trama PHY en subtramas UL y DL⁵³. La propuesta define el planificador, el CAC, una ecuación para evaluar el índice de justicia y el esquema de gestión QoS. En el planificador, los paquetes de las conexiones se ubican en colas según el tipo de servicio y la dirección del enlace (UL o DL). Primero se asigna el ancho de banda requerido por las conexiones UGS, y si existe un excedente de ancho de banda, éste se distribuye entre los demás tipos de servicio en un primer nivel utilizando DFPQ. En un segundo nivel, el ancho de banda se distribuye entre las conexiones de las colas de cada servicio utilizando EDF para rtPS, WFQ para nrtPS, y *Round Robin* para BE. El esquema del planificador se muestra en la figura 3.9 [33].

El CAC utiliza la velocidad de tráfico mínima reservada para evaluar si se puede soportar una nueva conexión sin degradar el servicio de otras conexiones. Si C_{total} es la capacidad total, si existen n conexiones incluyendo la nueva, y si r_{min} es la velocidad mínima reservada por conexión, entonces la capacidad disponible luego de aceptar la nueva conexión viene dada por la ecuación 3.3, y la condición para aceptar una nueva conexión está dada por la ecuación 3.4.

⁵³ Para FDD los tamaños de subtramas UL y DL son iguales y de la misma longitud de la trama; en cambio, en TDD la trama se divide en la subtrama UL y DL en diferentes proporciones [12].

$$C_a = C_{total} - \sum_{i=1}^n r_{min} \quad (3.3)$$

$$C_a \geq 0 \quad (3.4)$$

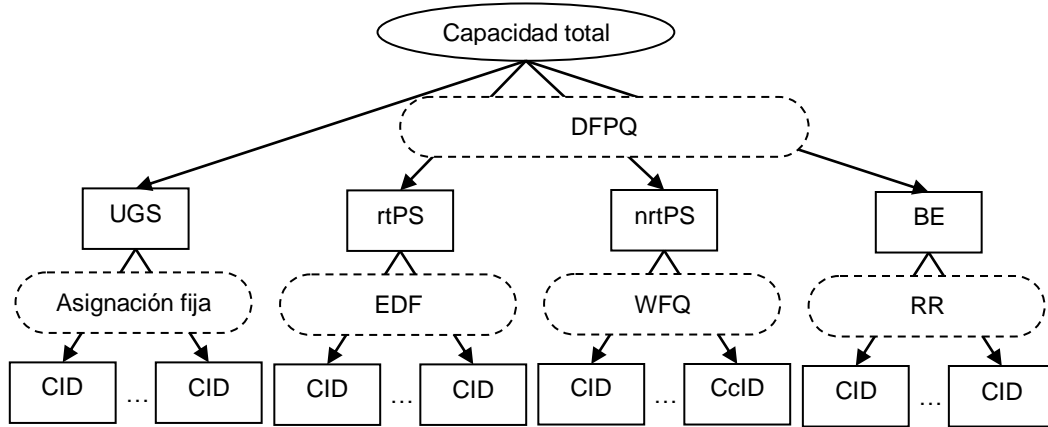


Figura 3.9. Planificador heterogéneo DFPQ, EDF, WFQ Y RR.

Los autores definen la ecuación 3.5 para evaluar la justicia del algoritmo en donde Th_{rtPS} y Th_{BE} corresponden a la capacidad acumulada que obtienen del planificador las conexiones rtPS y BE respectivamente, y S_{rtPS} y S_{BE} corresponden al tráfico generado por las conexiones rtPE y BE. El rango del índice está entre cero (justicia max-min) y uno (justicia proporcional).

$$Justicia = \left| \frac{Th_{rtPS}}{S_{rtPS}} - \frac{Th_{BE}}{S_{BE}} \right| \quad (3.5)$$

El esquema de gestión de QoS es el mismo que se presentó en la figura 3.1. En él, una conexión nueva debe solicitar su admisión al CAC; luego de admitida se clasifica y puede solicitar ancho de banda. Las solicitudes se ubican en colas según la clasificación de la conexión, y se les asigna ancho de banda dependiendo de la capacidad disponible, de los requerimientos QoS y de la dinámica del algoritmo planificador correspondiente al servicio. El módulo de gestión de colas utiliza un mecanismo que elimina los paquetes que no alcanzan a llegar dentro de los límites de retardo, contribuyendo así a la reducción de la Tasa de Paquetes Errados (PER, *Packet Error Rate*)⁵⁴. Una vez se planifican las

⁵⁴ La PER es una medida de desempeño que relaciona la cantidad de paquetes perdidos con el número total de paquetes transmitidos. Se asume la pérdida de un paquete cuando al menos uno de sus bits está errado. la probabilidad de error de

conexiones y el ancho de banda, se generan los UL-MAP y DL-MAP de la trama que se transmiten a las SSs.

El desempeño del planificador se evaluó mediante las curvas de llegada y de servicio para rtPS y BE como se definen en [31]. Para evaluar el efecto de TDD, se dividió la trama en dos proporciones distintas de DL a UL: 1 a 1 y 6 a 4. El escenario de simulación utilizó 18 conexiones, tres por cada tipo de servicio en cada dirección del enlace exceptuando UGS, con velocidades entre 1 y 10 Kbps con variaciones de $\pm 20\%$, y retardos entre 20 y 280 ms. Del análisis de resultados se observa que el planificador presenta un buen desempeño evaluado mediante las curvas de llegada y de servicio. El efecto de la división en subtramas brinda una mayor eficiencia en el uso de los recursos y satisface las conexiones del DL en tráfico asimétrico, aunque puede ser perjudicial cuando existe un alto volumen de tráfico en el UL. También se evaluó la justicia del algoritmo y se comparó con la obtenida por [33], en donde se observa que DFPQ mantiene un índice de justicia pequeño y relativamente constante, siendo más favorable que la obtenida con PQ que crece linealmente con el tráfico en condiciones similares.

3.1.4.3. Planificadores diversos

La clasificación de planificadores diversos recoge propuestas que aprovechan de forma eficiente las características particulares del canal inalámbrico y de WIMAX. Estos planificadores tienen una elaboración distinta y más compleja que la presentada hasta el momento y requieren de técnicas avanzadas de computación para asignar recursos.

3.1.4.3.1. Algoritmo de planificación multinivel (*cross-layer*) con soporte para QoS en redes inalámbricas

El concepto de multinivel (*cross-layer*) en un sistema inalámbrico hace referencia a la interacción e intercambio de información entre funciones de distintos niveles del sistema en una red. En [41] se diseñó un algoritmo de planificación de recursos basado en funciones de prioridad que utiliza un mecanismo de adaptación del enlace para recoger la información de nivel PHY. El planificador a nivel MAC utiliza esta información y se

paquete P_p se relaciona con la probabilidad de error de bit P_e de la siguiente forma: $P_p = 1 - (1 - P_e)^N$, en donde N es el tamaño del paquete. La PER depende del MCS y de la CINR y del tamaño de los paquetes [1].

actualiza dinámicamente según las condiciones del canal. Por organización, el diseño del mecanismo de adaptación del enlace se presenta en la sección 3.3.1.

Para el diseño del planificador se asume que de las N_D ranuras de tiempo (símbolos OFDM) disponibles para carga útil en la trama PHY, N_{UGS} ranuras se asignan directamente a UGS, y que las ranuras sobrantes $N_R = N_{UGS} - N_D$ se distribuyen entre los demás servicios. También se asume que todas las N_R ranuras de tiempo se asignan únicamente a la SS con la mayor prioridad en cada trama. Una SS utiliza un MCS específico en respuesta a sus condiciones del canal. Las métricas QoS que utiliza el algoritmo son: PER y velocidad del servicio para UGS, PER y retardo para rtPS, PER y velocidad mínima reservada para nrtPS, y PER para BE. Las funciones de prioridad $\varphi_i(t)$ que determinan las prioridades de transmisión para la conexión i en la trama t se definen como (3.6) para rtPS, (3.7) para nrtPS y (3.8) para BE.

$$\varphi_i(t) = \left\{ \begin{array}{l} \beta r t \frac{R_i(t)}{R_N} \frac{1}{F_i(t)} \\ \beta r t \end{array} \right\} \left. \begin{array}{l} F_i(t) \geq 1 \\ F_i(t) < 1 \end{array} \right\} \text{para } R_i(t) \neq 0 \quad (3.6)$$

$$\varphi_i(t) = \left\{ \begin{array}{l} \beta n r t \frac{R_i(t)}{R_N} \frac{1}{F_i(t)} \\ \beta n r t \end{array} \right\} \left. \begin{array}{l} F_i(t) \geq 1 \\ F_i(t) < 1 \end{array} \right\} \text{para } R_i(t) \neq 0 \quad (3.7)$$

$$\varphi_i(t) = \beta b e \frac{R_i(t)}{R_N} \quad \text{para } R_i(t) \neq 0 \quad (3.8)$$

Las constantes $\beta r t$, $\beta n r t$ y $\beta b e$ son el primer mecanismo de prioridad que depende del servicio: si el orden de prioridades es $rtPS > nrtPS > BE$, entonces $\beta r t, > \beta n r t > \beta b e$. La función $F_i(t)$ es el segundo mecanismo de prioridad que permite diferenciar entre conexiones que pertenecen al mismo tipo de servicio y depende del retardo para rtPS y de la cantidad de tráfico que recibe una SS por encima de su velocidad mínima reservada para nrtPS. La calidad del canal constituye el tercer mecanismo de prioridad: si R_N corresponde a la cantidad de paquetes que puede transmitir la SS con el MCS más alto, la cual corresponde a la mejor calidad del canal, entonces la relación $R_i(t)/R_N$ permite asignar prioridades según la calidad del enlace. Este último mecanismo de prioridad se conoce como asignación oportunista y aprovecha la diversidad multiusuario para

maximizar la capacidad de un enlace. En (3.6) y (3.7), cuando $F_i(t) < 1$ los paquetes se transmiten lo más pronto posible, en caso contrario se transmiten según su prioridad.

El planificador se aplica para UL y DL en modo TDD y FDD. Se resalta del algoritmo la combinación de mecanismos oportunista (según la ganancia del canal), ponderado (según $F_i(t)$) y de prioridad (según la prioridad de un servicio). Su desventaja es que atiende una SS por trama y requiere mayor investigación para operar con múltiples conexiones.

3.1.4.3.2. Modelo con base en teoría de colas y optimización para RRM en redes inalámbricas de banda ancha IEEE 802.16

En [42] se presenta un marco conjunto de planificador y CAC en TDD que provee una solución RRM para satisfacer los requerimientos de QoS a nivel de conexión y de paquete de diferentes tipos de servicio, al tiempo que maximiza los ingresos económicos de la red. Los requerimientos de nivel de conexión son el número promedio de conexiones activas y la probabilidad de bloqueo de una conexión; los de nivel de paquete son ancho de banda para UGS, retardo para rtPS, velocidad de transmisión para nrtPS y PER para BE.

El planificador consiste en un mecanismo iterativo que asigna ancho de banda con base en la satisfacción de los requerimientos de QoS de nivel de conexión y de paquete, en la definición de funciones de utilidad⁵⁵ para los usuarios y en la utilización de umbrales que delimitan el ancho de banda que se asigna únicamente para las conexiones de un tipo particular de servicio. Cuando llega la solicitud de una nueva conexión, la BS obtiene información de la velocidad a la que la conexión genera paquetes, de los requerimientos QoS y de la SNR media en el receptor, para realizar la asignación de ancho de banda y para calcular la función de utilidad de cada conexión. La formulación de la función de utilidad depende del tipo de servicio de la conexión (UGS, rtPS, nrtPS o BE). La maximización de la suma de funciones de utilidad de todas las conexiones permite una optimización de la red.

El CAC realiza el cálculo de las asignaciones de ancho de banda que se requiere para satisfacer los requerimientos básicos de las conexiones admitidas junto con la conexión

⁵⁵ La función de utilidad es un concepto de la economía que representa el grado de satisfacción de un usuario respecto al servicio provisto, y que se utiliza como una noción de desempeño de la red.

entrante. Si el ancho de banda que se requiere para las conexiones de un mismo tipo de servicio excede un umbral definido, se rechaza la conexión. En caso contrario, esos cálculos se utilizan para asignar el ancho de banda. Si hay ancho de banda excedente luego de satisfacer los requerimientos básicos de las conexiones, éste se utiliza para incrementar de forma iterativa el ancho de banda de una conexión que tenga la función de utilidad más baja hasta que se le asigne el ancho de banda máximo permitido o hasta que la suma del ancho de banda asignado a las conexiones de ese servicio específico alcancen el umbral, o hasta agotar el ancho de banda disponible.

La optimización se realiza utilizando modelos analíticos de comportamiento de colas para analizar el desempeño a nivel de conexión y a nivel de paquete. El análisis a nivel de conexión busca determinar los umbrales de ancho de banda que se deben destinar para cada tipo de servicio teniendo como objetivo la maximización del ingreso económico, el cual se logra al maximizar el número de conexiones que generan un mayor ingreso, pero con la restricción de que la probabilidad de bloqueo de conexión por cada tipo de servicio se debe mantener por debajo de un valor que determina el operador. El análisis a nivel de paquete modela la dinámica de la fuente de tráfico, del canal y de la cola de cada flujo de paquetes (se utilizan dos colas por conexión, una en el UL y otra en el DL) para determinar el desempeño de una conexión de un servicio particular con AMC. Con estas estimaciones se calculan las medidas de desempeño a nivel de conexión y de paquete que se utilizan para optimizar respecto a la satisfacción de los usuarios y al ingreso de la red. El desempeño de esta propuesta se evalúa a través de extensas simulaciones. Las simulaciones se realizaron en un escenario elaborado en que se modelaron una cantidad de características del sistema de forma probabilística. Las simulaciones muestran un desempeño adecuado en cuanto a los requerimientos de nivel de conexión y de paquete que se definen para la red.

