

COEXISTENCIA DE REDES WIMAX FIJAS Y WIMAX MÓVILES



**DANIEL ALEJANDRO PAJOY BASTOS
FRANCISCO PEÑA FERNANDEZ**

Universidad del Cauca

Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones

Departamento de Telecomunicaciones

GRUPO DE I+D NUEVAS TECNOLOGÍAS EN TELECOMUNICACIONES

Línea de investigación: Gestión integrada de redes, servicios y arquitecturas de telecomunicaciones

Popayán, Abril de 2010

COEXISTENCIA DE REDES WIMAX FIJAS Y WIMAX MÓVILES

**DANIEL ALEJANDRO PAJOY BASTOS
FRANCISCO PEÑA FERNANDEZ**

Trabajo de Grado presentado como requisito para obtener el título de Ingeniero en
Electrónica y Telecomunicaciones

Director Guefry Ágredo Méndez – M.Sc.

Universidad del Cauca

Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones
Departamento de Telecomunicaciones

GRUPO DE I+D NUEVAS TECNOLOGÍAS EN TELECOMUNICACIONES

Línea de investigación: Gestión integrada de redes, servicios y arquitecturas de
telecomunicaciones

Popayán, Abril de 2010

CONTENIDO

RESUMEN

INTRODUCCIÓN

1. CONCEPTOS FUNDAMENTALES	1
1.1 WiMAX	3
1.1.1 WiMAX	3
1.1.1.1 WiMAX fija	3
1.1.1.2 WiMAX móvil	3
1.1.1.3 WiMAX Forum	3
1.1.1.4 Certificación de productos WiMAX	4
1.1.1.5 Perfiles WiMAX	6
1.2 IEEE 802.16 y ETSI	9
1.2.1 IEEE 802.16	9
1.2.2 Grupo de trabajo IEEE 802.16	9
1.2.3 IEEE 802.16d-2004	10
1.2.4 IEEE 802.16e	11
1.2.5 Normas ETSI	11
1.3 INTERFAZ AÉREA	12
1.3.1 PHY	12
1.3.1.1 PHY WiMAX fija	13
1.3.1.2 PHY WiMAX móvil	16
1.3.2 MAC	18
1.4 ARQUITECTURA DE RED	19
1.4.1 Modelo de referencia red NMR	21
1.5 CONVERGENCIA FIJA MÓVIL o FMC	23
1.5.1 Definición y conceptos fundamentales	23
1.5.2 Convergencia inalámbrica de alto nivel	25
1.5.3 Controladores de convergencia fija móvil	25
1.5.4 Requerimientos funcionales de convergencia	26
1.5.5 Servicios de <i>handover</i> independientes del medio	26
1.5.6 Soluciones de red convergente fija móvil	28
1.5.7 Actores FMC	28
1.6 INFRAESTRUCTURA DE RED WiMAX	29
1.6.1 Equipos de usuario	29
1.6.2 Topologías	29
2. WiMAX EN COLOMBIA	33
2.1 MARCO LEGAL	33
2.1.1 Resolución 2064 de 2005	34
2.1.2 Resolución 2070 de 2005	35
2.1.3 Resolución 1449 de 2006	35
2.2 POLÍTICAS	35
2.2.1 Documento CONPES 3371 de 2005	35
2.2.2 Promoción y masificación de la banda ancha en Colombia	36
2.3 ADJUDICACIÓN DE ESPECTROS USABLES POR WiMAX	37
2.3.1 Banda 3.5 GHz	38
2.3.2 Bandas no licenciadas	39
2.3.3 Banda de 450 MHz e IMT-2000	39
2.4 LICENCIAS OTORGADAS	41

2.5 REDES WIMAX EXISTENTES EN COLOMBIA	41
2.5.1 Topologías de red	41
2.5.2 Equipos	41
2.5.2.1 Estación Base	41
2.5.2.2 Estaciones Suscriptoras	42
2.5.3 Cobertura y Emplazamientos	43
2.5.4 Participación en el mercado	44
2.5.5 Aplicaciones y servicios	45
3. ESTRATEGIAS Y PROCEDIMIENTOS PARA LA COEXISTENCIA	47
3.1 PLANEACIÓN DE UNA RED INALÁMBRICA WIMAX	47
3.1.1 El Proceso de Planeación de la Red	48
3.1.1.1 Fase de Recolección de Datos	48
3.1.1.2 Fase de Planeación de la Red	50
3.1.1.3 Fase de Planeación de evaluación, verificación y optimización	56
3.1.2 Desarrollos adicionales WiMAX	57
3.2 DETERMINACIÓN DEL ESCENARIO ACTUAL	59
3.2.1 Análisis de Cobertura	61
3.2.2 Análisis de Capacidad	61
3.2.3 Análisis de Celda	61
3.2.4 Análisis de Arquitectura de la Red	62
3.3 DETERMINACIÓN DE LA NECESIDAD	62
3.3.1 Mercado	63
3.3.2 Cobertura	65
3.3.3 Capacidad	65
3.4 PLAN DE SOLUCIÓN	65
3.4.1 Arquitectura	65
3.4.2 Core de la Red	66
3.4.3 Equipos	68
3.4.4 Ancho de Banda	68
3.4.5 Antenas inteligentes y SDMA	68
3.4.6 Red Multisalto	69
4. CASO DE APLICACIÓN	71
4.1 SELECCIÓN DEL ENTORNO	71
4.1.1 Descripción del escenario	71
4.1.2 Parámetros del sistema	72
4.1.3 Parámetros del mercado	72
4.1.4 Modelo de propagación	73
4.1.5 Cobertura	73
4.1.6 Capacidad	73
4.1.7 Arquitectura de red	74
4.2 DETERMINACIÓN DE LA NECESIDAD	74
4.2.1 Mercado	74
4.2.2 Modelo de negocios	78
4.2.3 Capacidad	80
4.3 PLAN DE SOLUCIÓN	81
4.3.1 Arquitectura y equipos	81

5. CONCLUSIONES	83
6. RECOMENDACIONES	85
REFERENCIAS	87
ANEXOS	

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Escenario general de la tecnología WiMAX	4
Figura 1.2. Evolución de la tecnología WiMAX	7
Figura 1.3. Estructura de un perfil de sistema WiMAX	8
Figura 1.4. Modelo de referencia IEEE 802.16	9
Figura 1.5. Arquitectura interna de la interfaz aérea WiMAX	12
Figura 1.6. Modulación Adaptativa de WiMAX	15
Figura 1.7. Subtramas UL y DL en un sistema WiMAX TDD	16
Figura 1.8. Símbolos UL y DL en un sistema WiMAX TDD	17
Figura 1.9. Arquitectura de red WiMAX basada en IP	20
Figura 1.10. Modelo de referencia de red WiMAX	21
Figura 1.11. Estructura de protocolo simple basado en IP usada por la red WiMAX	21
Figura 1.12. Estructura de convergencia de alto nivel	25
Figura 1.13. <i>Handover</i> independiente del medio	17
Figura 1.14. Arquitectura del protocolo del <i>handover</i> vertical	28
Figura 1.15. Topología <i>Backhaul</i> punto a multipunto	30
Figura 1.16. Topología <i>Backhaul Daisy Chained</i>	30
Figura 1.17. Topología <i>Backhaul</i> en malla	31
Figura 2.1. Marco legal de la tecnología WiMAX	34
Figura 2.2. Estación Base <i>WayMAX@vantage</i> de <i>Nokia Siemens Network</i>	42
Figura 2.3. (a) <i>Gigaset SE461 Indoor</i> , (b) <i>Gigaset SE471 Indoor</i>	42
Figura 2.4. Antena para exteriores compatible con la familia <i>Gigaset</i>	42
Figura 3.1. Proceso de planeación de red	49
Figura 3.2. Puntos típicos en un área urbana, <i>indoor</i> y <i>outdoor</i>	50
Figura 3.3. Proceso de asignación de frecuencias	54
Figura 3.4. Arquitectura General de la Red	62
Figura 3.5. Red de servicio de acceso – ASN, diagrama en bloques de red WiMAX	57
Figura 3.6. Arquitectura de red de WiMAX móvil	67
Figura 4.1. Capacidad demandada	73
Figura 4.2. Distribución promedio de las zonas industriales y comerciales en Neiva	75
Figura 4.3. Cobertura WiMAX en Neiva	76
Figura 4.4. Crecimiento telefonía móvil celular	77
Figura 4.5. Ingresos de las compañías de telefonía móvil celular	77
Figura 4.6. Cifras históricas de telefonía móvil celular	78
Figura 4.7. Resumen cobertura WiMAX y zonas comerciales e industriales	80

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.1. Cuadro comparativo de red WiMAX fija y WiMAX móvil	5
Tabla 1.2. Grupos de trabajo WiMAX	6
Tabla 1.3. Especificaciones de perfil de red WiMAX	8
Tabla 1.4. Datos básicos del estándar IEEE 802.16	10
Tabla 1.5. FDD Y TDD	13
Tabla 1.6. Velocidades de datos en la capa PHY variando anchos de banda	15
Tabla 1.7. Flujos de servicio soportados por WiMAX	18
Tabla 1.8. Subcapas MAC de WiMAX	19
Tabla 2.1. Marco legal de WiMAX en Colombia	33
Tabla 2.2. Distribución del espectro en la banda de 3.5 GHz	35
Tabla 2.3. Municipios con cobertura WiMAX y sus características	43
Tabla 2.4. Distribución de suscriptores de Internet en Colombia por tipo de acceso	44
Tabla 2.5. Distribución de suscriptores de accesos dedicados fijos por proveedor	45
Tabla 2.6. Proveedores de redes y servicios con mayor cobertura de municipios por tecnología	45
Tabla 3.1. Velocidades de datos en WiMAX fija, operando en la banda de 3.5 GHz	61
Tabla 4.1. Reusos de acuerdo al perfil y la cantidad de suscriptores	74
Tabla 4.2. Cálculos de población a atender esperada	80

ACRÓNIMOS

3G	<i>Third Generation</i> - Tercera generación de telefonía móvil
3GPP	<i>3rd Generation Partnership Project</i> – Proyecto asociado de tercera generación de sistemas móviles
4G	<i>Fourth Generation</i> - Cuarta generación de telefonía móvil
AAA	<i>Authentication, Authorization, and Accounting</i> – Autenticación, autorización y gestión de cuenta
AAS	<i>Adaptative Antenna System</i> - Sistema de antenas adaptativas
AAS2	<i>Adaptative Antenna System Version 2</i> - Sistema de antenas adaptativas versión 2
AoA	<i>Angle of Arrive</i> – Ángulo de llegada
ASN	<i>Access Service Network</i> – Red de servicio de acceso
ASP	<i>Access Service Provider</i> – Proveedor de servicio de acceso
BA	<i>Broadband Access</i> - Acceso Banda Ancha
BS	<i>Base Station</i> - Estación Base
BWA	<i>Broadband Wireless Access</i> - Acceso Inalámbrico Banda Ancha.
CAPEX	<i>Capital Expenditure</i> - Expansión de servicios y capital
CBR	<i>Constant Bitrate</i> – Tasa de bit constante
CDMA	<i>Code Division Multiple Access</i> - Acceso múltiple por división de código
CITEL	<i>Comisión Interamericana de Telecomunicaciones</i>
CONPES	<i>Consejo Nacional de Política Económica y Social</i>
COST	<i>COoperation européenne dans le domaine de la recherche Scientifique et Technique</i> – Cooperación Europea en el ámbito de la Investigación Científica y Técnica
CQI	<i>Channel Quality Identification</i> – Identificación de identidad del canal
CPE	<i>Customer Premise Equipment</i> - Equipo Local del Cliente
CRC	<i>Comisión de Regulación de Comunicaciones</i>
CRT	<i>Comisión de Regulación de Telecomunicaciones</i>
CSN	<i>Connectivity Service Network</i> – Red de servicio de conectividad
DANE	<i>Departamento Administrativo Nacional de Estadística</i>
DHCP	<i>Dynamic Host Configuration Protocol</i> – Protocolo para la configuración automática de los equipos que usan TCP/IP
DL	<i>Down Link</i> - Enlace de bajada
DSL	<i>Digital Subscriber Line</i> - Línea de Suscriptor Digital
E2E	<i>End to End</i> - Extreme a extreme
EPM	<i>Empresas públicas de Medellín</i>
ESP	<i>Empresa de Servicios Públicos</i>
ETB	<i>Empresa de Telecomunicaciones de Bogotá</i>
ETSI	<i>European Telecommunications Standards Institute</i> - Instituto europeo de estándares de telecomunicaciones
FDD	<i>Frecuency Division Duplexation</i> - Duplexación por división de frecuencia
FEC	<i>Forward Error Correction</i> - Corrección de errores hacia adelante
FFT	<i>Fourier Fast Transformer</i> – Transformada rápida de Fourier
FHC	<i>Frame Header Control</i> – Trama de control de cabecera
FMC	<i>Fixed Mobile Convergence</i> - Convergencia Fija Móvil
GAN	<i>Generic Access Network</i> – Red de acceso genérico
GPRS	<i>General Packet Radio Service</i> – Servicio de Radio de Paquete General
GPS	<i>Global Positional Sistem</i> – Sistema de posicionamiento global
GSM	<i>Global System for Mobile communications</i> – Sistema global para comunicaciones móviles
GDR	<i>Guarated Data Rate</i> – Velocidad de datos garantizada

GW	<i>Gateway - Pasarela</i>
HARQ	<i>Hybrid Automatic Repeat Request - Demanda repetición automática híbrida</i>
HSDPA	<i>High Speed Downlink Packet Access – Acceso de paquetes de enlace descendente de alta velocidad</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers – Instituto de ingenieros eléctricos y electrónicos.</i>
IGAC	<i>Instituto Geográfico Agustín Codazzi</i>
IMS	<i>Information Management System – Sistema de gestión de información</i>
IMT	<i>International Mobile Telecommunications - Telecomunicaciones móviles internacionales</i>
IP	<i>Internet Protocol – Protocolo de Internet</i>
IRR	<i>Inversion Return Rate – Velocidad de retorno de inversión</i>
ISP	<i>Internet service provider – Proveedor de servicios de Internet</i>
KPI	<i>Key Performance Indicator – Indicador clave de rendimiento</i>
LAN	<i>Local Area Network – Red de área local</i>
LOS	<i>Line of sight - Línea de vista</i>
LBS	<i>Location Based Service – Servicio basado en localización</i>
MAC	<i>Mandatory access control - Control de Acceso al medio</i>
MAN	<i>Metropolitan Area Network – Red de área metropolitana</i>
MAP	<i>Mobile Application Part – Parte de aplicación móvil</i>
MCBCS	<i>Multicast Broadcast Service – Servicio de broadcast y multicast</i>
MIH	<i>Media Independent Handover - Handover independiente del medio</i>
MIMO	<i>Multiple-input and multiple-output – Multiple entrada - multiple salida</i>
MINTIC	<i>Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones</i>
MS	<i>Mobile Station – Estación Móvil</i>
MPDU	<i>MAC Protocol Data Unit – Unidad de datos de protocolo MAC</i>
MSDU	<i>MAC Service Data Unit – Unidad de datos de servicio MAC</i>
NAP	<i>Network Access Provider – Proveedor de acceso a la red</i>
NFC	<i>Near Field Communications – Comunicaciones de campo cercano</i>
NLOS	<i>Non line of sight - Sin línea de vista</i>
NMR	<i>Network Measurement Report – Informe de medición de la red</i>
NRM	<i>Network Reference Model – Modelo de referencia de red</i>
NSP	<i>Network Service Provider – Proveedor de servicios de red</i>
OFDM	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing - Multiplexación por división de frecuencia Ortogonal</i>
OFDMA	<i>Orthogonal Frequency-Division Multiple Access - Acceso Múltiple por división de frecuencia ortogonal</i>
PAN	<i>Personal Area Network – Red de área personal</i>
PBH	<i>Peak Busy Tour – Hora pico de ocupación</i>
PCS	<i>Personal Communications Service – Servicio de comunicaciones personal</i>
PDR	<i>Peak Data Rate – Velocidad de Datos Máxima</i>
PDU	<i>Protocol Data Unit – Unidad de datos de protocolo</i>
PHY	<i>Physical layer – Capa física</i>
PSTN	<i>Public Switched Telephone Network – Red de telefonía pública conmutada</i>
PtM	<i>Point to Multipoint – Punto a multipunto</i>
PtP	<i>Point to Point – Punto a punto</i>
RF	<i>Radio Frecuencia</i>
RSS	<i>Resived Signal Strenght – Fuerza de la señal recibida</i>
QoS	<i>Quality of Service – Calidad de servicio</i>
SA	<i>Sociedad Anónima</i>

SC	<i>Single Carrier</i> – Única portadora
SDMA	<i>Spatial-Division Medium Access</i> - Acceso múltiple por división de espacio
SDU	<i>Service Data Unit</i> – Unidad de datos de servicio
SIMO	<i>Single-input and multiple-output system</i> - Sistema simple entrada múltiple salida
SINR	<i>Signal to Interferente-plus-Noise Ratio</i> – Relación de la señal interferencia y ruido
SISO	<i>Single-input and single-output system</i> - Sistema simple entrada simple salida
SIUST	<i>Sistema de Información Unificada del Sector de las Telecomunicaciones</i>
SLA	<i>Service Level Agreement</i> - Acuerdo de nivel de servicio
SoHo	<i>Small Office/Home Office</i> – Pequeña oficina/Oficina en casa
SS	<i>Suscriptor Station</i> - Estación suscriptora
TB	<i>Tera Bytes</i>
TCP	<i>Transmission Control Protocol</i> – Protocolo de control de transmisión
TDD	<i>Time Division Duplexation</i> - Duplexación por división de tiempo
TDMA	<i>Time Division Multiple Access</i> - Acceso múltiple por división de tiempo
TELMEX	<i>Teléfonos de México</i>
TIR	<i>Tasa Interna de Retorno</i>
TMN	<i>Telecommunications Management Network</i> – Red de Gestión de Telecomunicaciones
UL	<i>Up Link</i> – Enlace de subida
UMA	<i>Unlicensed Mobile Access</i> – Acceso móvil no licenciado
UMTS	<i>Universal Mobile Telecommunications System</i> - Sistema Universal de Telecomunicaciones Móviles
VLAN	<i>Virtual Local Area Network</i> – Redes de áreas locales virtuales
VoIP	<i>Voice Over IP</i> - Voz sobre IP
VPN	<i>Virtual Private Network</i> – Red Privada Virtual
VPN	<i>Valor presente Neto</i>
WAN	<i>Wide Area Network</i> – Red de área extensa
WiBRO	<i>Wireless Broadband</i>
WiFi	<i>Wireless Fidelity</i>
WiMAX	<i>Worldwide Interoperability for Microwave Access</i> - Interoperabilidad mundial para acceso microondas
WMAN	<i>Wireless Metropolitan Area Network</i> - Red de área Metropolitana inalámbrica
WWAN	<i>Wireless Wide Access Network</i> - Red de área extensa inalámbrica

RESUMEN

En búsqueda de la promoción y masificación de la banda ancha en todo el territorio Colombiano, varios proveedores de servicios de telecomunicaciones nacionales optaron por la implementación de nuevas tecnologías inalámbricas, entre ellas WiMAX en su versión fija, para brindar accesos de alta velocidad mediante conexiones dedicadas, lograr una mayor cobertura, mejorar la calidad de sus redes y ampliar su portafolio de servicios. La implementación de WiMAX en sus primeras versiones en Colombia se llevó a cabo con gran éxito, convirtiendo al país en uno de los primeros en dar solución a accesos banda ancha inalámbrica mediante WiMAX. La evolución se alcanzó rápidamente con el lanzamiento de la versión móvil, se crearon nuevos dispositivos, tanto Estaciones Base como Estaciones Suscriptoras, y actualmente se hace necesario reevaluar y rediseñar los parámetros y características para la optimización de recursos en una red WiMAX fija ya implementada, coexistiendo con las nuevas posibilidades que ofrece WiMAX móvil. Dicha necesidad de reevaluar y rediseñar se plasma a lo largo de este trabajo de grado, y da como resultado una propuesta de implementación en Neiva (Huila), en búsqueda de lograr la coexistencia de las redes WiMAX fijas existentes y las posibles redes WiMAX móviles.