3.1.4.3.3. Estudio de desempeño de algoritmos de planificador UL en redes WIMAX PMP

El desempeño de las diferentes propuestas que se han presentado hasta el momento se evalúa mediante simulaciones. Sin embargo, los escenarios de simulación de cada propuesta son particulares y diferentes entre sí haciendo difícil una comparación directa entre las mismas. En [35] los autores abordan este problema y presentan una

comparación entre los algoritmos y propuestas de planificadores en el UL presentados en [37] (sección 3.1.4.1.4), [39] (sección 3.1.4.1.6), [31] (sección 3.1.4.2.1), [41] (sección 3.1.4.3.1) y [42] (sección 3.1.4.3.2), utilizando simulaciones en un escenario común. Los parámetros de desempeño que se utilizan para evaluar cada algoritmo son:

- **Desempeño promedio:** se define como el acumulado de la cantidad de datos que transmite el usuario en el tiempo de simulación.
- **Retardo promedio de la cola:** medida de desempeño para rtPS que se define como el tiempo medio de espera de un paquete en la cola de servicio.
- **Utilización de la trama:** se define como el porcentaje de símbolos OFDM de la trama que se utilizan para carga útil. Los símbolos restantes se utilizan para preámbulos o no se utilizan debido a asignaciones ineficientes de recursos.
- **Pérdida de paquetes:** cantidad de paquetes que se pierden en la cola debido al vencimiento del retardo.
- **Índice de justicia:** se analizan dos tipos de justicia.
 - **Intra clase:** corresponde a la justicia entre conexiones del mismo tipo de servicio y se calcula según 3.9. Éste índice es la relación entre la mínima y la máxima asignación de ancho de banda de las conexiones y se evalúa como justicia máxima-mínima.

$$\text{Índice de justicia } \max - \min = \frac{R_{\min}}{R_{\max}} \quad (3.9)$$

- **Inter clase:** corresponde a la justicia entre las conexiones de diferentes tipos de servicios y se calcula con el índice Jain [42] que se muestra en (3.10), en donde R_i es el ancho de banda de la conexión i , y 1 es el índice máximo de justicia.

$$\text{Índice de justicia Jain} = \frac{(\sum R_i)^2}{n \sum (R_i)^2} \quad (3.10)$$

Los objetivos de la simulación son generales para todos los planificadores y se listan a continuación:

- Analizar el efecto de la combinación de diferentes tipos de servicios y de la variación de las proporciones del tráfico de los servicios respecto al tráfico total.
- Analizar el efecto del preámbulo en la trama UL.
- Determinar el ancho de banda total.

- Determinar el retardo promedio y PER.
- Analizar el comportamiento de los mecanismos de solicitud de ancho de banda.

A partir de los resultados se extraen conclusiones importantes. Ninguno de los esquemas simulados provee un desempeño óptimo con respecto a todos los parámetros y requerimientos QoS, y el planificador se debe elegir con base en los requerimientos de la red y de los perfiles de tráfico. Se debe diferenciar entre redes que soportan aplicaciones con un único tipo de servicio, y otras en que conviven múltiples tipos de servicios. Para el primer tipo de red se recomienda utilizar EDF puesto que las simulaciones muestran bajo retardo, baja PER, alta capacidad y justicia media. Para el segundo tipo de red se muestra más favorable la implementación del planificador que se desarrolló en [42] (sección 3.1.4.3.2) puesto que presenta un nivel medio a alto de desempeño, nivel medio de justicia para rtPS y un desempeño adecuado para manejar tráfico de datos como correo electrónico, navegación web y FTP. WFQ se puede utilizar para obtener una mayor capacidad de la red y a la vez tener un grado aceptable de satisfacción de los requerimientos de QoS para todas las clases de tráfico puesto que ofrece un alto nivel de justicia, un alto porcentaje de utilización de la trama, y un nivel medio a alto de desempeño para todos los tipos de servicios. El planificador *cross-layer* requiere modificaciones para ser utilizado en WiMAX.

En el UL, para el inicio de cada transmisión desde una SS se inserta un preámbulo que es una secuencia conocida por ambas partes y se utiliza para sincronización. Este preámbulo tiene un efecto negativo sobre la utilización de la trama debido a que los recursos que se utilizan para transmitir el preámbulo se dejan de utilizar para transmitir datos. Puesto que para cada transmisión desde y hacia una SS se requiere de un preámbulo, los planificadores que maximizan la cantidad de SSs atendidas en cada trama traen como consecuencia un bajo porcentaje de utilización de trama debido a la cantidad de recursos que se utilizan en la transmisión de los preámbulos. La eficiencia en la utilización de la trama crece conforme crece la duración de la misma, de forma que la mayor eficiencia (aprox. 78%) se observa para una duración de trama de 20 ms, mientras que la menor eficiencia (inferior al 40%) se observa para una duración de 2.5 ms. Por otra parte, el planificador WFQ y el que se desarrolló en [31] (sección 3.1.4.2.1) presentan la mayor eficiencia en el porcentaje de utilización de la trama; el planificador que se

desarrolló en [42] (sección 3.1.4.3.2) presenta un porcentaje bajo de utilización de trama para duraciones de trama inferiores a 8 ms en comparación con los demás planificadores. El planificador *cross-layer* [41] (sección 3.1.4.3.1) presenta la peor eficiencia en el porcentaje de utilización de trama debido a que solo asigna ancho de banda a una SS por cada trama.

Finalmente los autores evaluaron la eficiencia de los mecanismos de solicitud de ancho de banda para transmitir solicitudes desde las SSs hacia la BS cuando se utilizan los diferentes planificadores y bajo diferentes condiciones de tráfico en la red. Los mecanismos de solicitud que se evaluaron son la contención y *piggyback* que se analizaron de forma previa en la sección 3.2.3.2. Para el análisis se plantearon tres escenarios, en el primero se utilizó un segmento fijo de contención en la subtrama UL, en el segundo se definió que el espacio no utilizado en la trama se utilice para contención; y en el tercero, sólo se solicitaba ancho de banda mediante solicitudes *piggyback*. El segundo escenario puede verse como una mejora del primero y permite atender un número mayor de solicitudes en condiciones de poco tráfico. Cuando el tráfico se incrementa, los paquetes empiezan a represarse y en el tercer escenario (que utiliza *piggyback*) atiende un mayor número de solicitudes.

3.2. ADAPTACIÓN DEL ENLACE

La elección de un MCS con mayor o menor eficiencia espectral para un enlace se basa en umbrales de SNR de entrada y de salida, y en regiones de traslape como se muestra en la figura 3.10 [12]. Los umbrales se definen para mantener objetivos de red como PER, BER, eficiencia espectral o una combinación de ellos.

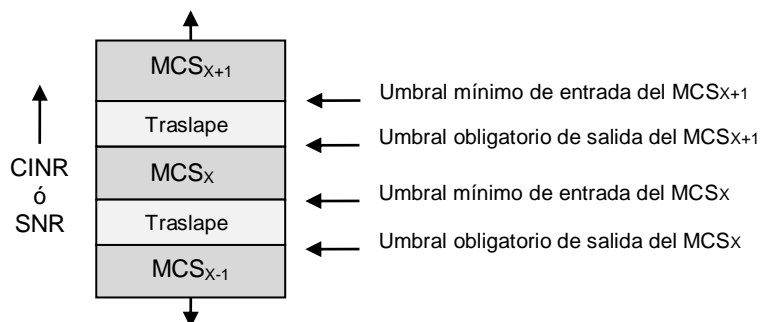


Figura 3.10. Umbrales de decisión para adaptación del enlace.

3.2.1. Algoritmo de Planificación Multinivel con Soporte para QoS en Redes Inalámbricas

Para UGS, el MCS se ajusta al inicio de la transmisión y no varía durante la existencia de la conexión; en los demás tipos de servicio se ajusta el MCS para maximizar la velocidad de transmisión de datos y mantener un límite de PER. El algoritmo compara la CINR del enlace con los umbrales dentro de los cuales se debe utilizar un MCS específico. El estudio se enfoca en determinar los umbrales óptimos para mantener una PER determinada por el operador. El rango total de SNR (Y) se divide en seis intervalos delimitados por Y_n donde $n = \{0, 7\}$ y el modo de transmisión n se elige si $Y = \{Y_n, Y_{n+1}\}$ para $n = \{1, 6\}$. Entonces el objetivo es encontrar los valores Y_n aproximando la PER en función de la SNR en un canal AWGN según la ecuación (3.11), en donde an , gn y Y_{pn} son constantes que se definen utilizando curvas de PER [41]. Los límites Y_n se encuentran haciendo $PER_n(Y) = P_o$, donde P_o es el límite de la PER en el sistema, y despejando de (3.11) como se muestra en (3.12). De esta forma se garantiza que $PER \leq P_o$.

$$PER_n(Y) \approx \begin{cases} 1 & 0 < Y < Y_{pn} \\ ane^{-gnY} & Y \geq Y_{pn} \end{cases} \quad (3.11)$$

$$Y_0 = 0$$

$$Y_n = \frac{1}{gn} \ln \left(\frac{an}{P_o} \right) \quad n=1, \dots, 7 \quad (3.12)$$

$$Y_{7+1} = +\infty$$

3.2.2. Algoritmo y Métrica de Adaptación del Enlace para el Estándar IEEE 802.16

En [43] se presenta un mecanismo de adaptación del enlace en el DL que define los umbrales CINR dentro de los cuales se puede seleccionar un MCS óptimo en la interfaz radio según las condiciones del enlace, de forma que se maximice la eficiencia espectral y se minimice el retardo extremo a extremo.

Los autores encontraron que el retardo extremo a extremo de TCP es una métrica que correlaciona la eficiencia espectral y la BER con la SNR de un enlace reflejando de forma adecuada las condiciones físicas del canal. El comportamiento del retardo extremo a extremo de TCP respecto a la SNR⁵⁶ se evalúa para cada MCS a utilizar en la interfaz radio⁵⁷ en escenarios de simulación reales para los peores casos de latencia y de carga de tráfico de internet. Para la elección de los umbrales se selecciona un retardo máximo permitido de extremo a extremo. Cuando para un MCS la SNR disminuye por debajo de un valor determinado y el retardo extremo a extremo de TCP resulta en un valor mayor al máximo permitido, este valor es el umbral obligatorio de salida para ese MCS. Si la SNR es suficiente para que más de un MCS opere correctamente, se elige el de mayor eficiencia espectral y esta SNR constituye el umbral mínimo de entrada (*minimum entry threshold*) para ese MCS. De esta forma, el MCS elegido maximiza la capacidad sujeta a restricciones de retardo extremo a extremo para el valor de SNR.

El mecanismo se implementó mediante un algoritmo simple de búsqueda que utiliza la CINR del enlace, la compara con los umbrales y devuelve el MCS correspondiente. El algoritmo no monitorea el retardo extremo a extremo TCP en el sistema sino que lo utiliza para determinar los umbrales y monitorea el valor de CINR para realizar el control. Su principal inconveniente es que no se complementa con otras métricas QoS.

3.2.3. Optimización del Esquema de Modulación WiMAX multinivel con Código de Borrado

En [44] se propone un mecanismo multinivel (*cross-layer*) de adaptación del enlace que, a diferencia de los algoritmos simples de búsqueda, utiliza una base de datos que se actualiza dinámicamente. La base de datos relaciona la PER de nivel IP (red) que se presenta cuando se utiliza un determinado MCS y FEC de nivel superior para variaciones en pasos de 0.1 dB de la SNR. La PER de nivel IP se obtiene habilitando la funcionalidad opcional ARQ en la MAC que genera estadísticas de paquetes entregados y perdidos en niveles superiores. El código FEC de nivel superior se aplica a nivel IP y se basa en Códigos Convolucionales Separables de Máxima Distancia (*Maximum Distance Separable Convolutional Codes*) o códigos de borrado [45].

⁵⁶ La SNR se utiliza para efectos teóricos de evaluación. Para efectos prácticos se utiliza la CINR.

⁵⁷ WiMAX permite utilizar hasta siete MCS diferentes en tiempo de operación [12].

La base de datos se inicializa con información de simulaciones, luego el algoritmo la actualiza constantemente con información real mediante una fórmula que relaciona la PER en función del FEC de nivel superior, del MCS y de la SNR; de esta forma la base de datos considera las condiciones dinámicas del canal. El algoritmo calcula los porcentajes de pérdidas que ocurrirían al utilizar el anterior y el siguiente MCS a partir de la información previamente almacenada en la base de datos. A partir de los porcentajes de pérdidas y de la eficiencia espectral de los MCS se determina cuál MCS brinda mayor *goodput*⁵⁸ para el valor de SNR actual y modifica la asignación para la transmisión.

Cuando en los algoritmos de tabla de búsqueda la SNR llega a un umbral determinado, inmediatamente se cambia el MCS a uno más robusto pero con menor eficiencia espectral, esto se traduce en una reducción abrupta del *goodput* que recibe el nivel IP. La ventaja del algoritmo que se presenta en la presente sección es que reduce gradualmente la PER manteniendo el mismo MCS mientras varía la FEC de nivel superior, y sólo modifica el MCS cuando el *goodput* es menor que el generado por un MCS con menor eficiencia espectral, permitiendo economizar RRs. Las simulaciones corroboran que existe una variación más suave del *goodput* con respecto a los algoritmos de tabla de búsqueda para la misma variación en la SNR. También se presenta un caso de estudio para demostrar la mejora en la eficiencia espectral y en el *goodput* global de los RRs, reflejada en el aumento de las conexiones UGS que soporta la red.

3.2.4. Algoritmo de Adaptación del Enlace en Sistemas WiMAX Basados en MIMO

En [46] se presenta un algoritmo de adaptación del enlace para el DL en un entorno MIMO 2x2⁵⁹. MIMO 2x2 tiene dos modos de operación: matriz A y matriz B. La matriz A transmite un mismo flujo de datos de forma redundante desde antenas múltiples utilizando Codificación Bloque Espacio Temporal (STBC, *Space-Time Block Coding*) para implementar diversidad espacial, la cual mejora la capacidad del receptor de detectar información y mantener el desempeño respecto a BER en canales afectados por el desvanecimiento. La matriz B implementa SM que utiliza dos o más elementos de antena en la BS y la SS para procesar flujos de datos de forma independiente. Los datos se

⁵⁸ El *goodput* es la cantidad de información útil que se entrega por unidad de tiempo al protocolo del nivel de aplicación y es igual al *throughput* menos encabezados, errores y retransmisiones [47].

⁵⁹ Hace referencia a un esquema MIMO que utiliza 2 antenas en transmisión y 2 en el receptor.

dividen entre las antenas y se transmiten simultáneamente como flujos separados no redundantes. El receptor separa los flujos mediante técnicas de procesamiento espacio temporal para mejorar la capacidad, pero su funcionamiento es muy sensible ante variaciones del canal y se restringe sólo a canales con muy buena calidad.

Esta propuesta analizó el efecto de MIMO en el mecanismo de adaptación del enlace. Por ejemplo, simulaciones de las curvas de PER muestran que QPSK 1/2 con SM y 16-QAM 1/2 con STBC tienen la misma eficiencia espectral, pero el segundo requiere menor SNR; además, SM requiere canales MIMO con correlación baja o nula que son difícil de lograr; esto brinda un punto de diseño para el algoritmo. Las simulaciones de evaluación del algoritmo muestran que la capacidad tiene un mejor desempeño a nivel UDP comparada con dos algoritmos de tabla de búsqueda con umbrales fijos, pero con el costo de un incremento en la PER respecto a uno de los dos algoritmos, aunque menor al 5%. También se analiza la probabilidad de que el algoritmo elija uno de los dos esquemas MIMO dependiendo de las condiciones de correlación de los canales y de la SNR, demostrando un comportamiento adecuado respecto a la elección entre SM y STBC.