INTRODUCCIÓN

La demanda de accesos a Internet banda ancha en Colombia cada día cobra más fuerza. Nuevas tecnologías se abren camino en el mercado, en búsqueda de ofrecer soluciones de accesos a altas velocidades. De la misma manera, los grandes proveedores de servicios de telecomunicaciones, promueven alternativas de acceso para obtener una mayor penetración y aceptación en el mercado nacional. La cobertura que brinda el acceso a banda ancha mediante DSL¹ o Cable, satisface ciertas necesidades de usuarios concentrados en zonas específicas, donde se hace factible económicamente para un ISP realizar el despliegue de su infraestructura. La telefonía móvil celular, mediante GPRS², complementa de alguna manera la penetración a Internet en Colombia, aunque a un costo considerable para el suscriptor y limitando una gran variedad de servicios que pueden ser prestados si se tuviera un mayor ancho de banda y mejor calidad de servicio.

WiMAX entra a Colombia como solución de acceso banda ancha a usuarios residenciales y empresariales, en zonas urbanas, suburbanas y rurales. La virtud de ser una tecnología inalámbrica, permite un despliegue de su infraestructura, que, dependiendo de la zona de implementación, puede ser una gran alternativa de costos en beneficio de clientes y operadores. Además, desde que sus primeros dispositivos fueron certificados por el WiMAX Forum en el 2006, se han llevado a cabo investigaciones y desarrollos tanto de su estructura como de sus servicios. En sus inicios, la tecnología ofreció soluciones de banda ancha inalámbrica a usuarios fijos y nómadas mediante la interfaz de aire IEEE 802.16d-2004, y posteriormente, movilidad mediante IEEE 802.16e; Esta última versión del estándar define algunos cambios, entre ellos, modificaciones en las capas PHY y MAC, *handoff*, *handover*, gestión de potencia y SOFDMA.

Aunque el desarrollo fue rápido, la certificación por parte del WiMAX Forum y posterior comercialización de los dispositivos para la implementación y soporte de movilidad, fue relativamente lenta. Debido a esto, las primeras implementaciones WiMAX brindan soporte sólo para usuarios fijos y nómadas. En Colombia, las ISP interesadas en prestar servicios de banda ancha a través de WiMAX, realizaron el diseño y planificación de sus redes sin tener en cuenta el futuro avance de la tecnología, la movilidad.

Realizar una correcta planeación de una red inalámbrica WiMAX, teniendo en cuenta sus versiones fija y móvil, puede dar como resultado el despliegue efectivo de una infraestructura de red, soluciones a la creciente demanda de banda ancha en Colombia y la satisfacción tanto de usuario como del operador. Es pertinente conocer a fondo la tecnología WiMAX, su estructura, sus proyecciones y sus beneficios. Es necesario determinar el escenario actual del mercado, la cobertura lograda por WiMAX fija, su capacidad, su frecuencia y arquitectura, así como también es preciso determinar las necesidades del mercado y sus requerimientos. Así, este trabajo de grado consta de cuatro capítulos sintetizados de la siguiente manera:

El primer capítulo contiene información descriptiva de la tecnología, se parte de su definición inicial y algunos aspectos relevantes, inherentes a sus versiones, perfiles de los

¹ *Digital Subscriber Line* – Línea de suscriptor digital

² *General Packet Radio Service* – Servicio de Radio de Paquete General

equipos y certificación de los mismos. El enlace WiMAX está basado en el estándar IEEE 802.16, por tal razón, se presenta un análisis descriptivo de la capa PHY y MAC que incluye aspectos como subcapas, tramas, funcionamiento de los enlaces UL, DL³, duplexación, multiplexación, acceso múltiple, etc. Con el fin de conocer más a fondo el funcionamiento de los sistemas WiMAX en su nivel más básico. La segunda parte del primer capítulo, establece una base conceptual sobre la convergencia fija móvil, necesaria para el desarrollo del trabajo posterior. En esta sección se plasman los aspectos necesarios para lograr una red convergente fija móvil. La última parte del primer capítulo es dedicada al conocimiento de la infraestructura y topologías de la red.

El segundo capítulo muestra el estado actual de la tecnología WiMAX en Colombia en aspectos legales, políticos, económicos y técnicos. En los aspectos legales se estudia el marco regulatorio que es aplicable a los despliegues WiMAX. A su vez, el gobierno nacional estableció algunas políticas inherentes al desarrollo de la banda ancha en Colombia, mencionadas en éste capítulo debido a que tienen estrecha relación con el objeto de estudio. Se muestran los procesos de adjudicación de las bandas usables por WiMAX en el territorio nacional, se listan los adjudicatarios que actualmente poseen licencias de operación y los que cuentan con despliegues en la banda de 3.5 GHz. Seguidamente se presenta un estudio real de las implementaciones en Colombia en aspectos técnicos, que incluyen topografías, equipos, cobertura, emplazamientos, participación en el mercado, aplicaciones y servicios. Con el primer y segundo capítulo se da cumplimiento al primer objetivo específico, de construir una base conceptual sólida que sustente un desarrollo coherente y responsable de soluciones de coexistencia fija móvil en WiMAX, adaptadas al territorio nacional.

En el tercer capítulo, se establecen estrategias y procedimientos técnicos a nivel de arquitectura de red para la adaptación de accesos móviles en redes WiMAX fija existentes en Colombia. El desarrollo de este objetivo, exige la atención de cinco aspectos principales, adaptados de acuerdo a lo contenido en los capítulos uno y dos: fundamentación teórico práctica sobre planeación de redes inalámbricas, donde se hace un compendio de conceptos y métodos generales de planificación, y una adecuación a desarrollos WiMAX específicos; determinación del escenario de implementación que constituye el primer paso en el desarrollo de la solución, donde se estudian todos los parámetros, características, cifras, etc, sobre la red WiMAX ya implementada; determinación de la necesidad, donde se hacen los análisis técnico-económicos previos a la realización de la planeación; implementación de la solución que establece las estrategias y procedimientos para la adecuación de la red a nivel de arquitectura de red; y estrategia de evaluación y desempeño que brinda pautas para la mejora continua del despliegue. De esta manera se proponen estrategias y procedimientos técnicos para obtener una red coexistente WiMAX fija móvil, y da cumplimiento al segundo objetivo específico.

El cuarto capítulo es una aplicación práctica del tercer capítulo; inicia con la obtención y selección del escenario de implementación, en este caso el despliegue WiMAX por parte de la empresa UNE EPM Telecomunicaciones en la ciudad de Neiva. Se propone un conjunto de estrategias y procedimientos de acuerdo a lo mencionado en el tercer capítulo, dando con esto cumplimiento al tercer objetivo específico del trabajo de grado.

³ *Uplink* – Enlace de subida, *Downlink* - Enlace de bajada

1. CONCEPTOS FUNDAMENTALES

Con el fin de establecer una base conceptual para la adaptación de accesos móviles a una infraestructura de red fija, este capítulo contiene una recopilación de conocimientos teóricos y prácticos sobre la tecnología WiMAX en sus versiones fija y móvil. Se plasma información descriptiva de la tecnología WiMAX, su modelo de referencia, análisis de la posible escalabilidad de los equipos de usuario, topologías y un análisis de su funcionamiento. Se tocan temas como la convergencia fija móvil con sus definiciones, requerimientos, componentes y procesos necesarios para su obtención.

1.1 WiMAX

1.1.1 WiMAX⁴ [1][2][3]. Es la marca comercial y nombre de la tecnología de red BWA, WWAN, que ofrece conectividad de alta velocidad y a bajo costo, a usuarios fijos, nómadas y móviles en tres aplicaciones básicas: solución de acceso de último kilómetro, *backhaul* y/o *backbone* de red y redes móviles inalámbricas. Está basada en estándares y posee principalmente dos versiones: WiMAX fija y WiMAX móvil. La tecnología define y especifica una única interfaz de aire, un modelo flexible de arquitectura de red y características avanzadas complementarias. La figura 1.1 [5] expone unos escenarios de uso de la tecnología WiMAX. La tabla 1.1 [3] muestra las características técnicas más relevantes de la tecnología en sus dos versiones.

1.1.1.1 WiMAX fija [1][4][5]. Es una tecnología de red BWA, WMAN, que ofrece conectividad de alta velocidad a usuarios fijos y nómadas como solución de último kilómetro y *backhaul* de red. La interfaz de aire está fundamentada en el estándar IEEE⁶ 802.16-2004 y en ETSI⁷ HiperMAN; su modelo de arquitectura de red es *all-IP* para topologías de red punto a punto y punto a multipunto que operan con o sin línea de vista.

1.1.1.2 WiMAX móvil [6][7][8]. Es una tecnología de red BWA, WWAN, IMT-2000⁸, que permite la convergencia de redes banda ancha fija y móvil mediante una arquitectura de red *all-IP* flexible, que contiene accesos inalámbricos mejorados a usuarios fijos, nómadas y móviles, en configuraciones punto a punto, punto a multipunto y malla. Se fundamenta en el estándar de interfaz aéreo IEEE 802.16e y provee mejoras al desempeño del sistema en condiciones sin línea de vista o NLOS. Ofrece escalabilidad en las tecnologías de acceso y en la arquitectura de red, gran flexibilidad en opciones de despliegue debido a los múltiples modelos de uso, operación en bandas de espectro múltiples, amplia gama de servicios, soporte mejorado en potencia, *handoff* y *handover* entre celdas.

1.1.1.3 WiMAX Forum [1][2][9]. Es una organización sin ánimo de lucro, líder de la industria, conformada por más de 540 compañías⁹ para promover, evaluar y certificar la interoperabilidad de productos de acceso BWA, basados en los estándares desarrollados

⁴ *Worldwide interoperability for microwave access* - Acceso microondas para interoperabilidad mundial.