El algoritmo se compone de cuatro pasos: actualización de estadísticas, actualización de umbrales, selección de un MCS, y ajuste según las condiciones del canal. En la actualización de estadísticas, el algoritmo mantiene estadísticas de la SNR y del número de paquetes perdidos, y recibidos para diferentes condiciones de correlación de canales MIMO para cada MCS. En el segundo paso se actualizan dos tipos de umbrales: el umbral de ingreso a un perfil de ráfaga que representa la SNR mínima para utilizar un MCS, y el umbral de prueba del perfil de ráfaga que se utiliza para probar posibles mejoras en el estado de un canal y se inicializa 3 dB por debajo del umbral de ingreso. Ambos umbrales se actualizan dinámicamente con base en las estadísticas. Si para un MCS específico se puede mantener la PER con una SNR menor que el umbral de entrada actual, entonces los umbrales se modifican y reducen; pero si el umbral de entrada no puede mantener la PER, los umbrales se incrementan hasta valores más adecuados. En el tercer paso el algoritmo recorre diferentes MCSs comenzando por uno de mayor eficiencia espectral que el correspondiente según la SNR actual, y descendiendo hasta que el MCS se adecúe a los límites de la PER. En el cuarto paso el algoritmo ajusta la selección del MCS a partir del análisis de las estadísticas de cambios de las condiciones de correlación de los canales MIMO respecto a las curvas de PER simuladas.

3.3. CONTROL DE POTENCIA

El control de potencia juega un papel importante para determinar la velocidad de transmisión de datos en el UL y en el DL en entornos limitados por interferencia, y se relaciona con el mecanismo de adaptación del enlace. A continuación se presentan algunos esquemas de asignación y/o control de potencia.

3.3.1. Asignación de Potencia de Transmisión para Sistemas OFDM Multiusuario

En [48] se presenta un esquema de asignación de potencia para maximizar la velocidad de transmisión en el DL de sistemas OFDM multiusuario bajo las limitantes de potencia total de transmisión y BER. Los autores no se enfocaron hacia WiMAX sino a un sistema OFDM general unicelda, y no tienen en cuenta los esquemas de asignación de subportadoras y las estructuras de trama que especifica el estándar, tampoco considera la CCI multicelda, aunque sus resultados son interesantes como un punto de partida.

Este esquema asigna en primer lugar subportadoras a los usuarios, y luego asigna potencia a las subportadoras teniendo en cuenta la limitante de potencia total de transmisión. Las subportadoras se asignan para aprovechar la diversidad multiusuario, el sistema utiliza información del estado del canal para determinar la CINR de las subportadoras para cada usuario, y con base en esta información asigna cada subportadora al usuario con las condiciones del canal de forma que se maximice la velocidad de transmisión de datos sobre esa portadora. Los autores no especifican la cantidad de subportadoras que se asignan para cada usuario. Si un usuario no tiene las mejores condiciones para ninguna subportadora, entonces, no se le asigna ninguna subportadora debido a que el esquema no maneja requerimientos de velocidad por usuario. Posteriormente se asigna potencia de forma equitativa entre todas las subportadoras.

Las simulaciones que se presentan en el artículo demuestran un desempeño superior de la propuesta respecto al caso de asignación fija de subportadoras y de potencia cuando se compara la eficiencia espectral contra SNR en ambos casos. También se observa que

cuando el número de usuarios en el sistema es lo suficientemente elevado se supera el límite de eficiencia espectral de un canal AWGN debido a la diversidad de multiusuario.

3.3.2. Aprovisionamiento Conjunto de Control de Potencia, Formación de Haces y Ancho de Banda para Asignación Óptima de QoS

En [49] los autores presentan una propuesta para la optimización conjunta de los recursos de potencia, ancho de banda y formación de haces o AAS en una red inalámbrica multiusuario y multicelular en general, teniendo como objetivos principales la satisfacción del usuario y mantener un alto nivel de justicia, y bajo las limitantes de ancho de banda total, condiciones de interferencia y número de elementos de antena. Aunque esta propuesta no se enfoca a WiMAX directamente, puede aplicarse a ella sin ningún inconveniente. El algoritmo define funciones de utilidad para direccionar los objetivos de satisfacción del usuario y justicia en las asignaciones; la maximización de las sumas de las funciones de utilidad es un objetivo de la red que se lleva a cabo en diferentes pasos.

Primero, se suponen asignaciones fijas de ancho de banda y una configuración AAS conocida. En estas condiciones, se modela la potencia y la interferencia en recepción y se utiliza un algoritmo que maximiza la suma de utilidades asignando potencia bajo condiciones de interferencia. Segundo, el objetivo es maximizar la suma de utilidades pero modelando la configuración de AAS. Las funciones de utilidad se plantean en función de la CINR que a su vez se plantea en función de la potencia y de AAS bajo las condiciones de interferencia del primer paso. El algoritmo busca las configuraciones de AAS y potencia que maximicen la suma de utilidades y preserven los niveles de CINR. Tercero, las funciones de utilidad se plantean y optimizan respecto al ancho de banda y a la potencia suponiendo una configuración AAS fija y preservando los niveles de CINR. Cuarto, se realiza una asignación conjunta del ancho de banda, potencia y configuración de AAS, que optimice la suma de utilidades preservando los niveles de CINR. Este último paso es una combinación de los pasos dos y tres, el algoritmo final de optimización de variables sigue el procedimiento del paso tres para optimizar la suma de utilidades a partir del ancho de banda y potencia y preservando la CINR. El algoritmo salta al procedimiento del paso dos utilizando las asignaciones de potencia que se obtienen del procedimiento anterior para optimizar conjuntamente potencia y formación de haces suponiendo ancho de banda fijo.

El algoritmo se validó mediante simulaciones para demostrar la maximización de la suma de utilidades. Los autores además plantean que existe una relación de intercambio entre potencia, ancho de banda y configuración AAS que producen una misma optimización de la suma de funciones de utilidad, de forma que si se incrementa una de las variables se reduce el requerimiento de la otra y viceversa manteniendo constante la utilidad. De esta forma, con base en los costos de implementación y operación de la red se puede elegir cuál de las variables maximizar para mantener el mismo desempeño.

3.4. TECNOLOGÍAS AVANZADAS DE ANTENAS

AAS permite aumentar la CINR de una SS a través de la combinación de múltiples señales de forma coherente en el receptor, la orientación de haces hacia múltiples SSs simultáneamente, la dirección de los nulos hacia las fuentes de interferencia y la reducción del número de usuarios a los cuales sirve un lóbulo principal. El incremento de la CINR puede aprovecharse para reducir la potencia de transmisión, extender el alcance con la misma modulación, o utilizar un MCS más eficiente. Los múltiples lóbulos principales con anchos de haz más estrechos también se pueden utilizar para aumentar la eficiencia en el reuso de frecuencia ya que cada lóbulo se asemeja a un sector de menor abertura, y de esta forma la eficiencia espectral puede ser incrementada linealmente con el número de elementos de antena [12]. De la misma forma, un arreglo de N elementos puede formar N lóbulos principales cada uno de los cuales sirve sólo a una parte de los usuarios de un sector permitiendo mejor control de tráfico.

MIMO utiliza N_T antenas en transmisión y N_R antenas en recepción ($N_T \times N_R$), aunque debido a la complejidad y al tamaño de implementar antenas adicionales se utilizan máximo dos antenas en la SS que resultan en esquemas ($2 \times N_R$) en el UL y ($N_T \times 2$) en el DL. La separación mínima entre antenas de la SS puede ser de $\lambda/2$ [1], que para la frecuencia de 3.5 GHz es equivalente a 4.3 cm. Como se menciona en la sección 3.2.4., MIMO tiene dos modos de operación: matriz A (STBC), y matriz B (SM), por lo cual se recomienda la implementación de un esquema de conmutación entre los dos modos como el que se presenta en [50]. MIMO matriz A mejora la SNR de forma logarítmica con $N_T \times N_R$, aunque no mejora la capacidad, un esquema (2×2) incrementa la SNR en 3dB respecto a (1×1) [51]. La capacidad teórica en MIMO matriz B aumenta de forma

logarítmica con $N_T \times N_R$ pero tiene baja inmunidad contra errores y requiere de buenas condiciones de SNR y una baja correlación de los canales [51]. Por ejemplo, un esquema (4x2) duplica la capacidad respecto a (2x2), y este a su vez duplica la capacidad respecto a (1x1) [1].

3.5. GESTIÓN DE INTERFERENCIA.

Debido a la arquitectura celular de WiMAX fijo, la interferencia afecta el UL y el DL y puede ser de canal adyacente y CCI, generada por transmisores en una misma celda, en otras celdas del mismo operador o entre operadores. La interferencia entre dos operadores puede presentarse en dos escenarios distintos, el primero cuando dos operadores comparten una misma área geográfica de servicio pero con diferente espectro (canal adyacente); y el segundo cuando los operadores comparten el mismo espectro pero en áreas geográficas distintas y adyacentes con pequeños traslapes en la cobertura (CCI). La interferencia no se puede eliminar e incluso puede llegar a bloquear por completo las comunicaciones. En WiMAX se utilizan mecanismos de gestión de interferencia que consisten en estrategias más que en algoritmos, y se conocen como técnicas de mitigación que se utilizan para mantener la interferencia en niveles tolerables. Estos mecanismos se analizan a continuación.

3.5.1. Medición de Interferencia

La interferencia se calcula utilizando las medidas de RSSI y CINR que se realizan en los receptores de la BS y la SS. La SS debe transmitir estas medidas a la BS a través de los mensajes de gestión de nivel MAC [12]. Es necesario diseñar mecanismos para intercambiar información entre BSs de diferentes celdas para lograr una coordinación en la gestión global de la interferencia ya que no son parte del estándar [30].

3.5.2. Técnicas de Diseño

La interferencia se puede mitigar utilizando técnicas adecuadas de diseño como se presenta en el anexo A. Algunas de estas técnicas son: variación de las bandas de guarda, subcanalización, polarización alternada, técnicas de diversidad, precisión de los filtros (la precisión de un filtro se compensa con bandas de guarda), entre otros.

3.5.3. Mitigación por Control de Potencia

El control de potencia es una técnica de mitigación de interferencia que utiliza la BS para modificar la potencia en el UL mediante algoritmos como los que se presentaron en la sección 3.2. Cuando las condiciones del canal mejoran para una SS, esta puede generar interferencia innecesaria en la red y el algoritmo debe reducir la potencia de transmisión mientras se mantenga un valor consistente de E_b/N_0 ⁶⁰ para el MCS que está utilizando, o en caso contrario puede aumentarla cuando hay fuerte interferencia en recepción. Cuando una SS genera fuerte interferencia, el mecanismo de control de potencia puede trabajar en colaboración con el mecanismo de adaptación del enlace para utilizar un MCS con menor eficiencia espectral y hacer una fuerte reducción en la potencia de transmisión.

En el documento [30] se plantea un escenario de colaboración entre BSs para que las BSs de celdas afectadas por una fuerte interferencia desde otra celda en particular, puedan informar a la BS que la origina sobre esta condición, de forma que se inicie un proceso de control de los niveles de potencia de transmisión de las SSs subordinadas en esa celda. Este procedimiento puede implicar una degradación de la BER o de la eficiencia espectral del MCS y en consecuencia la disminución en la capacidad del UL en la celda que causa la interferencia.

3.5.4. Mitigación por Tecnologías de Antenas

El esquema de la sección 3.2.2 es un ejemplo de aprovisionamiento conjunto entre control de potencia y tecnologías de antena que proveen mitigación de interferencia. El uso de AAS reduce la interferencia debido a la reducción en el ancho de los haces de los arreglos de antenas múltiples y a la capacidad de dirigir nulos hacia fuentes principales de interferencia. El peor caso de interferencia con AAS se presenta cuando los lóbulos principales de dos haces interferentes se encuentran, aunque esta situación depende de la aleatoriedad de la orientación de los lóbulos AAS en tiempo y espacio de los transmisores interferentes [30]. De manera similar se utiliza MIMO para mitigar interferencia. Cuando se utilizan dos o más elementos de antena en transmisión se puede configurar formación de haces como en AAS junto con MIMO para mejorar la cobertura, la

⁶⁰ Relación de energía de bit a densidad espectral de potencia de ruido. Es una medida normalizada de SNR que se utiliza para comparar la BER de diferentes esquemas de modulación digital.

capacidad de detección de información o la velocidad de transmisión de datos. La información que se transmite por cada antena se codifica utilizando una matriz que representa dos formas diferentes de codificación: STC y otra sobre los parámetros físicos de la señal como intensidad y fase. Una BS vecina de una determinada celda puede informar sobre interferencias excesivas, de forma que la BS de esa celda puede elegir una matriz que maximice la CINR de la propia celda y minimice la interferencia sobre celdas vecinas [30].

3.5.5. Reuso Fraccional de Frecuencia

Un patrón de reuso de frecuencia se puede definir de la forma $(N_c \times N_s \times N_f)$, en donde N_c es el número de celdas en un grupo, N_s el número de sectores por celda y N_f el número de canales que se utiliza una y sólo una vez en la celda [23]. La figura 3.11 a) muestra un patrón de reuso $(1 \times 3 \times 1)$ que utiliza tres sectores por cada celda y asigna el mismo rango de frecuencias en cada uno de los sectores para todas celdas. Por ejemplo, un operador con un espectro de 13.5 MHz en el DL y con una eficiencia espectral de 2.2 bps/Hz por sector, tiene una capacidad de 29.7 Mbps por sector y un total de 89.1 Mbps por celda; sin embargo, en este esquema de reuso de frecuencia, la CINR se reduce considerablemente debido a la CCI, aumentando la BER, generando una probabilidad de bloqueo significativa y disminuyendo la capacidad del canal [23]. Por otra parte, un esquema $(3 \times 3 \times 3)$ como en la figura 3.11 b) utiliza una agrupación de tres celdas con tres sectores cada una, en donde cada uno de los sectores utiliza un rango de frecuencias diferente (canales). En las mismas condiciones de espectro de frecuencia y eficiencia espectral del ejemplo anterior, a cada sector le corresponde un canal de 1.5 MHz con una capacidad de 3.3 Mbps por sector y una capacidad de 9.9 Mbps por celda; sin embargo, la CCI se reduce considerablemente por el aumento en la distancia de reuso de frecuencia, los niveles de CINR en la celda mejoran y disminuye la BER [23].

El Reuso Fraccional de Frecuencia (FFR, *Fractional Frequency Reuse*) hace referencia a la utilización de diferentes tasas de reuso de frecuencia en una misma celda [30]. El concepto de reuso fraccional de frecuencia se muestra en la figura 3.13. En un espectro de 21 MHz para el DL⁶¹ la frecuencia se puede dividir en cuatro canales: f_1 de 10.5 MHz y

⁶¹ Este es el espectro asignado en Colombia a un operador WiMAX nacional como UNE o ETB [53].

f2, f3 y f4 con 3.5 MHz cada uno. Si la eficiencia espectral es 2.2 bps/Hz en cada sector, la capacidad es de 23.1 Mbps para f1 y de 7.7 Mbps para los demás canales.

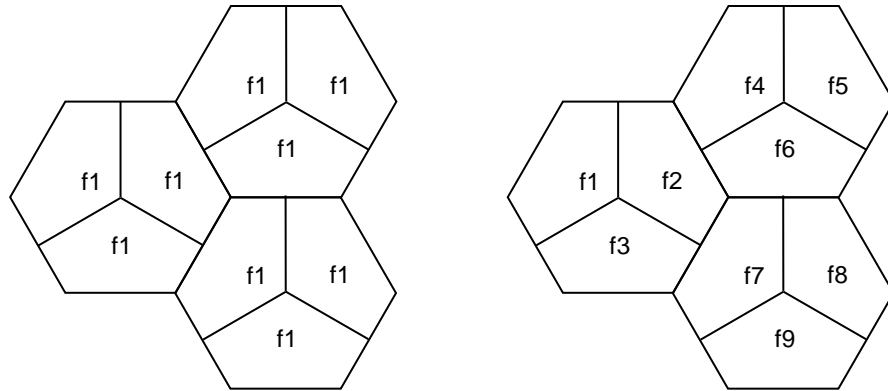


Figura 3.11. a) Esquema de reuso (1x3x1) y b) Esquema de reuso (3x3x3).

La celda atiende a los usuarios más internos de la celda utilizando un patrón de reuso de frecuencia (1x3x1) con una capacidad de 23.1 Mbps, mientras que los usuarios mas externos utilizan un patrón de reuso de frecuencia (3x3x3) con una capacidad de 7.7 Mbps. De esta forma se incrementa la eficiencia espectral de la celda y se juega con los valores de interferencia. La celda utiliza la CINR para determinar el tipo de reuso que asigna a una SS. El umbral que separa ambos tipos de reuso es un problema de optimización que se aborda en [30]. Para soportar FFR, la trama se puede dividir como se muestra en la figura 3.14; aunque requiere mecanismos de sincronización para su correcto funcionamiento.

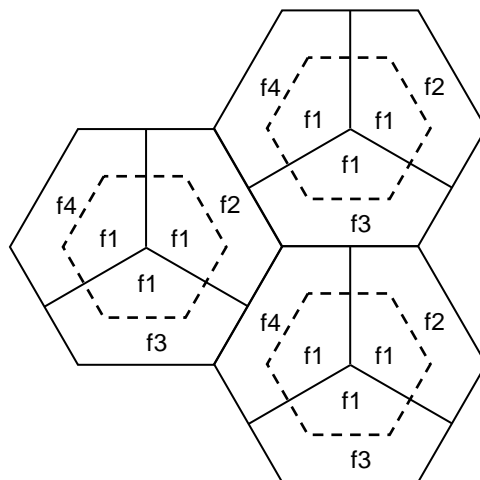


Figura 3.12. Concepto de FFR.

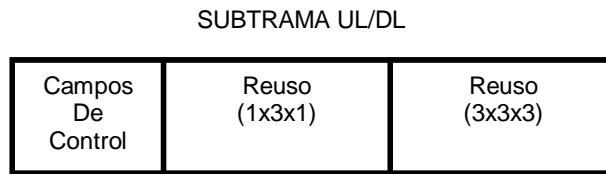


Figura 3.13. División de la subtrama para el soporte de FFR.

3.5.6. Recomendaciones para Mitigación de Interferencia entre Operadores

Debido a la dificultad de coordinación entre redes de diferentes operadores, de [52] se pueden extraer recomendaciones para mitigación de interferencia en este caso específico:

- Los operadores deben incluir márgenes de interferencia en el diseño de la red para aceptar el efecto de otros operadores aún siendo los primeros y únicos en el área.
- Los operadores deben colaborar entre sí para limitar la interferencia desde el despliegue de la red; esto implica negociaciones detalladas entre operadores para mitigar áreas problemáticas en función de sus costos económicos.
- Los operadores deben recurrir a reguladores en casos en que sus recursos se traslapen.

3.6. VENTAJAS ALCANZADAS POR RRM

En la presente sección se realiza una recopilación de las ventajas que pueden lograrse mediante la implementación de diferentes mecanismos RRM en una red WiMAX fijo. Las siguientes ventajas se extraen de la información del análisis de desempeño a partir de simulaciones que presenta cada autor; por este motivo, es imposible extraer presentar ventajas absolutas o numéricas de mejora de desempeño puesto que estas sólo pueden obtenerse para un escenario de simulación particular que evalúe el desempeño de un grupo limitado de algoritmos, lo cual está por fuera del ámbito del presente proyecto.

3.6.1. Planificador

El planificador influye directamente sobre la capacidad de la red y de cada usuario individual. La capacidad se define como la cantidad de datos que puede ser entregada

a los usuarios y recibida desde los usuarios o como la cantidad de usuarios que puede soportar por una celda, un sector, o un canal como se menciona en el anexo A. Un planificador adecuado debe lograr un buen balance entre los tres tipos de justicia que se describen en la sección 3.1.2.

Respecto a los planificadores presentados en la sección 3.1.4., los planificadores homogéneos WFQ y EDF presentan un incremento en el porcentaje de utilización de trama lo que a su vez aumenta la capacidad del enlace [35]; además, mejoran la capacidad que se entrega a cada usuario pero con el costo de la reducción de la cantidad de usuarios atendidos en cada trama [35]. Estos planificadores tienen baja complejidad de implementación; sin embargo, no son adecuados para manejar diferentes tipos de tráfico de forma simultánea en una red debido a que no realizan una diferenciación justa o proporcional entre diferentes tipos de servicio, lo que conlleva a la escasez o anulación de la capacidad en los servicios requerimientos QoS menos exigentes.

Aunque el planificador basado en teoría de colas [42] (sección 3.1.4.3.2) no alcanza el mismo desempeño en cuanto a porcentaje de utilización de trama ni capacidad para cada tipo de servicio que WFQ y EDF, en [35] se observa que su desempeño es mejor que el resto de los tipos de planificadores, y que además permite asignaciones más proporcionales entre conexiones de diferentes tipos de servicio en una misma red.

3.6.2. Adaptación del Enlace.

Los algoritmos de adaptación del enlace se diseñan para mejorar determinado indicador de desempeño, y en consecuencia, la ventaja que logra el algoritmo se relaciona directamente con ese indicador. Por ejemplo, los algoritmos de adaptación del enlace que se presentaron en las secciones 3.2.1. y 3.2.4. mejoran la PER del enlace, de forma que como ventaja directa se obtiene un incremento de la PER, y las ventajas indirectas son por una parte el incremento de la capacidad al mejorar el *goodput* debido a la reducción en retransmisiones o en la cantidad de paquetes perdidos, y por otra el incremento en cobertura debido a que si se tienen un objetivo preestablecido de PER, este se puede lograr con una menor SNR, lo que a su vez permite incrementar las pérdidas de propagación y en consecuencia a una mayor distancia.

Por su parte, los algoritmos analizados en las secciones 3.2.2. y 3.2.3. permiten reducir el retardo extremo a extremo y maximizar el *goodput* respectivamente.

3.6.3. Control de Potencia.

El objetivo del control de potencia es mejorar el desempeño individual de cada SS frente a atenuaciones por pérdidas de propagación o por fluctuaciones en la potencia debido a las condiciones del enlace. Este objetivo busca incrementar o mantener una determinada SNR en el enlace lo que genera una ventaja en la BER y en consecuencia en la PER. Esta ventaja puede utilizarse a su vez para aumentar cobertura manteniendo la misma capacidad, o para incrementar la capacidad pero manteniendo la cobertura.

3.6.4. Gestión de Interferencia.

En redes celulares, el desempeño se ve afectado por interferencia más que por ruido, y se utiliza la medida de CINR en lugar de la SNR como medida de calidad del enlace; de esta forma, la implementación de mecanismos de gestión de interferencia brinda mejoras en diferentes aspectos del desempeño. Un incremento en la CINR permite reducir la BER del enlace y en consecuencia reducir la PER, incrementar capacidad o cobertura de forma excluyente; el incremento en la capacidad o en la PER pueden mejorar el *goodput* de forma independiente.

El control de potencia en conjunto con el mecanismo de adaptación del enlace permite la reducción de interferencia sobre celdas adyacentes y cocanal; sin embargo, existe un intercambio entre indicadores de desempeño. Suponiendo una SS en una posición estática, si se utilizando mayor potencia se mejora su CINR y en consecuencia se incrementa su capacidad individual, y la capacidad total de la celda; sin embargo, la interferencia sobre otras celdas se incrementa y desmejora la CINR de estas celdas. Por otra parte, la reducción en la potencia disminuye la eficiencia de los RR, y reduce la capacidad en términos de velocidad de transmisión o en el número de conexiones atendidas por el planificador de paquetes. Los mecanismos de gestión de interferencia buscan un equilibrio, de forma que se obtenga como ventaja un incremento no individual, sino global en capacidad y cobertura.

3.7. CONCLUSIÓN DEL CAPÍTULO

En este capítulo se realizó la una investigación no exhaustiva de una serie de algoritmos, estrategias y tecnologías que permiten implementar los mecanismos RRM definidos en el capítulo dos. Para cada uno de estos mecanismos RRM, se analizó al menos un algoritmo o estrategia, y se describieron sus principios de funcionamiento, su fortalezas y sus debilidades. A partir de esta investigación se determinó una serie de ventajas que pueden alcanzarse utilizando RRM.

4. RECOMENDACIONES TÉCNICAS BASADAS EN RRM PARA LA MEJORA DEL DESEMPEÑO EN WIMAX FIJO

En el presente capítulo se realiza un análisis que recopila el trabajo de los capítulos anteriores para determinar el desempeño (capacidad y cobertura) de la red, su viabilidad para la prestación de servicios exigentes como IPTV y una serie de recomendaciones técnicas para mejorar su desempeño.

4.1. ANÁLISIS DE CAPACIDAD Y COBERTURA EN UNA RED WiMAX

A lo largo de esta sección se realiza un análisis de desempeño en cuanto a capacidad y cobertura tanto teórica como real de una red de acceso WiMAX fijo.

4.1.1. Cobertura

Para efectos de diseño se considera que el área de cobertura de la BS es un hexágono con radio igual al rango de la celda⁶². Sin embargo, en la práctica la forma y extensión del área de cobertura varía considerablemente en función de las condiciones del entorno.

Para conocer el área de cobertura de una BS, primero se calcula el rango de la celda a partir de la ecuación de Balance del Enlace (RLB, *Radio Link Budget*) que calcula la potencia de recepción con base en las ganancias, las pérdidas y la potencia de transmisión de un sistema; la ecuación 5.1 muestra de forma simplificada esta ecuación:

$$P_{RX} = P_{TX} + G_{TX} + G_{RX} - L_{TX} - L_{RX} - M + G - L_P \quad (5.1)$$

En donde P_{RX} es la potencia recibida, P_{TX} es la potencia transmitida, G_{TX} y G_{RX} son las ganancias de antena en el transmisor y receptor respectivamente, L_{TX} y L_{RX} son las pérdidas en las líneas de transmisión entre el radio y la antena del transmisor y receptor respectivamente, M corresponde a los diferentes márgenes de implementación como el margen de desvanecimiento por sombra y de penetración en edificaciones entre otros, y G

⁶² Distancia máxima desde la BS dentro de la cual se obtiene en recepción una SNR determinada.

corresponde a ganancias adicionales que pueda experimentar el sistema como las ganancias por codificación, y L_P corresponde a las pérdidas por propagación; sin embargo, se debe tener en cuenta que en un sistema real esta ecuación depende de muchas otras variables del sistema, del transmisor, del receptor y del entorno.

Un factor importante en la ecuación 5.1 son las pérdidas de propagación L_P , que en entornos NLOS se estiman utilizando los diferentes modelos de propagación que se presentaron en la sección 2.1.1.2.3. Cabe resaltar que diferentes modelos de propagación pueden generar diferentes valores de pérdidas de propagación para las mismas condiciones. Utilizando la ecuación de balance del enlace se determina la cobertura aproximada mediante herramientas de simulación de rayos (*ray-tracing*) en 3D, y se corrige mediante mediciones de campo (*site-survey*) de la implementación real del sistema [54].

4.1.2. Capacidad

La velocidad de transmisión de datos con un MCS específico se determina mediante (5.2),

$$\begin{aligned} \text{Tasa de datos por MCS } (R_{MCS}) &= \frac{\text{Bits transmitidos por símbolo}}{\text{Duración del Símbolo OFDM}} \\ &= \frac{N_{UTIL} \times \text{Bits por Sbp}}{\frac{N_{FFT}}{n * BW} (1 + G)} \end{aligned} \quad (5.2)$$

en donde N_{FFT} es el tamaño de la transformada rápida de Fourier e igual a la cantidad de subportadoras OFDM, N_{UTIL} es el número de subportadoras utilizadas para datos y es igual a N_{FFT} menos las subportadoras piloto, de guarda y DC. Cuando se utiliza el nivel PHY OFDM el valor de N_{FFT} es 256 y de N_{UTIL} es 192, mientras que cuando se utiliza el nivel PHY OFDMA N_{FFT} depende del tamaño del canal tal como se muestra en la tabla 5.1 y N_{UTIL} depende de N_{FFT} y del esquema de subcanalización; *Bits por Sbp* es la cantidad de bits que se transmiten en cada subportadora en un símbolo OFDM y dependen del MCS como se relacionaron en la tabla 3.2; BW ⁶³ es el ancho de banda del canal y n es un factor de corrección que depende de BW como se relaciona en la tabla 5.2; y G es el

⁶³ WiMAX soporta anchos de banda del canal equivalentes al espectro total de un operador dividido entre potencias de dos con valores entre 20 y 1.25 MHz.

porcentaje de tiempo de guarda (prefijo cíclico) con posibles valores de 1/4, 1/8, 1/16 y 1/32.

Tabla 4.1. Valores de N_{FFT} para el nivel PHY OFDMA según el tamaño del canal.

BW del canal (MHz)	1.25	2.5	5	10	20
N_{FFT}	128	256	512	1024	2048

Tabla 4.2. Relación entre el ancho de banda y n.

Ancho de banda es múltiplo de (MHz)	1.75	1.5	1.25	2.75	2	Otros
n	8/7	86/75	144/125	316/275	57/50	8/7

4.1.3. Goodput

Mientras que el *throughput* es la capacidad a nivel PHY, el *goodput*, que se introdujo de forma previa en la sección 4.2.3, hace referencia a la capacidad que perciben los niveles superiores. En el caso de WiMAX, el *goodput* a nivel de red no se puede calcular con exactitud debido a que depende de parámetros como el número de SSs que se sirven en cada trama, la eficiencia en la utilización de la trama PHY, el tamaño del preámbulo en cada trama MAC, la longitud o tamaño de los UL/DL-MAP que es variable, del tamaño de la trama, de los errores y de las características opcionales de WiMAX entre otros. Como caso concreto, el fabricante Siemens maneja una estimación de *goodput* a nivel de red de aproximadamente un 80% del *throughput* que entrega el nivel PHY [47].