⁵ *Backhaul*. es un enlace de interconexión entre redes de datos.

⁶ *Institute of Electrical and Electronics Engineers* – Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos

⁷ *European Telecommunications Standards Institute* – Instituto Europeo de estándares de telecomunicaciones.

⁸ *International Mobile Telecommunications 2000* – Telecomunicaciones Móviles inalámbricas 2000

⁹ Las compañías que conforman WiMAX Forum son principalmente comercializadores, fabricantes, operadores, académicos y otros. La lista completa está definida en el sitio web Forum Member Roster.

por el grupo IEEE 802.16 y adoptados por IEEE y ETSI HiperMAN. Establece especificaciones para los productos mediante la definición de perfiles de sistema WiMAX, formula políticas para asegurar el beneficio económico y el uso eficiente del espectro. Promueve la coordinación de sus miembros, asegura interoperabilidad entre los equipos y acelera la introducción de estos en el mercado. En la tabla 1.2 se expone la conformación WiMAX Forum en sus diferentes grupos de trabajo.

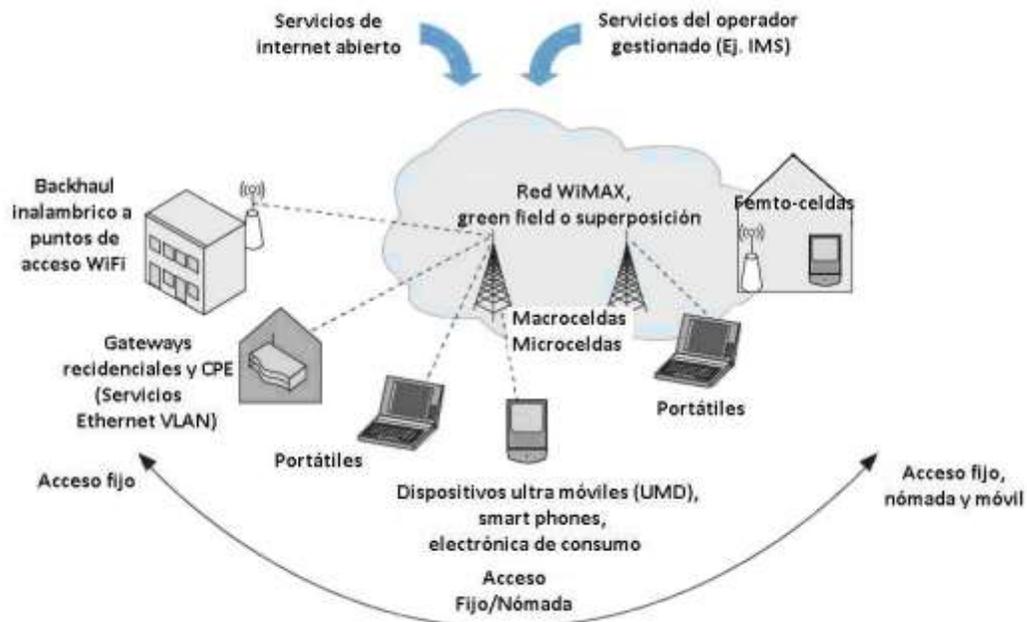


Figura 1.1. Escenario general de la tecnología WiMAX

1.1.1.4 Certificación de productos WiMAX [10][11][12]. *WiMAX Forum Laboratory* es el organismo diseñado para realizar las pruebas de interoperabilidad y concordancia requeridas en la expedición del *WiMAX Forum Certified™*. La concordancia WiMAX no debe ser confundida con interoperabilidad; la combinación de esos dos tipos de prueba conforman las pruebas de certificación WiMAX.

La *prueba de concordancia* WiMAX es un proceso donde las unidades de prueba Estación Base o BS y Estación Suscriptor o SS, son evaluadas para asegurar que su desempeño está en concordancia con las especificaciones definidas en el documento WiMAX PICS¹⁰, propuesto por el TWG¹¹. En el test de concordancia las unidades BS/SS deben pasar todas las condiciones de prueba, definidas en un perfil de sistema específico.

La *prueba de interoperabilidad* WiMAX es un proceso de evaluación multifabricante para probar el rendimiento de la BS y/o SS de un fabricante para transmitir y recibir ráfagas de información de la BS y/o SS de otro fabricante basado en las WiMAX PICS. Cada SS es probada con tres BS, una del mismo y las otras de diferente fabricante. Una prueba de

¹⁰ *Protocol Implementation Conformance Specifications* – Especificaciones de concordancia e interoperabilidad para la implementación de protocolo.

¹¹ Grupo de trabajo técnico de WiMAX Forum

grupo formalmente se conoce como un *Plug-Fest*, que constituye un encuentro donde muchos fabricantes pueden verificar la interoperabilidad de sus equipos.

Tabla 1.1. Cuadro comparativo de red WiMAX fija y WiMAX móvil

Parámetros	WiMAX Fija	WiMAX Móvil
<i>Interfaz Aérea</i>	IEEE 802.16d-2004 y ETSI HiperMAN	IEEE 802.16e
<i>Accesos fijos</i>	Si	Si
<i>Acceso nómada</i>	Si	Si
<i>Mobilidad simple</i>	No	Si
<i>Mobilidad plena</i>	No	Si
<i>Espectro</i>	2GHz – 66 GHz.	< 6 GHz.
<i>Condiciones del canal</i>	LOS, NLOS	LOS, NLOS
<i>QoS</i>	Si	Si
<i>Radio de la celda</i>	50 Km	5 Km
<i>Costos (ejemplo)</i>	BS:USD \$7.000 SS:USD \$350 ¹²	BS:USD \$ 30.000 USD \$ 200 ¹³
<i>Conectividad</i>	Alternativa a E1/T1, Cablemodem, DSL, <i>Backhaul</i> , Interconexión empresarial.	Accesos de alta movilidad.
<i>Ancho de Banda</i>	Hasta 75 Mbps	Hasta 15 Mbps
<i>Servicios</i>	Voz, datos, video, multimedia fijos	Voz, datos, video, multimedia móviles
<i>Comparaciones adicionales</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Modulación OFDM menos compleja. • Soporte para bandas no licenciadas. • Alto <i>throughput</i>. • Disponibilidad más temprana de productos OFDM. 	<ul style="list-style-type: none"> • Mejor señal de propagación mediante el uso de OFDMA • Asignaciones de frecuencia más baja • Compatibilidad con versiones anteriores • Uso en ambientes fijos y móviles. • Extenso rango de dispositivos móviles.

¹² Estación Base con celda de 40 Km de radio y CPE fijo de Aperto Networks.

¹³ Estación base con celda de 3 Km de radio y MS tarjeta PCMCIA de HUAWEI

Tabla 1.2. Grupos de trabajo WiMAX
Función principal

Nombre	Función principal
<i>Application Working Group</i> ó <i>AWG</i>	Define las aplicaciones de WiMAX que son necesarias para satisfacer la oferta competitiva básica.
<i>Certification Working Group</i> ó <i>CWG</i>	Se encarga de los aspectos operativos del programa de certificación del WiMAX Forum, las interfaces con los laboratorios de certificación y la selección nuevos laboratorios de certificación.
<i>Marketing Working Group</i> ó <i>MWG</i>	Promueve el WiMAX Forum, su marca y el estándar que forma la base para una interoperabilidad mundial de sistemas BWA.
<i>Network Working Group</i> ó <i>NWG</i>	Crea especificaciones de red de capas altas para sistemas WiMAX fija, nómada, portable y móvil.
<i>Regulatory Working Group</i> ó <i>RWG</i>	Influye y asesora agencias regulatorias de todo el mundo para promover la asignaciones de espectro armonizado global compatibles con WiMAX
<i>Service Provider Working Group</i> ó <i>SPWG</i>	Brinda a los proveedores de servicio una plataforma influyente de productos BWA y requerimientos de espectro para asegurar que sus necesidades sean satisfechas.
<i>Technical Working Group</i> ó <i>TWG</i>	Desarrolla especificaciones de evaluación de concordancia e interoperabilidad, servicios de certificación y perfiles basados en prácticas aceptadas globalmente para alcanzar la interoperabilidad mundial de sistemas BWA.

El logo *WiMAX-Certified* de *WiMAX Forum* acompaña a todos los productos certificados para hacer de él, un criterio clave de viabilidad de mercado¹⁴; los dispositivos que cuentan con el logo WiMAX han tenido un éxito del cien por ciento en el conjunto de evaluaciones definidas por el *WiMAX Forum* y poseen concordancia de protocolos, concordancia radio e interoperabilidad del dispositivo. CETECOM¹⁵ de Málaga España y TTA¹⁶ *Testing and Certification Lab* de Seul Corea cumplen con las especificaciones RCTT RFP¹⁷, y son los organismos encargados de realizar el RCTT¹⁸. El RCTT un sistema de evaluación basado en el MINT¹⁹ T2100, el primer sistema de evaluación de concordancia RF para dispositivos WiMAX. La Familia de soluciones de evaluación MINT para WiMAX comprende: test de concordancia RF MINT T2110, test de concordancia de protocolo MINT T2230 y un análisis de protocolo MINT T2240.

1.1.1.5 Perfiles WiMAX [3][4][12]. El *WiMAX Forum* define un número limitado de perfiles de sistema, especificaciones de red y perfiles de certificación. Un *perfil del sistema* define un subconjunto de características obligatorias y opcionales, seleccionadas por el *WiMAX Forum* a partir del estándar IEEE 802.16. La determinación que especifica si una

¹⁴ De la misma forma que ha sido el Logo *WiFi-Certified* para el *WiFi Alliance*.

¹⁵ Centro de Tecnología de las comunicaciones, Málaga, España

¹⁶ *Telecommunications Technology Association* – Asociación de Tecnología de Telecomunicaciones.

¹⁷ RCTT RFP es la actividad de selección de laboratorios dirigida por el *WiMAX Forum*.

¹⁸ Radio Conformance Test Tester – Calificador de prueba de concordancia e interoperabilidad radio

¹⁹ MINT

característica perteneciente a un perfil es obligatoria u opcional puede ser diferente a la que originalmente define el estándar. Comúnmente el WiMAX Forum tiene dos tipos de perfil de sistema diferentes, uno basado en el IEEE 802.16d-2004 con OFDM, llamado perfil de sistema fijo y el otro basado en el estándar IEEE 802.16e con OFDMA escalable llamado perfil de sistema móvil. Las especificaciones de red son un complemento al perfil del sistema y definen un conjunto de requerimientos para la arquitectura *end-to-end* donde se busca aumentar la eficiencia de la red y extender el alcance de interoperabilidad con otras tecnologías.

Un *perfil de certificación* está definido como una instancia particular de un perfil de sistema, en aspectos especificados como: frecuencia de operación, ancho de banda del canal y modo de duplexación. La figura 1.2 [5], muestra el esquema de evolución de la tecnología WiMAX en los aspectos antes mencionados. Tal y como se muestra en las figuras 1.2 y 1.3, el perfil de sistema está compuesto por los siguientes cinco subperfiles: PHY, MAC, Radio, modo de duplexación y niveles de potencia. Aunque hay combinaciones muy diferentes de frecuencias centrales y anchos de banda de canal, todos los productos *WiMAX móvil release 1.0*, comparten las mismas características PHY y MAC, y el mismo modo de duplexación, el cual es TDD. El *release 1.5* es una migración superficial mientras que el *release 2.0* es una migración profunda. Los correspondientes estándares de referencia IEEE para las versiones 1.5 y 2.0 son IEEE 802.16 REV2 e IEEE 802.16m respectivamente. Las especificaciones de red, denominadas *network release*, son definidas internamente por el WiMAX Fórum, las cuales incluyen: especificaciones de red *end-to-end* y especificaciones de interoperabilidad. El Grupo de trabajo de Red de *WiMAX Forum* es responsable de la definición de estas especificaciones; algunas de ellas están relacionadas a ASN, protocolos a nivel de datos y control, perfiles ASN, soporte para movilidad en CSN, AAA con otras tecnologías, y múltiples servicios tales como LBS, MCBCS, etc. En la tabla 1.3 se exponen las especificaciones más importantes para las versiones 1.0, 1.5 y 2.0 [12].

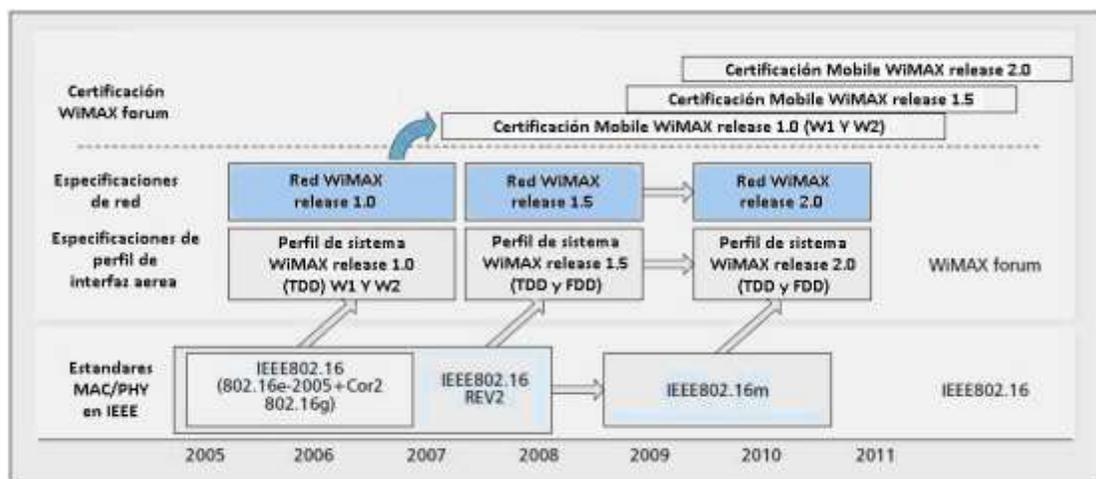


Figura 1.2. Evolución de la tecnología WiMAX

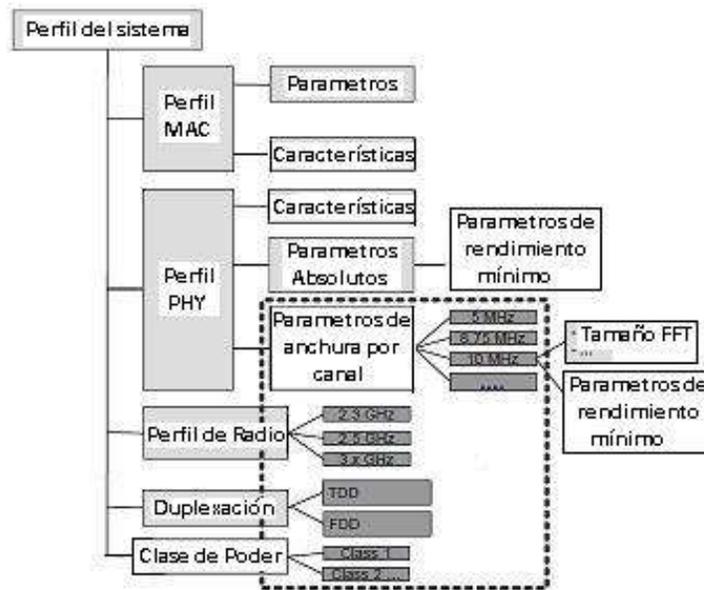


Figura 1.3. Estructura de un perfil de sistema WiMAX

Tabla 1.3. Especificaciones de perfil de red WiMAX

Release 1.0	Release 1.5	Release 2.0
Movilidad en ASN y CSN	Activación y ofrecimiento sobre el aire OTA	Continuidad de sesión multimedia
Gestión de ubicación y buscapersonas	Servicios basados en ubicación LBS	Interoperabilidad 3GPP/2 con <i>handover</i> optimizado
Conectividad IPV4 y IPV6	Integración con IMS	Gestión de red, incluyendo redes <i>self-organized/optimized SON</i>
QoS preequipado/estático	Políticas y carga PCC, y QoS Dinámico compatible con 3GPP <i>release 7</i> .	Handover WiFi-WiMAX continuo
Gestión del recurso radio opcional	Telefonía IP con servicios de llamada de emergencia e interceptación legal	<i>Roaming</i> ampliado
Descubrimiento/ Selección de red	Soporte total de NAP compartido	Soporte para estaciones con retransmisión multisalto
Soporte CS IP/Ethernet	Integración de datos de Handover	Soporte para femtoceldas
Credenciales flexibles, cuentas pre y pospago <i>Roaming</i>	Soporte <i>multihost</i>	Informes de medición a dispositivos
Interoperabilidad compatible con 3GPP-WLAN	Servicios Ethernet, VLAN, DSL IWK Servicios Internet abiertos ampliados y AAS basado en diámetros	

1.2 IEEE 802.16 y ETSI

1.2.1 IEEE 802.16 [12][13][14][15]. Es una familia de estándares de acceso inalámbrico banda ancha, que contienen las especificaciones de interfaz de aire para sistemas BWA fijos, nómadas y móviles que soportan servicios multimedia en bandas licenciadas y no licenciadas, en condiciones LOS y NLOS; definen la estructura y operaciones de la capa física y la capa enlace en un sistema de comunicación, compuesto de varias estaciones base centrales que se conectan entre sí y que brindan cobertura a múltiples usuarios dispersos, en áreas con radios de varios kilómetros. Posee un protocolo MAC común y especificaciones de capa PHY dependientes del espectro de uso y de las regulaciones asociadas al escenario de implementación [16]. La MAC es configurable e involucra tres subcapas: la subcapa de convergencia, la subcapa de parte común, y la subcapa de seguridad. La capa PHY está configurada para usar frecuencias que varían entre los 450 MHz y los 66 GHz y canales entre 1.5 y 20 Mhz; usa técnicas de acceso Single Carrier - SC, OFDM y OFDMA, en modos TDD y FDD. En la figura 1.4 se muestra la estructura de capas de IEEE 802.16.

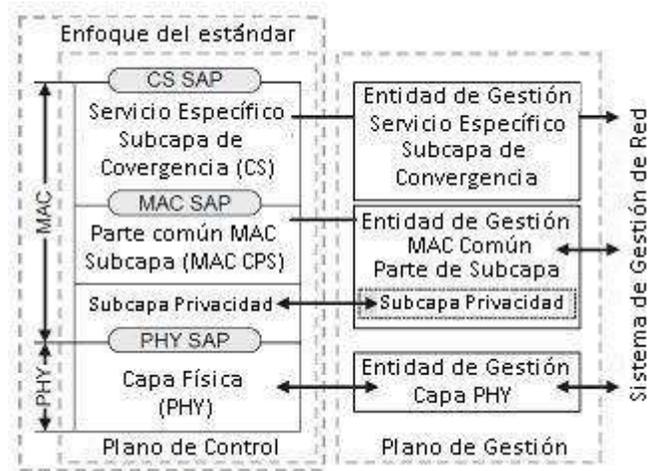


Figura 1.4. Modelo de referencia IEEE 802.16

IEEE 802.16 ofrece una variedad de opciones de uso que en gran medida dependen de la técnica de acceso que usa la capa PHY como son: *WirelessMAN-SC*, *WirelessMAN-SCa*, *WirelessMAN-OFDM*, *WirelessMAN-OFDMA* y *WirelessHUMAN*. De la misma forma, ofrece múltiples opciones de configuración MAC, duplexación, frecuencia de operación, etc.; es desarrollada para su uso en una extensa gama de aplicaciones, opciones de diseño y escenarios de implementación; establece calidad de servicio, primitivas de seguridad fuertes, soporte *multicast*, *handover* con baja latencia y baja pérdida de paquetes. La señalización en capas superiores, la arquitectura de red y protocolos detrás de las estaciones base, requeridos para una especificación *end-to-end*, no son definidos. En la tabla 1.4 se exponen los datos básicos de IEEE 802.16d-2004 y IEEE 802.16e.