4.1.4. Capacidad y Cobertura Teórica de WiMAX

Un MCS se elige cuando la potencia en el receptor es mayor que la sensibilidad mínima que éste requiere para decodificar el MCS en particular con una BER específica en la transmisión; por lo tanto, depende principalmente de las condiciones del canal y de la distancia entre la BS y la SS. De acuerdo con el estándar, la sensibilidad mínima del receptor se calcula utilizando la ecuación 5.3 en donde SNR_{RX} es la SNR mínima que requiere el receptor para decodificar correctamente la transmisión con un MCS determinado y con una BER específica; esta sensibilidad se mide a la salida del conector de la antena para un canal AWGN, asumiendo 5 dB de margen de implementación y 7 dB de figura de ruido. La sensibilidad mínima del receptor varía dependiendo de las condiciones de implementación y del fabricante.

$$SS_{RX} = -102 + SNR_{RX} + 10\text{Log}(n * BW * \frac{N_{UTIL}}{N_{FFT}}) \quad (5.3)$$

La tabla 5.3 muestra la sensibilidad mínima del receptor para cada MCS que se calcula a partir de la ecuación 5.3 y de los valores de SNR de la tabla 3.2 para una BER de 10^{-6} , la velocidad de transmisión de datos y el radio de propagación que se obtiene utilizando el modelo de propagación ECC-33 para ciudad grande y mediana-pequeña utilizando canales de 3.5 y 7 MHz. Para los cálculos de velocidad de transmisión de datos y radio de cobertura se utilizan los parámetros⁶⁴ de la tabla 5.4 y las ecuaciones 5.1 y 5.2.

Tabla 4.3. Ejemplo de capacidad y cobertura en WiMAX.

MCS	Sensibilidad del transmisor [dBm]		Velocidad de transmisión de datos [bps]		Radio de cobertura (Km) con ECC-33			
	3.5 MHz	7 MHz	3.5 MHz	7 MHz	3.5 MHz		7 MHz	
					Grande	Mediana pequeña	Grande	Mediana pequeña
BPSK 1/2	-90.83	-87.82	1 411 764.70	2 823 529.40	1.11	1.83	0.88	1.47
QPSK 1/2	-87.83	-84.82	2 823 529.40	5 647 058.80	0.88	1.47	0.69	1.17
QPSK 3/4	-86.03	-83.02	4 235 294.10	8 470 588.20	0.76	1.29	0.59	1.02
16-QAM 1/2	-80.83	-77.82	5 647 058.80	11 294 117.70	0.49	0.86	0.38	0.68
16-QAM 3/4	-79.03	-76.02	8 470 588.20	16 941 176.50	0.42	0.75	0.32	0.58
64-QAM 2/3	-74.53	-71.52	11 294 117.70	22 588 235.30	0.28	0.51	0.21	0.39
64-QAM 3/4	-72.83	-69.82	12 705 882.40	25 411 764.70	0.24	0.44	0.17	0.34

Tabla 4.4. Parámetros del sistema.

Parámetros de sistema	
Parámetros Básicos	
Estándar	802.16-2004
Tipo de nivel físico	OFDM
Duplexación	FDD
Frecuencia (MHz)	3500
Ancho de banda del canal (MHz)	3.5, 7
Margen de Desvanecimiento (dB)	7

⁶⁴ Estos parámetros son genéricos y pueden variar dependiendo de las características del sistema y de los equipos en un entorno de implementación real.

Tabla 4–4. Parámetros del sistema (continuación).

Parámetros de sistema (continuación)	
Estación Base	
Potencia Tx (dBm)	25
Ganancia Antena Tx (dBi)	18
Perdidas y atenuaciones en transmisión (dB)	2
Altura de la Estación Base (m)	30
PIRE (dBm)	43
Estación Suscriptora	
Ganancia Antena Rx (dBi) - Antena para Exterior	18
Perdidas y atenuaciones en transmisión (dB)	2
Altura Estación Cliente (m) (Montaje exterior de la antena)	6

4.1.5. Relación entre Capacidad y Cobertura Teórica

Para la presente sección se asumen tres sectores por BS o celda, cada sector hace uso de un canal de 3.5 o de 7 MHz según se especifique, y este canal se utiliza sólo para el DL de la celda; los cálculos sólo se realizan para el DL.

No todos los usuarios dentro de una celda reciben la misma potencia, y debido a la característica AMC, pueden utilizar diferentes MCS. Todas las subportadoras asignadas a un mismo usuario utilizan el mismo MCS, pero diferentes usuarios pueden utilizar diferentes MCSs dentro de una misma celda.

Asumiendo que los MCSs que se utilizan dependen del radio de cobertura de la celda, en celdas de radio relativamente pequeño es probable que un alto porcentaje de SSs utilicen MCSs eficientes como 64-QAM 3/4; sin embargo, a medida que aumenta el radio de la celda, si se mantiene una misma potencia de transmisión, la SNR comienza a reducirse en el rango de cobertura marginal por lo que un número cada vez mayor de SSs utilizan modulaciones menos eficientes, reduciendo la eficiencia espectral de la celda y en consecuencia su capacidad. Para calcular la capacidad se considera un radio de cobertura, se determinan cuáles MCS se pueden utilizar, se aproxima el porcentaje de usuarios que utilizan cada uno de los MCS y se calcula la capacidad del canal teniendo en cuenta el aporte de cada MCS a la capacidad según la ecuación 5.4.

$$Cap = R_{MCS1} * \% usuarios_{MCS1} + \dots + R_{MCSn} * \% usuarios_{MCSn} \quad (5.4)$$

A continuación se analizan tres escenarios en una ciudad grande, canales de 3.5 MHz y las características definidas en la sección 5.1.3,

Si se utiliza un espaciamiento entre celdas de 480 m, el radio de cobertura de cada celda es de 240 m, el área de cobertura es de 0.18 Km², el 100% de los usuarios utilizan 64-QAM 3/4 para una capacidad aproximada 12.7 Mbps por sector y de 38.1 Mbps por celda. La eficiencia espectral es de 3.63 bps/Hz y la densidad de datos ofrecida en el área de cobertura es de 210.6 Mbps/Km². El *goodput* es de 30.5 Mbps por celda⁶⁵.

Si se utiliza un espaciamiento entre celdas de 980 m, el radio de cobertura de cada celda es de 490 m y el área de cobertura es de 0.75 Km². Si se asume que 25% de los usuarios utilizan 64-QAM 3/4, 25% de los usuarios utilizan 64-QAM 2/3, 25% de los usuarios utilizan 16-QAM 3/4 y 25% de los usuarios utilizan 16-QAM 1/2, la capacidad aproximada es de 9.5 Mbps por sector y de 28.6 Mbps por celda. La eficiencia espectral es de 2.72 bps/Hz y la densidad de datos ofrecida en el área de cobertura es de 37.9 Mbps/Km². El *goodput* es de 22.9 Mbps por celda.

Si se utiliza un espaciamiento entre celdas de 2.2 Km, el radio de cobertura de cada celda es de 1.1 Km y el área de cobertura es de 3.87 Km². Si se asume que 16% de los usuarios utilizan 64-QAM 3/4, 14% de los usuarios utilizan 64-QAM 2/3, 14% de los usuarios utilizan 16-QAM 3/4 y 14% de los usuarios utilizan 16-QAM 1/2, 14% de los usuarios utilizan QPSK 3/4, 14% de los usuarios utilizan QPSK 1/2 Y 14% de los usuarios utilizan BPSK 1/2, la capacidad aproximada es de 6.8 Mbps por sector y de 20.3 Mbps por celda. La eficiencia espectral es de 1.94 bps/Hz y la densidad de datos ofrecida en el área de cobertura es de 5.3 Mbps/Km². El *goodput* es de 16.2 Mbps por celda.

Los casos muestran la relación existente entre capacidad y cobertura. Si se quiere obtener la máxima eficiencia espectral y densidad de datos se debe minimizar la cobertura; sin embargo, para ello se requiere minimizar la cobertura de cada BS y utilizar un alto número de BSs para cubrir un área de servicio lo que implicaría altos costos para

⁶⁵ El *goodput* se calcula como el 80% de la capacidad a nivel PHY.

este caso. A medida que se incrementa el radio de cobertura se reduce el número de BSs necesarias pero trae como consecuencia una disminución en la eficiencia espectral y en la densidad de datos ofrecida. Es difícil calcular con exactitud la eficiencia espectral y la densidad de datos ofrecida debido a que en condiciones reales dependen de factores como la distribución de usuarios y el balance de carga que se realiza automáticamente en algunas BSs.

4.1.6. Análisis de un Caso de Implementación: UNE - Cali

La red WiMAX que UNE implementó en Cali (Col) se constituyó como la primera red en Colombia y en Sudamérica⁶⁶. El diseño inicial de la red se realizó con base en recomendaciones técnicas del fabricante Siemens quien a su vez adoptó muchas recomendaciones del WiMAX Forum. En este diseño se utilizaron ocho BSs para satisfacer los requerimientos de capacidad y cobertura del área metropolitana de Cali. Sin embargo, luego de salir al mercado la demanda desbordó la oferta y la red colapsó, con lo cual tuvo que ser rediseñada comprobándose que en la práctica, el diseño de redes está lejos de la teoría. Actualmente, la red WiMAX de UNE brinda servicio a Cali con 52 BSs. El sistema utiliza OFDMA, duplexación FDD, seis canales diferentes de 3.5 MHz cada uno, un promedio de tres sectores de 120° y un máximo de cuatro sectores de 90° por BS.

El radio de cobertura promedio de las BSs es de 800 m, que implican una separación de 1.6 Km y un área de cobertura de 2.01 Km² por BS; esta área de cobertura se ve afectada por la disponibilidad de los emplazamientos, por características del entorno en cuanto a la propagación de señales y por la optimización que modifica la huella de cobertura.

La capacidad máxima lograda en cada sector es de 4 Mbps en el DL y 1 Mbps en el UL para una capacidad total por BS de 12 Mbps en el DL y 3 Mbps en el UL para celdas con tres sectores, y de 16 Mbps en el DL y 4 Mbps en el UL para celdas con cuatro sectores. En pruebas realizadas el *goodput* alcanzado es de 3.8 Mbps por sector para una transmisión de un archivo vía FTP sin salir a internet; utilizando la especificación de Siemens el *goodput* es de 3.2 Mbps en el DL y 800 Kbps en el UL por celda. En promedio, la eficiencia espectral es 1.14 bps/Hz y la densidad de datos ofrecida en el DL es 5.8 Mbps/Km² y 7.96 Mbps/Km² con tres sectores y cuatro sectores por celda

⁶⁶ Datos suministrados por personal técnico de UNE.

respectivamente. Dependiendo de la variación en la distancia de separación entre BSs, la eficiencia espectral y la densidad de datos ofrecida pueden sufrir variaciones.

Los usuarios se pueden conectar a la red con tres perfiles distintos. Clientes masivos con un perfil de 2 Mbps en DL y 512 UL, pero con todos los usuarios compitiendo por el ancho de banda. Clientes corporativos con un perfil de 512 Kbps o 1 Mbps en DL dedicado, y clientes VoIP. Para garantizar los perfiles se utilizan los tipos de servicios BE para clientes masivos, nrtPS para clientes corporativos y rtPS para clientes VoIP. Un sector en promedio soporta un máximo de 75 a 80 clientes masivos antes de que el retardo en el UL sea prohibitivo para las comunicaciones. A partir de esa cantidad de usuarios se debe considerar utilizar una nueva celda para atender el excedente.

La planeación de frecuencias se realiza inicialmente mediante un proceso manual en que se distribuyen los seis canales disponibles entre los sectores de las BSs. Por motivos de complejidad en el diseño se utilizan celdas con tres sectores. Las celdas de cuatro sectores se utilizan cuando se requiere balancear la carga de usuarios, a menos que la complejidad en el diseño se vuelva muy alta. Existe un caso particular de un emplazamiento que alberga dos BSs con tres sectores cada una. Luego de la implementación se realizan *drive-test* para medir los niveles de señal y frecuencias y se alimentan a un programa que realiza estudios de interferencia y optimización de la red utilizando información de las frecuencias, inclinación, ancho del haz de la antena, azimut y altura, y los resultados se utilizan para la calibración de estos elementos de red.

Respecto a RRM, la red de WiMAX utiliza adaptación del enlace y planificador, pero no fue posible conocer el algoritmo específico; tampoco fue posible saber si los equipos utilizan control dinámico de potencia. Por otra parte, la red no utiliza MIMO y AAS, aunque implementa diversidad espacial en la BS con una antena en transmisión y dos antenas en recepción separadas 15λ (1.30 m). Esta diversidad consiste en que se recibe únicamente por la antena con mejor calidad de recepción. La estrategia de gestión de interferencia que se utiliza es la mitigación de interferencia utilizando técnicas de diseño.

4.2. SOPORTE DE SERVICIOS EXIGENTES EN WiMAX

En la dinámica del sector de las telecomunicaciones, la generación de ingresos de los operadores se ha concentrado en los servicios y contenidos que se ofrecen a los usuarios, de forma que un operador puede ofrecer servicios de telefonía IP, navegación web, contenidos multimedia e IPTV a través de la misma red, agregando valor a la red de acceso del operador [5].

WiMAX ofrece soluciones costo-efectivas a los operadores para implementar redes de acceso de banda ancha. Sin embargo, como se analiza en el anexo A, WiMAX tiene limitantes que dificultan la prestación algunos servicios. IPTV en particular tiene requerimientos muy altos para su prestación como el alto ancho de banda durante períodos extensos de tiempo, *jitter*, retardo y BER [2]; por este motivo se elige este servicio para analizar la posibilidad que brinda la red respecto a la prestación de servicios con altos requerimientos. En el anexo B se presentan de forma detallada los conceptos, consideraciones tecnológicas y requerimientos de IPTV.

4.2.1. Requerimientos Técnicos de IPTV

A continuación se presentan los principales requerimientos técnicos para el servicio IPTV; estos requerimientos se explican con mayor detalle en el anexo B.

- **Tratamiento QoS en la red:** IPTV requiere un marco de diferenciación de servicios *DiffServ*, este marco asume que los nodos de una red que pueden experimentar congestión implementan funcionalidad de QoS a nivel IP. Un nodo dentro de la arquitectura puede clasificar paquetes por medio de un Punto de Código *DiffServ* (DSCP, *DiffServ Code Point*) y cada nodo implementa un Comportamiento Por Salto (PHB, *Per-Hop Behavior*) para manejar cada paquete de acuerdo a su DSCP. La tecnología de acceso de nivel 2 debe implementar mecanismos QoS que se puedan mapear a los DSCPs de nivel de red [55].
- **Ancho de banda:** El ancho de banda mínimo en términos de la capacidad que requiere IPTV es de 1.75 Mbps para la transmisión de video más 128 Kbps para la transmisión de audio para un total aproximado de 1.9 Mbps por canal [56].

- **Retardo:** El retardo no afecta fuertemente a IPTV debido a que IPTV no es un servicio puramente interactivo como VoIP. Además, en los decodificadores de video se implementan búferes⁶⁷ que reducen el efecto del retardo. Sin embargo, el retardo total de la red extremo a extremo debe considerarse para reducir el tiempo de cambio de canal.
- **Latencia:** La latencia para el servicio de video puede llegar a ser de más de tres segundos debido a la gestión en los servidores de video y ser molesta durante cambios de canal. No existe un requerimiento estricto en el valor de la latencia y los operadores generalmente la establecen entre uno y dos segundos [56].
- **Tasa de errores:** Para asegurar la ocurrencia de un error visible en el video se requiere una PER del orden de 10^{-5} .
- **Jitter:** el valor máximo de *jitter* viene dado por el tamaño de los búferes de los decodificadores de video que oscilan entre 200 y 500 ms. Un búfer de mayor tamaño puede impactar la latencia de forma negativa.

4.2.2. Características de WiMAX para el Soporte de IPTV

WiMAX tiene características que permiten ofrecer servicios exigentes. En esta sección se menciona para el caso específico de IPTV, cuáles de esas características permiten su soporte.

- **Tipo de servicio**

IPTV utiliza codificación de video MPEG-4 y utiliza un tipo de servicio rtPS [12].

- **Tipo de duplexación**

IPTV es un servicio de naturaleza inherentemente asimétrica con un volumen muy alto de datos en el DL en comparación con el UL, por lo que se recomienda utilizar TDD. La rigurosa sincronización asociada a esta duplexación se puede ver favorecida por la misma asimetría del comportamiento del servicio de IPTV, ya que la duración de la subtrama DL es mayor que la del UL. Por otra parte, a diferencia de FDD, En TDD solo se utiliza una frecuencia para UL y DL de forma que se duplica el número de canales de frecuencia del operador, favoreciendo el reuso de frecuencia, y disminuyendo la interferencia, pero con

⁶⁷ Un búfer en informática es un espacio de memoria que almacena datos reduciendo la probabilidad de errores en la imagen debidos a la reducción del ancho de banda.

la consecuencia de una disminución de la capacidad en el UL y el DL en cada canal con respecto a FDD.

- **Ancho de banda de canal**

En WiMAX, el espectro total asignado a un operador se puede dividir entre potencias de dos mientras sea superior a 1 MHz para soportar diferentes esquemas de reuso de frecuencia en arquitecturas celulares. Cada división del espectro constituye un canal y se asigna a un sector diferente.

- **Subcanalización**

El estándar brinda amplio soporte para la subcanalización de las subportadoras dentro de un canal. La subcanalización permite un mejor soporte para el procesamiento de arreglos de antenas para AAT.

- **Adaptación del enlace**

El uso de la modulación y codificación adaptativas favorece una cobertura ubicua del servicio de IPTV. Para el caso particular de IPTV, los flujos de datos del servicio se pueden estratificar de tal manera que, en una arquitectura celular, tanto los usuarios del borde de la celda como los cercanos a la BS reciban la señal IPTV de manera inteligible, pero con diferente calidad. La estratificación consiste en que una señal de video con calidad básica y menor requerimiento de capacidad se envía con modulación BPSK, que llega a todos los lugares de la celda incluyendo los bordes. Una señal de video de mejor calidad se puede enviar utilizando modulaciones más eficientes a los usuarios que las soporten. De esta forma se brinda un servicio básico a los usuarios del borde de la celda pero sin perder conexión, y se mejora la QoE del usuario IPTV cuando es posible.

- **Supresión de encabezados**

PHS es una función opcional de WiMAX que reduce los datos que se repiten en cada trama y que corresponden a información de encabezados de niveles superiores al nivel MAC como por ejemplo direcciones IP.

- **Diversidad de polarización**

La polarización cruzada, vertical y horizontal, permite mejor discriminación de las señales mejorando el reuso de frecuencias.

- **Perfil de usuario y servicio IPTV**

El servicio de IPTV es un servicio cuyo comportamiento a ráfagas alto volumen de tráfico en el DL y bajo en el UL es bastante característico. El tráfico en el UL es por lo general de información de control, de cambio de canal o de otros requerimientos. En cuanto al comportamiento del usuario típico de televisión, por lo general, hace solicitudes como cambio de canal en los momentos de comerciales, es decir, en este momento aumenta la probabilidad de que se presente una solicitud a la BS, o mejor, al proveedor del servicio de IPTV por medio de la red de acceso, que corresponde a WiMAX fijo para este caso. Entonces, es claro que se debe tener un mecanismo eficiente que prepare la red para estos momentos de aumento de tráfico en el UL por parte del proveedor del servicio de IPTV.

El operador puede gestionar patrones de comportamiento de las SSs y establecer un perfil de usuario donde se almacenen características como programas preferidos, horarios de establecimiento de sesión IPTV, y lugares de establecimiento de la conexión (para el caso de usuario nómada); además de las otras características de usuario previamente establecidas como SLAs. Esto se debe hacer de manera constante, es decir, actualizar la información en cada sesión establecida. Además, se puede dar la posibilidad al usuario de informar la hora de conexión y/o lugar de conexión (en caso de usuario nómada) de manera anticipada.

Todo este manejo de patrones de tráfico y de patrones de comportamiento de usuario permiten el uso de algoritmos basados estadísticas, que entreguen resultados de probabilidades (de establecimientos de sesión, de horarios de establecimiento de sesión, y de lugares de conexión) que mantengan la red preparada para la gran cantidad de solicitudes que se puedan generar.

- **RRM**

La gestión de recursos es una herramienta elemental para el uso eficiente de los RR con que dispone una red de acceso inalámbrica. Existe una gran variedad de algoritmos RRM diseñados para funciones determinados, y se deben escoger los más adecuados para la prestación del servicio de IPTV.

- **AAT**

La utilización de antenas con formación de haces permite atender las concentraciones de solicitudes de conexión de manera más eficiente. Para el uso adecuado de esta tecnología se propone una diversidad espacial en la BS de por lo menos dos antenas en la BS por sector, una que brinde la cobertura fija normal a todo el sector, y otra con el mecanismo de direccionamiento de haces implementado para colaborar con las concentraciones de tráfico en el sector. También se puede pensar en la posibilidad de tener la disposición del direccionamiento de haces no sólo sobre el sector al cual está dedicado la antena directora de haces, sino, brindarle además la posibilidad de direccionarse a cualquiera de los otros sectores de la celda, o por lo menos a los que más solicitudes de conexión presentan, para hacer así un mejor uso de los recursos disponibles y mejorar el desempeño de la tecnología.

Además de lo anterior se pueden tener las SSs con antenas directivas con anchos de haz muy reducidos como por ejemplo de 23° , para mejorar aún más el desempeño del sistema.

Como complemento, se puede lograr balance de carga de tráfico mediante el préstamo de subcanales de sectores adyacentes en la misma celda para incrementar la capacidad del sector en cuanto al número de usuarios soportados. Este caso ocurre cuando en un sector hay muchas conexiones, mientras que en otro sector el número de conexiones es bajo y no se utilicen todos los subcanales de frecuencia disponibles. Hacer un uso eficiente del espectro mediante el préstamo de subcanales puede mejorar el desempeño general del sistema, siempre y cuando se tenga en cuenta la planeación de frecuencias de tal manera que no se generen problemas de interferencia debido a la reasignación de espectro que implica.

- **OFDM y OFDMA**

Cuando se utiliza OFDM, cada conexión dispone de todo el espectro para transmitir durante el tiempo asignado mejorando la velocidad de transmisión de datos en un instante determinado; sin embargo, la transmisión es más susceptible al desvanecimiento selectivo en frecuencia que pueda existir en el enlace. Cuando se utiliza OFDMA, la diversidad en la asignación de subportadoras entre los subcanales hace que las transmisiones OFDMA sean más apropiadas para la implementación de AATs, para realizar gestión de

interferencia y para contrarrestar el desvanecimiento selectivo en frecuencia; aunque tiene como inconveniente la reducción en el número de subportadoras efectivas para la transmisión de datos.

- **Multicast**

El subnivel MAC de WiMAX permite la implementación de *multicast*, la cual permite utilizar de forma apropiada el ancho de banda disponible cuando se presentan grupos de SSS que requieren la misma información. Para la prestación del servicio de IPTV, este sería un caso muy común dado que varias SSS podrían solicitar la reproducción del mismo canal de televisión.

- **Picoceldas y Femtoceldas**

Son técnicas utilizadas para optimizar el desempeño de las redes de telefonía móvil. Para una tecnología FBWA como WiMAX fijo, podrían colaborar para la mejora del desempeño del sistema en cuanto a capacidad en todas sus dimensiones, es decir, en cantidad de usuarios soportados, densidad de datos por sector, celda, o canal, y en cuanto a velocidad de transmisión de datos.

El rechazo social que provocan las BSs tradicionales, hace que en muchos casos sea bastante complicado planificar la red para unos niveles aceptables de cobertura. Esto favorecería en principio la implantación de picoceldas y femtoceldas.

Estas técnicas deben ser consideradas para ubicaciones en las que se presentan aglomeraciones de solicitudes de conexión como edificios (residenciales, empresariales, institucionales, etc.), centros comerciales, etc.

Para redes ya desplegadas, sería la aplicación del concepto de división celular que se presenta en el anexo A.

Todos estos requerimientos técnicos propuestos para la prestación de IPTV sobre WiMAX requieren de una capacidad de procesamiento de información en la BS incrementada, lo cual aumentaría la complejidad de los dispositivos de la misma, y consigo sus costos.

4.2.3. Prestación de IPTV en WiMAX

4.2.3.1. Caso teórico

En esta sección se determina el número de usuarios que pueden ser atendidos utilizando las mismas condiciones y cálculos de la sección 5.1.4. y 5.1.5. para ciudad grande, celdas de tres sectores, canales de 3.5 MHz, distribución de usuarios entre las modulaciones, *goodput* del 80% y un requerimiento de 1.9 Mbps por usuario (un canal IPTV por usuario).

La mejor situación se presenta cuando el espaciamiento entre celdas es de máximo 480 m. En este caso el *goodput* de la celda es de 30.5 Mbps que puede soportar hasta 16 usuarios, con 89 usuarios por Km². La peor situación se presenta cuando se utiliza el máximo espaciamiento entre celdas que corresponde a 2.2 Km. En este caso el *goodput* de la celda es de 16.2 Mbps que puede soportar hasta 8 usuarios, con 2 usuarios por Km².

Cuando se utilizan canales de 7 MHz se puede duplicar la capacidad por canal y en consecuencia duplicar la cantidad de usuarios atendidos pero con el costo de la duplicación del requerimiento de espectro en el sistema.

4.2.3.2. Caso de implementación de UNE

En esta sección se determina el número de usuarios que pueden ser atendidos utilizando la información de desempeño de la red WiMAX de UNE en la ciudad de Cali para un *goodput* del 80% de la capacidad de la celda, para celdas de tres y cuatro sectores.

Debido a su *goodput* de 3.2 Mbps, cada sector podría soportar un único usuario IPTV. Si se utilizaran mecanismos de transmisión colaborativa en que dos sectores tuvieran la habilidad de transmitir a un mismo usuario (por ejemplo mediante subcanalización, con dos sectores asignando subcanales a una misma SS cercana a un borde de cobertura), la celda puede soportar un máximo de cinco usuarios con tres sectores, con 2.5 usuarios por Km²; y un máximo de seis usuarios con cuatro sectores, con 3.4 usuarios por Km².

4.3. RECOMENDACIONES TÉCNICAS PARA MEJORA DEL DESEMPEÑO DE WIMAX

El WiMAX Forum ha propuesto a WiMAX como una tecnología BWA para entornos metropolitanos buscando un desempeño marcadamente superior que otras tecnologías similares mediante una tecnología eficiente, flexible y económica. Sin embargo, las implementaciones reales demuestran que la práctica está lejos de la teoría, y que es muy difícil predecir con exactitud el comportamiento de la capacidad y la cobertura de la red. Para mitigar esta situación se proponen las siguientes recomendaciones:

- a) El diseño y la optimización son procesos que se deben utilizar para compensar las características no dinámicas de la red en respuesta a las condiciones del sistema y del entorno.
- b) El diseño debe ser detallado y debe considerar la mayor cantidad posible de variables. El proceso de diseño debe estar encaminado mas no restringido a estimar el número de usuarios de la red, los perfiles de datos con los que se conectaran a la red y la escalabilidad; determinar la cantidad de sectores que se requieren de acuerdo con las estimaciones de capacidad y cobertura, el número de BSs que pueden contenerlos, los posibles emplazamientos físicos y la configuración; y realizar la planeación de frecuencias para minimizar la interferencia, entre otros aspectos.
- c) En entornos metropolitanos, la red se limita respecto a capacidad más que a cobertura debido a la alta densidad de datos requerida, en este sentido es muy probable que con las BSs que se utilizan para satisfacer los requerimientos de capacidad también se puedan satisfacer los requerimientos de cobertura en el área de servicio, por lo que se debe tener principal énfasis en el diseño de capacidad más que en el de cobertura.
- d) El diseño debe tener en cuenta la relación entre capacidad y cobertura que se busca para la red, ésta relación se analizó en la sección 5.1.5 y depende principalmente de la distancia de separación entre BSs. Esta distancia se elige dependiendo de la densidad de datos requerida (que a su vez depende de la distribución de usuarios en el área de cobertura de la celda, de los perfiles de los usuarios y de la cantidad de

usuarios que utilizarían cada MCS), de la densidad ofrecida de datos y del costo de implementación del proyecto.

e) Durante el proceso de diseño se debe considerar la elección de las características fundamentales del sistema:

- **Tipo de nivel físico:** Se recomienda utilizar el nivel físico OFDMA del estándar debido a que su soporte para subcanalización facilita la implementación de AAT, mejor reuso de frecuencia y mejor balance del enlace al asignar la potencia disponible entre un número reducido de subportadoras. Además, los esquemas de asignación distribuida de subportadoras permiten promediar la interferencia entre los subcanales,
- **Tipo de duplexación:** En Colombia, el Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones designó grupos de bandas pares para la operación en modo FDD de WiMAX debido a los perfiles del WiMAX Forum. La utilización de FDD puede comenzar a ser significativa con el auge de las redes sociales, los juegos multi-jugador y otras aplicaciones interactivas que tienen altos requerimientos en el UL. Sin embargo, a pesar de estas aplicaciones, el tráfico en el DL sigue siendo predominante, y en especial IPTV requiere tráfico netamente asimétrico por lo que se recomienda utilizar la duplexación TDD, la cual mejora la eficiencia en la utilización de los recursos. TDD se puede implementar canalizando las dos frecuencias pares y asignando los canales como si fuera un espectro único. La separación entre las frecuencias pares mejora el reuso de frecuencia. También se puede solicitar al ente regulador liberar frecuencias para utilizar TDD.
- **Antena cliente:** El WiMAX Forum propuso equipos para interiores con características nómadas, pero en la práctica, las pérdidas por penetración hacen que la alineación en dirección de la antena pueda resultar molesta y complicada. Por ese motivo se recomienda utilizar antenas exteriores y contratar personal de instalación, que aunque puede incrementar los costos de instalación, aumentará notablemente el balance del enlace, la satisfacción del usuario y reducirá el servicio técnico.
- **Ancho de banda del canal:** Depende de la cantidad de espectro asignado al operador y de los requerimientos de capacidad por sector. Un número elevado de canales brinda flexibilidad en el diseño debido a que permitirá mayor reuso de

frecuencia y reducción de la interferencia; sin embargo, entre más canales se utilicen, menor es su ancho de banda; en consecuencia, la capacidad por celda es menor y se requieren más BSs para satisfacer los requerimientos de cobertura.