1.2.2 Grupo de trabajo IEEE 802.16 [1][4]. El grupo de trabajo IEEE 802.16 es una unidad del comité de estándares IEEE 802 LAN/MAN/WAN, fundado en el año de 1998, con el fin de desarrollar un estándar de interfaz aérea para BWA, que opere en bandas licenciadas y no licenciadas, en un rango de espectro de 2 a 66 GHz; trabaja

conjuntamente con el comité *Broadband Radio Acces Network* ó BRAN²⁰ de ETSI, para el desarrollo de especificaciones de sistema BWA compatibles; es responsable de la preparación y elaboración de especificaciones formales mediante la definición de una familia de estándares que llevan su mismo nombre, para el despliegue global de WMAN y WWAN en el mundo. El grupo trabaja actualmente en la especificación de accesos para redes móviles de nueva generación.

Tabla 1.4. Datos básicos del estándar IEEE 802.16

	802.16	802.16-2004	802.16e-2005
<i>Finalizado</i>	Diciembre de 2001	Junio de 2004	Diciembre de 2005
<i>Banda de frecuencia</i>	10GHz-66GHz	2GHz-11GHz	2GHz-11GHz fijo; 2GHz-66GHz móvil.
<i>Aplicación</i>	LOS fijo	NLOS fijo	Punto a multipunto, malla.
<i>Arquitectura MAC</i>	Punto a multipunto, malla.	Punto a multipunto, malla.	Punto a multipunto, malla.
<i>Esquema de transmisión</i>	SC	SC, 256 OFDM o 2.048 OFDM	SC, 256 OFDM o SOFDM con 128, 512, 1.024 o 2.048 supportadoras.
<i>Modulación</i>	QPSK, 16 QAM, 64 QAM	QPSK, 16 QAM, 64 QAM	QPSK, 16 QAM, 64 QAM
<i>Velocidad de datos</i>	32 Mbps – 134.4 Mbps	1 Mbps – 75 Mbps	1 Mbps-75 Mbps
<i>Multiplexación</i>	Ráfaga TDM/TDMA	Ráfaga TDM/TDMA/OFDMA	Ráfaga TDM/TDMA/OFDMA
<i>Duplexación</i>	TDD y FDD	TDD y FDD	TDD y FDD
<i>Anchos de banda</i>	20 MHz, 25 MHz, 28 MHz	1,75 MHz, 3.5 MHz, 7 MHz, 14 MHz, 1.25 MHz, 5 MHz, 10 MHz, 8.75 MHz.	1,75 MHz, 3.5 MHz, 7 MHz, 14 MHz, 1.25 MHz, 5 MHz, 10 MHz, 8.75 MHz, 15 MHz.
<i>Interfaces de aire soportadas</i>	WirelessMAN-SC	WirelessMAN-SCa WirelessMAN-OFDM WirelessMAN- OFDMA WirelessMAN- HUMAN	WirelessMAN-SCa WirelessMAN-OFDM WirelessMAN- OFDMA WirelessMAN- HUMAN ²¹
<i>Implementaciones WiMAX</i>	Ninguna	256- OFDM para WiMAX fija.	SOFDMA para WiMAX móvil.

1.2.3 IEEE 802.16d-2004 [13][15][17]. Esta norma especifica la interfaz radioeléctrica de sistemas BWA fijos, compatibles con servicios multimedia. La capa MAC es compatible para arquitecturas punto a punto, punto a multipunto, con malla opcional. La MAC está estructurada de manera que admite múltiples especificaciones PHY, cada una adecuada a un determinado entorno de funcionamiento. Esta norma modifica y condensa las normas

²⁰ ETSI estableció un proyecto para la normalización de redes de acceso radio de banda ancha, cuya sigla es BRAN, en la primavera de 1997.

²¹ Highspeed Unlicensed Metropolitan Area Network

IEEE 802.16-2001, 802.16a-2003 y 802.16c-2002. El alcance del estándar IEEE 802.16d-2004 cubre las especificaciones de las dos capas bajas en el modelo de referencia OSI. Esta versión provee mejoras en desempeño, facilidad de implementación, reemplaza material incorrecto, ambiguo o incompleto de las anteriores versiones e incluye perfiles de sistema. Una de las mejoras en esta extensión es la concatenación de PDU y SDU²² que permite reducir el *overhead* MAC [16]. Esta extensión provee una mejora substancial para el mecanismo *polling*, permitiendo que las SS puedan ser atendidas individualmente o en grupos. También permite solicitud de ancho de banda de tipo *piggybacking* sobre los paquetes de datos para así reducir colisiones y *overhead* en el sistema.

El estándar IEEE 802.16d-2004, está diseñado para modelos de uso de acceso fijo, para su aplicación en soluciones inalámbricas de acceso fijo banda ancha, que proveen una solución interoperable de clase portadora de último kilómetro, ofreciendo una alternativa inalámbrica a enlaces *backhaul* y accesos cableados tales como cable modem, DSL, etc.

1.2.4 IEEE 802.16e [12][18][19]. Esta enmienda actualiza y expande el estándar IEEE 802.16d-2004; fue desarrollada por el grupo de trabajo *mobile WirelessMAN*, para que sistemas de acceso inalámbrico banda ancha, soporten un gran número de estaciones suscriptoras que se desplazan a velocidad vehicular, mediante la introducción de cambios sustanciales en la capa PHY y MAC, tales como: *handoff*, gestión de potencia, y definición de una nueva interfaz de aire PHY mediante el uso de SOFDMA [20]. Define funciones para soportar *handover* en capas más altas para estaciones base o zonas de cobertura. Las operaciones están limitadas para movilidad en bandas de frecuencia por debajo de los 6 GHz. Las capacidades de SS IEEE 802.16d-2004 no son comprometidas. El propósito de este estándar es extender la oferta de soluciones de BWA mediante la adición de movilidad a través de adaptadores que se conectan directamente a la red. Llena el vacío existente de muy altas velocidades de datos en redes de área local inalámbrica y sistemas celulares de alta movilidad. Aunque preserva aspectos técnicos de IEEE 802.16d-2004, la mejora clave es el empleo de SOFDMA²³, para minimizar la congestión en la red y hacer que el sistema sea menos susceptible a la interferencia; algunas otras mejoras incluyen la introducción de algunas tecnologías tales como HARQ, esquemas de comunicación avanzada, codificación turbo y MIMO²⁴.

1.2.5 Normas ETSI [21]. Las normas ETSI aplicables a WiMAX son consignadas dentro de la RECOMENDACIÓN UIT-R F.1763 que establece las normas de interfaz radioeléctrica para sistemas de acceso inalámbrico de banda ancha que funcionan en el servicio fijo por debajo de 66 GHz²⁵. En la Recomendación figuran las siguientes especificaciones: Perfiles de sistema; parámetros de capa física, en particular la disposición en canales, diagrama de modulación y velocidades de transmisión de datos; mensajes y campo de encabezamiento de la capa MAC; métodos de prueba de conformidad. Se fundamenta en las siguientes recomendaciones de la UIT-R: UIT-R F.1399, UIT-R F.1401, UIT-R F.1399, UIT-R F.1763, UIT-R F.1499, UIT-R M.1450, UIT-R M.1457²⁶, Manual UIT-R - Volumen 1, Recomendación UIT-T J.122.

²² *Protocol Data Unit* – Unidad de datos de protocolo, *Service Data Unit* – Unidad de datos de servicio

²³ opuesto a la versión no escalable usada por la especificación IEEE 802.16d-2004

²⁴ Ver Anexo A

²⁵ Cuestión UIT-R 236/9

²⁶ Especificaciones detalladas de las interfaces radioeléctricas de las telecomunicaciones móviles internacionales-2000 (IMT-2000).

Las normas HiperMAN tratan del funcionamiento para sistemas BWA fijos que funcionan en las frecuencias de 2-11 GHz, usando un enlace descendente OFDM y un enlace ascendente OFDMA, para proporcionar células de gran tamaño cuando se trabaja sin visibilidad directa NLOS. La norma permite la compatibilidad con FDD y TDD, eficiencia espectral y elevadas velocidades de datos, modulación adaptativa, gran radio de celda, compatibilidad con sistemas avanzados de antenas y algoritmos de encriptación de alta seguridad. Sus perfiles apuntan a las separaciones de canales de 1,75 MHz, 3,5 MHz y 7 MHz, adecuados para la banda de 3,5 GHz.

1.3 INTERFAZ AÉREA [16][20]

IEEE 802.16 divide la capa de enlace de OSI, en dos subcapas llamadas control de enlace lógico LLC y control de acceso al medio MAC. La capa PHY crea la conexión física entre dos extremos, mientras que la capa MAC es la responsable del establecimiento y mantenimiento de la conexión. En la figura 1.5.a se relaciona la arquitectura de la interfaz área con el modelo de referencia OSI. IEEE 802.16 especifica la interfaz de aire de sistemas BWA que soportan multimedia. La capa MAC soporta principalmente una arquitectura punto a multipunto con una tecnología malla opcional. Está estructurada para soportar muchas capas físicas especificadas en el mismo estándar, sin embargo, WiMAX solo usa dos de ellas. El protocolo de arquitectura de capas de la interfaz aérea de WiMAX se muestra en la figura 1.5. Se puede apreciar que IEEE 802.16 define la capa física y la capa MAC, la cual es la parte principal de la capa de enlace; la subcapa LLC no es definida dentro del estándar IEEE 802.16 debido a que ya es tratada dentro del estándar IEEE 802.2 [22].