- **Polarización:** Cuando no se utiliza polarización alternada (vertical y horizontal) se recomienda utilizar polarización vertical porque se comporta mejor ante los efectos de atenuación por lluvia. Por otra parte, la tecnología Cancelación de Interfaz de polarización Alternada (XPIC, *Cross-Polarization slant Interface Cancellation*) de Provigent [57] puede ser probada para buscar posibles mejoras en el desempeño. XPIC es un algoritmo que permite operación de polarización alternada por transmisión simultánea y superpuesta de dos flujos de datos separados en un mismo canal, duplicando teóricamente la capacidad del canal. Al utilizar polarización alternada es importante tener en cuenta la diferencia entre polarización vertical y horizontal.
 - **Duración del CP:** El CP tiene influencia sobre la capacidad del sector y su duración se elige dependiendo de la dispersión del retardo generado por la multitrayectoria del canal. En áreas con edificaciones relativamente bajas y con antenas externas se puede utilizar un CP de 1/16 o incluso de 1/32. En áreas céntricas o con mayor densidad de edificaciones y mayores alturas se debe utilizar un CP de 1/8, en casos severos de desvanecimiento por multitrayectoria se debe utilizar un CP de 1/4, aunque este reduce la capacidad en un 25%.
 - **Duración de trama:** en la sección 4.1.4.3.3. se analizaron los resultados que se obtuvieron en [35] respecto a la duración de trama a partir del cual se recomienda utilizar la mayor duración de trama posible, que para OFDM y OFDMA corresponde a 20 ms. Sin embargo, esta duración está sujeta a que debe ser menor o igual que la mitad del menor requerimiento de retardo de los servicios; por ejemplo, si los requerimientos de retardo son de 100, 50 y 20 ms para datos, video y voz, la duración de trama debe ser de 10 ms. Una vez se eligen estos parámetros, su modificación implica una resincronización de todas las SSs con la BS.
- f) Debe realizarse un proceso de optimización para corregir imprecisiones en el diseño y aspectos que no se pueden predecir con facilidad. Se realiza utilizando mediciones de campo (por ejemplo por *drive-test*) para determinar inconsistencias en la red y

corregirlas modificando las asignaciones de frecuencia, la potencia de transmisión, la inclinación, la orientación, la altura y el ancho del haz de las antenas.

- g) El diseño y la optimización de la red garantizan un diseño estable, pero además se deben implementar mecanismos RRM para ajustar las características dinámicas de los niveles PHY y MAC de WiMAX, de forma que se que maximice su desempeño en respuesta a las fluctuaciones en el tiempo y en el espacio de la propagación de las señales electromagnéticas, y en los requerimientos de tráfico de los usuarios.
- h) Los mecanismos RRM consisten en estrategias y algoritmos que controlan la asignación de RRs entre los usuarios, la elección de MCS, la potencia de transmisión en el UL y la gestión de interferencia. Existe una sinergia muy fuerte entre las características que se deben controlar mediante los mecanismos RRM. El estándar define los requerimientos y los mecanismos de soporte para la implementación de los mecanismos RRM, y brinda la flexibilidad para que los fabricantes definan sus implementaciones propietarias.
- i) A pesar de que la mayoría de autores no consideran a las AATs como parte de RRM, en el presente trabajo se parte de la premisa de que la implementación de estas tecnologías puede modificar substancialmente la eficiencia en el uso de los recursos e influir positivamente en las decisiones de los mecanismos RRM.
- j) El planificador como elemento central de la asignación de recursos debe tener una estrecha relación con el CAC, con los mecanismos de solicitud de ancho de banda y con el mecanismo de adaptación del enlace. Por este motivo la eficiencia en la asignación de recursos depende de la eficiencia de cada uno de estos mecanismos. A su vez, el CAC debe utilizar información del mecanismo de adaptación del enlace para determinar la capacidad real del canal. Las recomendaciones que se presentan a continuación se basan en el estudio presentado en [35], el cual se analizó en la sección 4.1.4.3.3. Para redes que soportan un solo tipo de servicio se recomienda utilizar EDF. EDF no implementa mecanismos de intercambio de información con el mecanismo de adaptación del enlace y por lo tanto requiere una fuerte integración con el módulo CAC para evitar aceptar un número alto de conexiones que pueda degradar el servicio. Para redes que soportan múltiples tipos de servicio se

recomienda utilizar el planificador propuesto en [42]. Este planificador integra la información de nivel PHY correspondiente a las decisiones de adaptación del enlace como parte de la asignación de recursos.

- k) El planificador también influye en el porcentaje de utilización de las subtramas; este porcentaje no tiene en cuenta los encabezados de nivel PHY ni de subnivel MAC. Los planificadores WFQ y EDF maximizan el porcentaje de utilización de la trama.
- l) En el capítulo tres se analizaron algunas propuestas para definir los algoritmos del mecanismo de adaptación del enlace, a partir de este análisis se pueden recomendar dos alternativas. La primera es el algoritmo presentado en [44] que implementa un esquema *cross-layer* que relaciona información y control en los niveles de red, MAC y PHY, y que utiliza umbrales dinámicos para definir las regiones en que se utiliza un MCS determinado de forma que se maximice el *goodput* en la red. La segunda alternativa es el algoritmo presentado en [46] que se considera para explotar los beneficios de MIMO. El algoritmo define umbrales dinámicos que delimitan las regiones dentro de las cuales se puede asignar un MCS y elegir entre los esquema MIMO STBC (matriz A) o SM (matriz B).
- m) Se recomienda implementar un mecanismo de control de potencia en el UL para control de interferencia en ambientes multiusuario y multicelda para sistemas OFDM de acuerdo con los lineamientos especificados en el estándar. El mecanismo de control de potencia debe tener una relación muy estrecha con el de adaptación del enlace y debe utilizar mecanismos para coordinación de interferencia entre celdas vecinas. Para control de potencia se recomienda implementar el esquema propuesto en [49] y que se analizó en la sección 4.3.2. El esquema realiza una optimización conjunta de asignación de potencia, ancho de banda y AAS para maximizar la satisfacción del usuario en condiciones de interferencia. Por la definición del mecanismo de asignación de ancho de banda, este esquema puede funcionar en conjunto con el planificador propuesto en [42].
- n) Se recomienda la implementación de técnicas de antenas múltiples para mejorar la capacidad y la SNR; esta mejora en la SNR provee inmunidad ante los errores, mejora la cobertura o permite una disminución de la potencia de transmisión. La

diversidad en recepción es una alternativa de bajo costo y complejidad con una antena en transmisión y N_R antenas en recepción ($1 \times N_R$) cuyas señales se combinan utilizando MRC; la SNR se mejora de forma lineal con el número de antenas [1], de forma que para un esquema (1×2) la SNR se incrementa dos veces o 3 dB. Debido a la separación espacial y complejidad que se requiere, las implementaciones de MIMO utilizan un esquema ($2 \times N_R$) en el UL y ($N_T \times 2$) en el DL. MIMO tiene dos modos de operación: matriz A (STBC), y matriz B (SM), por lo cual se recomienda la implementación de un esquema de conmutación entre los dos modos como el que se presenta en [50].

- o) Al utilizar antenas múltiples se puede combinar AAS con MIMO. Un receptor AAS con N_R elementos de antena en recepción puede eliminar $N_R - 1$ fuentes de interferencia, y la ganancia puede ser variable. Por ejemplo, en [23] se encuentran valores de ganancia AAS entre 17.6 y 10.9 dB dependiendo del reuso de frecuencia. Se puede utilizar las características de MIMO dentro de los haces que se forman. Como los valores de ganancia reales dependen de la correlación de las antenas, se recomienda al menos una separación de $\lambda/2$ en la SS equivalente a 4.3 cm para 3.5 GHz. La recomendación de Siemens de separación de antenas en la BS es de 150λ o aproximadamente 13 m para lograr una correlación nula entre las antenas. Esta separación puede ser inviable, de forma que se puede utilizar una separación inferior, pero con una reducción en la ganancia o en la capacidad.

- p) La interferencia en el DL se puede predecir utilizando simulaciones de propagación debido a que los transmisores interferentes son conocidos y transmiten información de forma continua con una potencia fija. Sin embargo, en el UL los transmisores interferentes tienen una distribución aleatoria y transmiten información en ráfagas. Por este motivo se recomienda la implementación de mecanismos que permitan la gestión de interferencia en el UL de la red del operador. El conjunto de estos mecanismos se analizó en la sección 4.4. y hacen referencia a la mitigación de interferencia mediante la medición de interferencia, por el control de potencia, utilizando AAT, utilizando FFR en las celdas, y siguiendo las recomendaciones para mitigación de interferencia entre operadores.

q) Una parte fundamental de una solución RRM consiste en los mecanismos de interacción que implementa WiMAX y que permiten soportar la gestión de recursos radio (RRM). La figura 5.1 presenta la interacción que deben tener los diferentes mecanismos RRM. Se recomienda en lo posible elegir soluciones que utilicen herramientas definidas por el estándar y por el WiMAX Forum para la comunicación entre los diferentes mecanismos. El conjunto de estas herramientas se analizó en el capítulo tres.

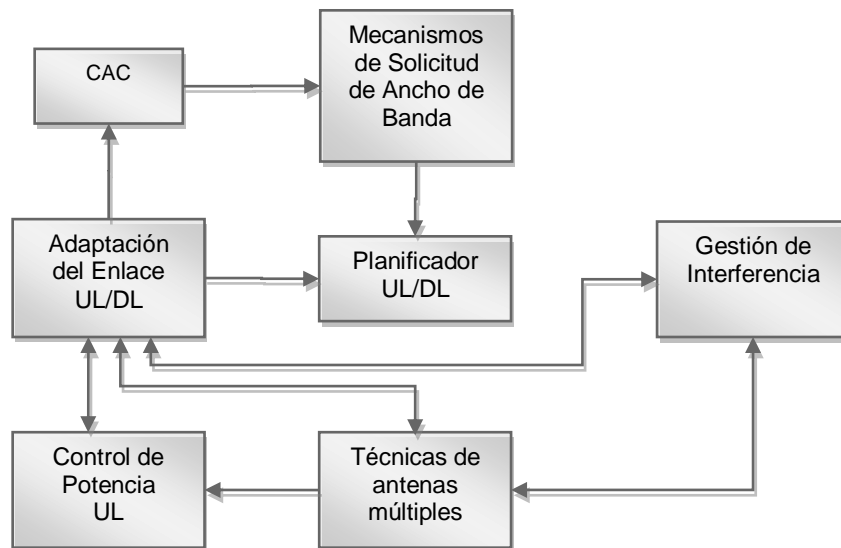


Figura 4.1. Interacción entre los mecanismos RRM.

4.4. CONCLUSIÓN DEL CAPÍTULO

En este capítulo se presentó un análisis tanto teórico como real de capacidad y cobertura de una red de acceso WiMAX fijo basada en el estándar IEEE 802.16-2004, y de la factibilidad de prestación de servicios exigentes tales como IPTV sobre la red; este análisis permite entender de una mejor forma el comportamiento de la tecnología. A partir de las construcciones teóricas del capítulo uno, del análisis de capacidad y cobertura, y de la investigación exploratoria que se realizó en el capítulo tres, en el presente capítulo se identificaron nuevas tecnologías, estrategias y/o algoritmos que permiten mejorar desempeño de WiMAX fijo, con énfasis en el soporte de IPTV.

5. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

5.1. CONCLUSIONES

- La capacidad y cobertura de una implementación real de WiMAX fijo difieren de la teoría; sin embargo, un correcto entendimiento de los conceptos teóricos de esta tecnología y del diseño de la red de acceso permite tener un mayor control sobre los fenómenos que afectan estos dos parámetros de desempeño.
- Actualmente existen servicios con requerimientos muy exigentes en cuanto al desempeño de la red como la voz, el video y específicamente IPTV. En el presente trabajo se realizó un caso de análisis en donde se evaluó la posibilidad de prestación de IPTV en un caso teórico y en un caso de implementación real. Se observa del análisis que WiMAX puede ofrecer el servicio debido a las características de la tecnología. En el caso teórico, WiMAX puede ofrecer la capacidad que se requiere pero con un número elevado de emplazamientos. En el caso práctico, la red también puede ofrecer el servicio pero con un modelo de negocios probablemente no muy viable.
- La flexibilidad del estándar IEEE 802.16-2004 brinda libertad a los fabricantes para definir los mecanismos de asignación de ancho de banda, potencia y adaptación del enlace, entre otros. La elección de los equipos de uno u otro fabricante representan un elemento importante a considerar en la implementación de la red. Estos mecanismos se definen de forma tradicional para un modo de operación estático que no tiene en cuenta las características y variaciones del canal inalámbrico, y que por tanto los hacen poco eficientes para su implementación en WiMAX.
- Los mecanismos RRM consisten en algoritmos, estrategias y técnicas avanzadas que utilizan la medición, intercambio y control de indicadores relacionados con los recursos radio de una red inalámbrica para modificar de forma dinámica los parámetros de nivel PHY y subnivel MAC en respuesta a las condiciones variantes

del canal inalámbrico y de tráfico del sistema, para de esta forma la capacidad y cobertura de la red.

- La implementación de mecanismos RRM es importante en redes multicelda y multiusuario como el caso de WiMAX fijo en topología PMP. El estándar IEEE 802.16-2004 ofrece extenso soporte junto con el WiMAX Fórum para la implementación de mecanismos RRM.
- No existen definiciones estandarizadas sobre RRM ni de los mecanismos que comprende. Las definiciones que se brindan en el documento corresponden a una condensación de las definiciones de diferentes autores y de recomendaciones como los documentos del WiMAX Forum. Sin embargo, existe una extensa literatura sobre mecanismos RRM como parte de las investigaciones de diversos autores.
- El problema de la asignación eficiente de ancho de banda en una red multiusuario se aborda mediante la definición de un elemento llamado planificador en el subnivel MAC, y se implementa mediante algoritmos o esquemas de planificación de paquetes. Los algoritmos de CAC también hacen parte del esquema de asignación de recursos poniendo una restricción en la cantidad de conexiones que se permite manejar al planificador durante un tiempo determinado.
- Los mecanismos de asignación de ancho de banda son determinantes en el porcentaje de utilización de la trama, en la maximización de la cantidad de usuarios soportados, y en la satisfacción de usuarios respecto al retardo y a la velocidad de transmisión de datos.
- El mecanismo de adaptación del enlace utiliza la capacidad AMC del estándar IEEE 802.16-2004 para modificar de forma dinámica el MCS de un enlace en respuesta a su CINR, de forma que se cumplan objetivos de BER o PER en la red. El mecanismo de adaptación del enlace toma decisiones utilizando información del nivel PHY, y transmite estas decisiones al nivel MAC para su utilización por parte de los mecanismos de asignación de recursos. De esta forma se logra una mejor gestión de los recursos.