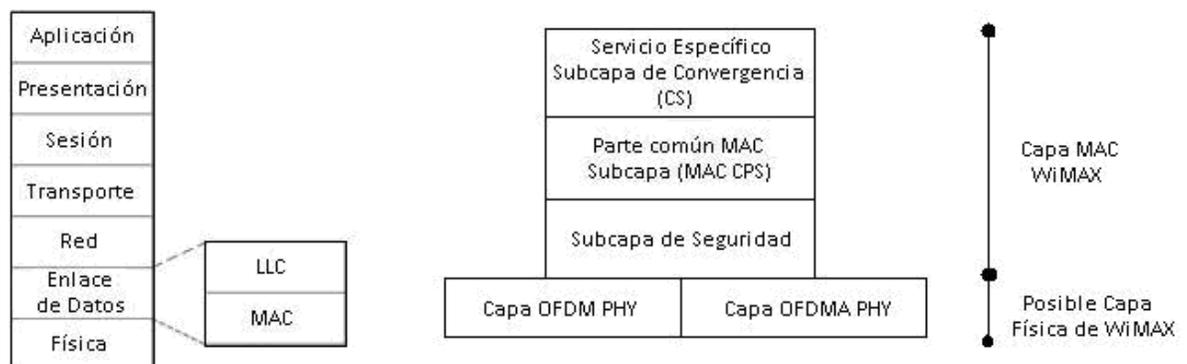


Figura 1.5. Arquitectura interna de la interfaz aérea WiMAX

1.3.1 PHY [11][23][24]. En WiMAX los datos se transmiten a altas velocidades en una interfaz aérea por medio de ondas electromagnéticas usando un determinado canal. La capa física o PHY establece la conexión física entre dos extremos, usualmente operando de forma bidireccional. Como IEEE 802.16 es un estándar digital, PHY es responsable de la transmisión de secuencias de bits. Define el tipo de señal usada, la clase de modulación y demodulación, la potencia de transmisión y también otras características físicas. Soporta modos de operación FDD y TDD, para su uso en los canales UL y DL, sistema de antenas adaptativas AAS, técnicas de *beamforming* y MIMO, modulación adaptativa PSK y QAM, FEC robusto a través de codificación RS Y CC, posee ancho de banda flexible y diversidad de transmisión. Incluye una subcapa de convergencia de

transmisión que se encuentra dentro de la capa PHY y la capa MAC la cual transforma PDUs MAC de longitud variable, a bloques FEC de longitud fija.

Las técnicas de duplexación usadas por un canal WiMAX son: TDD y FDD. Permiten crear canales bidireccionales para transmisiones UL y DL. En WiMAX, ambas técnicas pueden coexistir en bandas adyacentes. La tabla 1.5 especifica cada uno de estos modos de operación.

Tabla 1.5. FDD y TDD

Parámetros	TDD	FDD
<i>Características Principales</i>	Eficiente para sistemas basados en IP, soporta tráfico simétrico y no simétrico, flexible, solo requiere de una banda, alta eficiencia, adaptabilidad a procesamiento de señal avanzado.	Soporte para servicios legales, solo tráfico simétrico, implementación inflexible, baja eficiencia ²⁷ , necesita una banda de guarda.
<i>Descripción</i>	Técnica de duplexación usada en soluciones no licenciadas y usa un solo canal compartido para UL y DL.	Técnica de duplexación usada en soluciones licenciadas que emplean un par de canales ²⁸ , uno para UL y otro para DL.
<i>Ventajas</i>	Flexibilidad extendida porque solo requiere de una frecuencia. Más fácil su implementación con tecnología de antenas inteligentes, Asimétrico	Tecnología probada para voz, diseñada para tráfico simétrico, no requiere de tiempo de guarda.
<i>Desventajas</i>	No puede transmitir y recibir al mismo tiempo	No puede ser implementada donde el espectro es impar, espectro licenciado, altos costos relacionados a la compra de espectro.
<i>Usos</i>	Ráfagas, aplicaciones de datos asimétricos, ambientes con patrones de tráfico variables, donde la eficiencia espectral es más importante que el costo.	Ambientes con patrones de tráfico predecibles, donde los costos de los equipos son más importantes que la eficiencia espectral.

1.3.1.1 PHY WiMAX fija [3][25][26]. La capa física de la tecnología WiMAX fija, está basada en el uso de 256 subportadoras OFDM, generados por el uso de 256-puntos IFFT; 192 subportadoras son dedicadas al transporte de datos, 56 subportadoras son bandas de guarda y 8 son subportadoras piloto; todas las subportadoras se encuentran separadas mediante tiempos de guarda para reducir la interferencia entre símbolos en el sistema. Como la capa física de WiMAX es bastante flexible, las velocidades de datos varían basadas en los parámetros de operación; los parámetros que tienen un impacto significativo en la velocidad son: la modulación, la codificación y el ancho de banda. La

²⁷ Especialmente HD-FDD

²⁸ Deben ser separados para minimizar interferencia

tabla 1.6 [23], muestra velocidades de datos en la capa PHY variando los parámetros mencionados²⁹. Un incremento en el ancho de banda genera un incremento en el espaciado de la subportadora y del tamaño FFT, lo que implica un tiempo de símbolo OFDM más pequeño y por consiguiente más símbolos transportados. De acuerdo a la especificación OFDM PHY, los símbolos OFDM se transmiten en tramas TDMA. La trama puede ser de 2.5, 4, 5, 8, 10, 12.5, o 20 ms [16]. Tramas más pequeñas pueden proveer baja latencia para aplicaciones de gran ancho de banda. WiMAX define canales adaptativos que dependen de su entorno. Usando el indicador de realimentación de calidad del canal, la SS puede informar la calidad actual de éste en DL [25]. Para el UL, la estación base puede estimar su calidad, basado en la calidad de la señal percibida. El *scheduler* de la estación base, puede tener en cuenta la calidad del canal UL y DL de cada usuario, asignar una modulación y codificación diferente que maximice el *throughput* del sistema. La figura 1.6 [23], muestra el proceso de adaptación de la modulación, dependiendo de la relación de señal a ruido existente en el medio [3].

Una de las características sobresalientes de WiMAX es la subcanalización, que permite a cada SS usar una parte del ancho de banda asignado para generar un uso eficiente del espectro, concentrar la potencia disponible, incrementar el desempeño del enlace y reducir la granularidad de datos [4]. La subcanalización en WiMAX fija está hecha solo en la dirección UL. En DL todas las subportadoras son asignadas a la BS. En UL, se definen 16 subcanales, de ellos, 1, 2, 4, 8 o 16 pueden ser asignados a una SS. Solo una SS puede transmitir en un subcanal particular al mismo tiempo. Como hay 192 subportadoras, a un canal le corresponden 12 subportadoras en el dominio de la frecuencia. Esto implica que una SS puede transmitir a 1/16 de los bits transportados en un símbolo OFDM o sus múltiplos.

Los sistemas WiMAX fija usan más comúnmente TDD, por lo tanto el DL es modo TDM, mientras que en UL el modo es TDMA; la trama se divide en dos partes, una subtrama DL que contiene la información de asignación de *time slots* y las ráfagas DL para varias SS y una subtrama UL, que contiene una cantidad variable de PDUs que provienen de las SS [16]. Las SS toman *time slots* específicos y subportadoras para enviar sus datos durante la subtrama UL; la duración de la subtrama UL y DL puede ser ajustada durante la transmisión, dando gran flexibilidad, ya que permite a los terminales cambiar velocidades de datos de acuerdo a los requerimientos. La figura 1.7 [23] muestra la estructura de la trama e involucra la capa PHY y la capa MAC. A continuación se expone el funcionamiento de la capa [12]:

- La trama DL inicia con un preámbulo para sincronización y estimación inicial del canal. Estos son seguidos por FCH, que contiene la información pertinente a la trama tal como: modulación, subportadoras usables, longitud de los mensajes MAP y ubicación de las ráfagas DL.
- El siguiente símbolo OFDM es una ráfaga DL la cual es emitida a todos los usuarios. Estas contienen los mensajes UL-MAP y DL-MAP.
- La SS recibe los paquetes de la MAC, etiqueta a UL y DL y es informada de los tiempos de ráfaga asignados dentro de la trama. Las SS también son informadas de los parámetros a ser usados tales como esquemas de modulación. La BS

²⁹ Para obtener un valor más acertado Se deberá tener en cuenta el consumo de *overhead* y preámbulos de capas superiores, y división de tráfico de tramas UL y DL

también identifica un periodo de *ranging* UL donde cualquier SS que no se encuentre dentro de la red pueda indicársele sus requisitos para el acceso.

- En la subtrama UL después del periodo de *ranging* las SS están activas para enviar datos en los time slots asignados.

Tabla 1.6. Velocidades de datos en la capa PHY variando anchos de banda

Ancho de banda	3.5 MHz	1.25 MHz	5 MHz	10 MHz	8.75 MHz					
Modo PHY	256 OFDM	128 OFDMA	512 OFDMA	1024 OFDMA	1024 OFDMA					
Sobremuestreo	8/7	28/25	28/25	28/25	28/25					
Modulación y Codificación	Velocidades de datos en la capa PHY en Kbps									
	DL	UL	DL	UL	DL	UL	DL	UL	DL	UL
BPSK, 1/2	946	326	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
QPSK, 1/2	1882	653	504	154	2520	653	5040	1344	4464	1120
QPSK, 3/4	2822	979	756	230	3780	979	7560	2016	6696	1680
16 QAM, 1/2	3763	1306	1008	307	5040	1306	10080	2688	8928	2240
16 QAM, 3/4	5645	1958	1512	461	7560	1958	15120	4032	13392	3360
64 QAM, 1/2	5645	1958	1512	461	7560	1958	15120	4032	13392	3360
64 QAM, 2/3	7526	2611	2016	614	10080	2611	20160	5376	17856	4480
64 QAM, 3/4	8467	2938	2268	691	11340	2938	22680	6048	20088	5040
64 QAM, 5/6	9408	3264	2520	768	12600	3264	25200	6720	22320	5600