- Por su parte, también se utiliza un mecanismo de control de potencia para modificar la potencia de transmisión en el UL de forma que se controle la interferencia en la red. El mecanismo de control de potencia busca maximizar la utilización de recursos en cada SS, pero sujeto a limitaciones de interferencia con celdas vecinas. Este mecanismo también debe responder ante variaciones de potencia debidas al desvanecimiento de forma que se mantenga una E_b/N_0 consistente en el receptor para un MCS determinado. Por este motivo, el mecanismo de control de potencia debe proveer soporte para una operación conjunta con el mecanismo de adaptación del enlace.
- Aunque no se consideran como parte de RRM, la utilización de tecnologías de antenas múltiples modifica la eficiencia de los recursos y el desempeño de la red, y puede modificar de la misma forma las decisiones que puedan tomarse estos mecanismos.
- Las tecnologías de antenas múltiples pueden ser tan sencillas como la diversidad espacial en recepción que se utiliza una antena para transmitir y dos antenas para recibir solamente en el UL, y recibe únicamente por la antena con mejor nivel de señal; o pueden ser tan complejas como las AAT que incluyen MIMO y AAS.
- Un mecanismo adicional considerado como RRM es la gestión de interferencia. El estándar IEEE 802.16-2004 no hace mención ni brinda soporte a este mecanismo, aunque sí lo hace el WiMAX Forum. La gestión de interferencia consiste en estrategias que permiten mantener controlada la interferencia global de forma que se logren los objetivos de CINR en la red. Una de estas estrategias consiste en la integración de los mecanismos de adaptación del enlace, control de potencia y AAT. La revisión IEEE 802.16m hace referencia a esta integración, pero no menciona los mecanismos de soporte ni recomendaciones para esta integración.

5.2. TRABAJOS FUTUROS

- Evaluación de la capacidad en niveles superiores o *goodput* de una red WiMAX fijo, y del diseño de servicios en WiMAX teniendo en cuenta este parámetro de desempeño

- Evaluación de la mejora en el desempeño a nivel de enlace y de sistema lograda por la utilización conjunta de MIMO y AAS en antenas múltiples.
- Profundización en cada uno de los mecanismos RRM analizados en este proyecto.
- Análisis de mecanismos RRM para mejorar el desempeño de una red WiMAX móvil.

REFERENCIAS

- [1] J. Andrews et al., "FUNDAMENTALS OF WIMAX: understanding broadband wireless networking," Estados Unidos: Prentice Hall, 2007.
- [2] J. Raichura, "Reaching the last mile with 802.16a wireless technology," [En línea]. Disponible: http://www.eetasia.com/ARTICLES/2004OCT/B/2004OCT18_RFD_TA.pdf?SOURCES=DOWNLOAD [Visitado: 21 de Mayo de 2010].
- [3] J. Sáez, "WiMAX: La Revolución de la Banda Ancha," presentada en la conferencia de Tecnologías Emergentes, San Sebastián, España, 2005.
- [4] WiMAX Forum, "WiMAX's technology for LOS and NLOS environments," WiMAX Forum, *White paper*. [En línea]. Disponible: <http://www.wimaxforum.org/technology/downloads/WiMAXNLOSgeneral-versionaug04.pdf>. [Visitado: 21 de Mayo de 2010].
- [5] Motorola. "The Promise of WiMAX," Motorola, *White paper*. [En línea]. Disponible: <http://www.motorola.com/networkoperators/pdfs/Wi4-the-promise-article.pdf>. [Visitado: 21 de Mayo de 2010].
- [6] WiMAX Forum, "Fixed, nomadic, portable and mobile applications for 802.16-2004 and 802.16e WiMAX networks," WiMAX Forum, *White paper*. [En línea]. Disponible: http://www.senzafiliconsulting.com/downloads/SenzaFili_WiMAXForum_WhitePaper.pdf. [Visitado: 21 de Mayo de 2010].
- [7] G. Wu, "Utilizing the RF spectrum for WiMAX," [En línea]. Disponible: http://www.eetasia.com/ARTICLES/2005MAY/B/2005MAY16_RFD_NETD_TA.pdf. [Visitado: 21 de Mayo de 2010].
- [8] Senza Fili Consulting, "Building End-to-End WiMAX Networks," Senza Fili Consulting, *White paper*, [En línea]. Disponible: http://www.senzafiliconsulting.com/downloads/SenzaFili_for_Alvarion_BuildingWMXE2E.pdf. [Visitado: 21 de Mayo de 2010].
- [9] H Córdova et al, "Insight Analysis into WI-MAX Standard and its trends," [En línea]. Disponible: <http://www.ctr.kcl.ac.uk/IWWAN2005/papers/72.pdf>. [Visitado: 21 de Mayo de 2010].
- [10] Westech Communications Inc., "Can WiMAX Address Your Applications?," Prepared by Westech Communications Inc. on behalf of the WiMAX Forum, *White paper*, Octubre 24, 2005. [En línea]. Disponible: http://www.redlinecommunications.com/news/resourcecenter/whitepapers/Can_WiMAX_Address_Your_Applications_final.pdf. [Visitado: 21 de Mayo de 2010].
- [11] WireIE, "Delivering on the Promise of WiMAX: A White Paper from WireIE's Office of the CTO," *White paper*, Octubre 1, 2007. [En línea]. Disponible: http://www.wireie.com/pdfs/wimax_white_paper_ver%20%205.pdf. [Visitado: 21 de Mayo de 2010].
- [12] IEEE Std. 802.16-2004, IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Network Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems, Octubre 1 de 2004.
- [13] A. Ahmad, "Multimedia performance of IEEE 802.16 MAC," [En línea]. Disponible: http://www.cs.nyu.edu/research/OPNET/Abstracts/IEEE_802.16/ATS_2005_HF.pdf. [Visitado: 21 de Mayo de 2010].

- [14] C. Gabriel, "WiMAX: The Critical Wireless Standard," Research Report, [En línea]. Disponible: http://www.eyeforwireless.com/wimax_report.pdf. [Visitado: 21 de Mayo de 2010].
- [15] E. Pietrosevoli, "Unidad 14: WiMAX y soluciones no estándar," White paper, Febrero de 2008. [En línea]. Disponible: http://www.itrainonline.org/itrainonline/mmtk/wireless_es/files/10_es_instalaciones-para-exteriores_guia_v02.pdf. [Visitado: 21 de Mayo de 2010].
- [16] Wikipedia: DVB-H. Disponible: <http://es.wikipedia.org/wiki/MediaFLO> [Visitado en Julio 2010].
- [17] Wikipedia: MediaFLO. Disponible: <http://es.wikipedia.org/wiki/MediaFLO> [Visitado en Julio 2010].
- [18] M. Elo, "The Basics Of OFDM," RF Globlnet, White paper, Marzo 7 de 2008. [En línea]. Disponible: <http://www.rfglobalnet.com/download.mvc/Guest-Column-The-Basics-Of-OFDM-0001>. [Visitado: 21 de Mayo de 2010].
- [19] L. Nuaymi, WiMAX: technology for broadband wireless access. England: John Wiley & Sons Ltd, 2007.
- [20] D. Renaudeau, et al, "WiMAX: From Fixed Wireless Access to Internet in the Pocket," White paper, Abril del 2005. [En línea]. Disponible: http://lt.fe.uni-lj.si/gradiva/KOS/clanki_pdf/57-wimax%20-%20from%20fixed%20wireless%20access%20to%20internet%20in%20the%20pocket.pdf. [Visitado: 21 de Mayo de 2010].
- [21] T. Fahldieck y A. Brandt, "Primitives for Radio Resource Management (RRM)," Call for comments, IEEE 802.16 BWA Working Group, Septiembre 19, 2005.
- [22] V. Erceg et al, "Channel Models for Fixed Wireless Applications," IEEE 802.16 BWA Working Group, Julio 17 de 2001.
- [23] M. Maqbool, M. Coupechoux and Ph. Godlewski, "Comparison of Various Frequency Reuse Patterns for WiMAX Networks with Adaptive Beamforming," IEEE Vehicular Technology Conference, VTC, Singapur, mayo 2008.
- [24] Draft Amendment to IEEE Standard for Local and metropolitan area networks Part 16: Air Interface for Fixed and Mobile Broadband Wireless Access Systems Amendment to IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks - Management Plane Procedures and Services (Baseline Document), IEEE NetMan Task Group P802.16g, Diciembre, 2005.
- [25] The IEEE 802.16 Working Group on Broadband Wireless Access Standards, "IEEE 802.16's Network Management Task Group: 802.16g Project". [En línea]. Pagina web disponible en: <http://wirelessman.org/netman/16g.html>. [Visitado: 01/09/2009].
- [26] WiMAX Forum, "Network Architecture Stage 2: Architecture Tenets, Reference Model and Reference Points Part 2," Release 1.0, Version 4, Febrero 3, 2009.
- [27] N. Shabbir y H. Kashif, "Radio Resource Management in WiMAX". Tesis de maestría, Blekinge Institute of Technology, Blekinge, 2009.
- [28] Emanuelle Vivier, RRM in WiMAX: From theoretical capacity to system simulations, Londres, UK: ISTE, Hoboken, NJ: Wiley, 2009.

- [29] Y. Zhang, *WiMAX Network Planning And Optimization*, Boca Raton: Auerbach Publications, 2008.
- [30] IEEE 802.16 BWA Working Group, "IEEE 802.16m System Description Document (SDD): System Description Document for the P802.16m Advanced Air Interface," Septiembre 3, 2009.
- [31] K. Wongthavarawat, and A. Ganz, "Packet Scheduling for QoS Support in IEEE 802.16 Broadband Wireless Access Systems", *International Journal of Communication Systems*, Vol. 16, p 81-96, 2003.
- [32] H. Jia et al, "On the Performance of IEEE 802.16 OFDMA System under Different Frequency Reuse and Subcarrier Permutation Patterns", *IEEE Communications Society ICC 2007 proceedings*, 2007.
- [33] J. Chen, W. Jiao y H. Wang, "A Service Flow Management Strategy for IEEE 802.16 Broadband Wireless Access Systems in TDD Mode," *Proceedings of IEEE International Conference on Communications (ICC) 2005 (ISBN 0-7803-8939-5)*, Seoul Korea, Mayo 18-20, 2005.
- [34] E. Vieira, "Control de congestión – Dr. Estela Vieira, Ayudante de Doctor," *Notas de clase*, Julio 2010. Disponible: http://www-gris.det.uvigo.es/~estela/SC0708/control_congestion.pdf [Visitado en Julio 2010]
- [35] N. Ali, P Dhrona y H. Hassanein, "A performance study of uplink scheduling algorithms in point-to-multipoint WiMAX networks," *Computer Communications*, no 32, p 511–521, 2009. Disponible: ScienceDirect <http://www.sciencedirect.com/science/journal/01403664> [Visitado en octubre de 2009].
- [36] D. Ludovici, "Performance Analysis of RR and FQ Algorithms in Reconfigurable Routers," *Tesis de especialista*, Universidad de Pisa, 2006. Disponible en: <http://ce.et.tudelft.nl/> [Visitado en octubre 2006].
- [37] A. Demers, S. Keshav, and S. Shenker, *Analysis and simulation of a fair queueing algorithm*, *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 19(4): 1–12, September 1989.
- [38] Chen et al, "Deficit Fair Priority Queuing," *Patente U.S. 20070183320A1*, Agosto 9, 2007.
- [39] L. Georgiadis, R Guerin, A. Parekh, "Optimal Multiplexing on a Single Link: Delay and Buffer Requirements," *Proceedings of IEEE INFOCOM 94*; vol. 2, 1994; 524–532, 1994.
- [40] N. Ruangchajitupon, L. Wang and Y. Ji, "A study on the performance of scheduling schemes for broadband wireless access networks," *International Symposium on Communications and Information Technologies*, p 1008–1012, 2006.
- [41] Q. Liu, X. Wang y G. Giannakis, "Cross-layer scheduler design with QoS support for wireless access networks," *IEEE TRANSACTIONS ON VEHICULAR TECHNOLOGY*, VOL. 55, NO. 3, p 839-847, Agosto de 2005.
- [42] D. Niyato, E. Hossain, "A Queuing-Theoretic and Optimization-Based Model for Radio Resource Management in IEEE 802.16 Broadband Wireless Networks," *IEEE TRANSACTIONS ON COMPUTERS*, VOL. 55, no. 11, p 1473-1488, Noviembre 2006.
- [43] S. Ramachandran, "Link Adaptation Algorithm and Metric for IEEE Standard 802.16," *Tesis M.S.*, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia, Febrero 12, 2004.

- [44] L. Zhang et al., "Optimization of WiMAX modulation scheme with a cross layer erasure code," 10th IEEE International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (ISBN 978-1-4244-4439-7), Kos, Grecia, June 15-19, 2009.
- [45] J. Rosenthal y R. Smarandache, "Maximum Distance Separable Convolutional Codes," en *Applicable Algebra in Engineering, Communication and Computing*, Volume 10, no 1, p 15-32, Universität trier, 1999. Disponible: [Http://www.nd.edu/rosen/Paper/mds.ps](http://www.nd.edu/rosen/Paper/mds.ps) [Visitado: 23 de abril de 2010]
- [46] T. H. Chan, "A Link Adaptation Algorithm in MIMO-based WiMAX systems," *JOURNAL OF COMMUNICATIONS*, Vol. 2, no. 5, p 16- 24, Agosto, 2007.
- [47] Siemens Corp., Siemens Waymax Brochure.
- [48] J. Jang and K. B. Lee, "Transmit Power Adaptation for Multiuser OFDM Systems," *IEEE JOURNAL ON SELECTED AREAS IN COMMUNICATIONS*, VOL. 21, no. 2, p 171-178, Febrero, 2003.
- [49] T. Lan, P. Hande y M. Chiang, "Joint Uplink Power Control, Beamforming and Bandwidth Allocation for Optimal QoS Assignment," *Proc. IEEE ISIT*, Junio, 2006.
- [50] R. Heath y A. Paulraj, "Switching Between Diversity and Multiplexing in MIMO Systems," *IEEE Transactions on Communications*, Vol. 53, no. 6, p 962-968, Junio 2005.
- [51] H. Zerrouki y M. Feham, "High Throughput of WiMAX MIMO-OFDM Including Adaptive Modulation and Coding," (*IJCSIS*) *International Journal of Computer Science and Information Security*, Vol. 7, no. 1, p 86-91, 2010.
- [52] IEEE Std 802.16.2™-2004 (Revision of IEEE Std 802.16.2-2001): Coexistence of Fixed Broadband Wireless Access Systems. 17 March 2004.
- [53] Resolución número 2064 de septiembre 15 DE 2005, Ministerio de Tecnologías de la Información y de las Comunicaciones. Bogotá, Septiembre 2005.
- [54] Daniel Sweeney, *WiMax Operator's Manual: Building 802.16 Wireless Networks*, segunda edición, Nueva York: Apress, 2006.
- [55] Cisco Gigabit-Ethernet Optimized IPTV/Video over Broadband Solution Design and Implementation Guide, Release 1.0, Cisco Systems, Cisco press, 2005.
- [56] O. Silgado y J. Padilla, Director: J. Cuatindioy, "Lineamientos técnicos y regulatorios para la implementación de IPTV en Colombia," Proyecto de grado, Universidad del Cauca, Popayán, Cauca, Colombia, 2008.
- [57] Provigent, "PROVIGENT SOC DOUBLES WIRELESS CHANNEL CAPACITY: New Broadband Wireless Transmission Chip Doubles Capacity of Frequency Channels by Introducing XPIC Technology," White paper, Provigent. Disponible en: http://www.provigent.com/UserFiles/File/PR_XPIC_Nov04.PDF [Visitado en Julio de 2010].