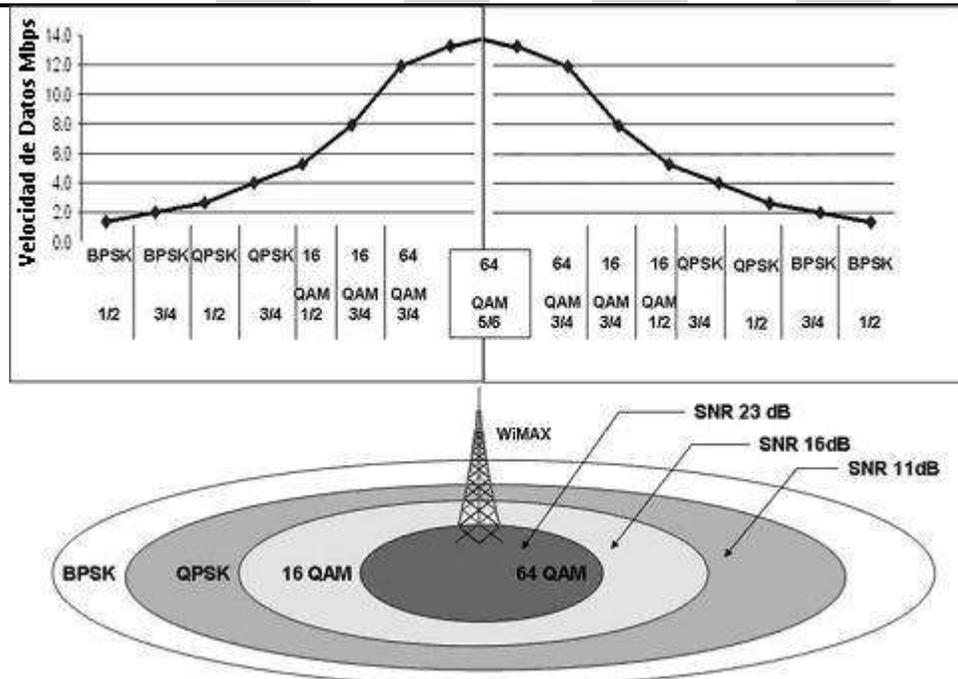


Figura 1.6. Modulación adaptativa de WiMAX

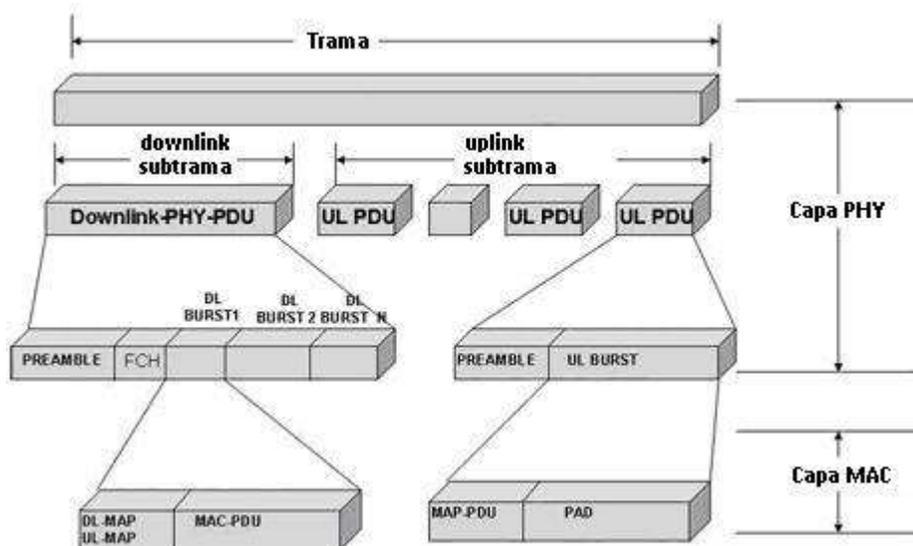


Figura 1.7. Subtramas UL y DL en un sistema WiMAX TDD

1.3.1.2 PHY WiMAX móvil [6][25][26]. La capa PHY está basada en el uso de OFDMA escalable. El tamaño de FFT puede variar entre 128 y 2048 puntos. A diferencia de WiMAX fija donde los subcanales son permitidos solo en el UL, WiMAX móvil usa subcanalización en UL y DL. Algunas características se explican a continuación:

La codificación y modulación adaptativa, es el esquema donde las subportadoras son asignadas como contiguas o adyacentes y ayuda a la estación a maximizar su S/N.

La asignación pseudoaleatoria de subportadoras, es el esquema donde los subcanales se forman por la distribución de subportadoras, escogidas aleatoriamente en el espectro de frecuencia. El esquema de ubicación de subportadoras en subcanales puede ser parcial o PUSC³⁰ ó completo o FUSC³¹. La subcanalización ayuda a incrementar la capacidad del sistema por la asignación del tiempo sin usar a otra MS y mejora las características de enlace para una MS con ganancias superiores a 15 dB [20].

WiMAX móvil opera de modo TDD; la trama PHY TDD está compuesta de una subtrama UL y una DL. Las subtramas están separadas por un gatillo de transición transmisión recepción o recepción transmisión, para que no haya superposición de señal. La subtrama DL inicia con un preámbulo³², seguido por la FCH que provee la información sobre la longitud del mensaje MAP, el esquema de codificación y la información del subcanal. Esto es seguido por la trama DL-MAP y UL-MAP. El MAP lleva información en la estructura de la subtrama, la cual puede ser usada, los *time slots* y subcanales asignados a los terminales [20]. Un subcanal está disponible a todos los terminales móviles para la ejecución del *ranging*. Los terminales, pueden usar este canal para realizar ajustes de potencia de lazo cerrado y también nuevos terminales móviles pueden hacer una solicitud de asignación de subcanal. La subtrama UL en el caso de WiMAX móvil, consiste en

³⁰ Partial Usage of Sub Channels – Uso parcial de subcanales

³¹ Full Usage of Sub Channels – Uso completo de subcanales

³² Usado para sincronización

ráfagas originadas desde dispositivos móviles individuales. La subtrama DL es transmitida enteramente por la estación base pero contiene subcanales asignados a estaciones móviles individuales. La asignación de subcanales y *time slots* para suscriptores individuales es muy flexible y puede variar trama a trama. La estructura típica de las subtramas DL y UL se presentan en la figura 1.8.

Los mensajes MAP, que autorizan la transmisión y recepción en un terminal móvil en ciertos *time slots* usando subcanales asignados, son bastante críticos, por lo tanto se transmiten con la más alta fiabilidad, tales como BPSK con una codificación de 1/2.

Una porción de la subtrama UL es asignada para ser usada como un canal *ranking*, donde las nuevas estaciones pueden hacer solicitudes a la estación base para asignación de *time slots*. El uso de este canal es para la entrada a la red, mantenimiento de la conexión y solicitud de ancho de banda [20].

El acceso a este *slot* está orientado a la conexión, mediante el uso de esquemas basados en señalización y acceso múltiple por división de código o CDMA. Hasta 256 conjuntos de códigos *ranking*³³ pueden generarse. Estos se dividen dentro de cuatro grupos: *handover ranking*, solicitudes iniciales, de ancho de banda y periódicas [20].

WiMAX móvil, provee el uso de modulación adaptativa y esquemas de codificación; se denomina así, porque cada trama puede tener una modulación y una codificación diferente. FEC permite que los errores puedan ser corregidos por la redundancia de información transportada, en la misma señal transmitida. Los bits redundantes, pueden ser transportados a través de diferentes esquemas, tales como paridad de bits o simple repetición de la señal transmitida. Para máxima eficiencia de FEC, se hace adaptación a las características del sistema de transmisión y se usan CC y RS³⁴. FEC es adaptativo y varía para optimizar la velocidad de transferencia de datos, esto es determinado por la BS mediante mediciones al CQI. El intercalado de bits y el HARQ, ayudan a seleccionar bits con errores y hacer una rápida retransmisión mediante el uso del canal ACK [6].

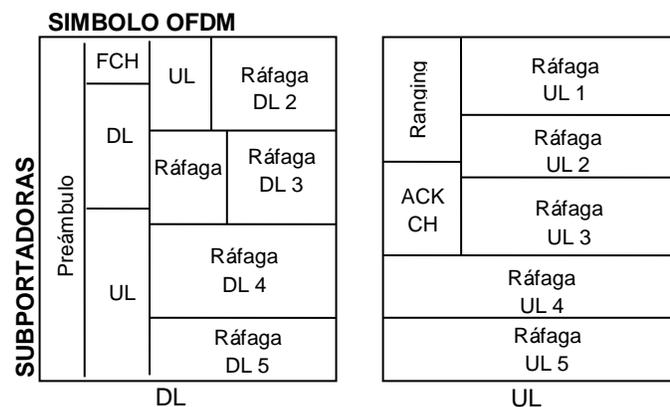


Figura 1.8. Símbolos UL y DL en un sistema WiMAX TDD

³³ Cada 144 bits

³⁴ CC; Código convolucional y RS; Reed Solomon

1.3.2 MAC [4][24][25]. El MAC de WiMAX, provee inteligencia para la PHY y asegura un número de medidas de QoS, no vistas en otros estándares inalámbricos. Su mejor característica es el ofrecimiento de asignación de ancho de banda dinámico, que evita la degradación usual en servicios inalámbricos: *Jitter* y Latencia [20].

El protocolo MAC de WiMAX, fue diseñado para aplicaciones de acceso inalámbrico banda ancha punto a multipunto. La tarea principal de la capa MAC es proveer una interfaz entre capas de transporte superiores y la capa física [20]. La capa MAC, toma paquetes de capas altas llamados MSDUs y los organiza dentro de MPDUs, para transmisión sobre el aire. Para recibir transmisiones, la capa MAC realiza el proceso inverso. El diseño del MAC 802.16-2004 e IEEE 802.16-2005 incluye una subcapa de convergencia que sirve de interfaz a una variedad de protocolos de capa alta, tales como ATM, voz TDM, Ethernet, IP, etc. WiMAX *Forum* ha decidido soportar sólo IP y Ethernet dada la importancia de éstas en la industria. Por otra parte, ofreciendo un mapeo a y desde las capas altas, la subcapa de convergencia soporta supresión de encabezado MSDU, para reducir el *overhead* de capa alta en cada paquete [24].

Tabla 1.7. Flujo de servicios soportados por WiMAX

Designación de flujo de servicio	Parámetros de definición de QoS	Ejemplos de aplicaciones o servicios
UGS Servicios de sesión no solicitados	Velocidad sostenida máxima Tolerancia de latencia máxima Tolerancia a <i>jitter</i>	VoIP sin supresión de silencio
rtPS Servicio de elección en tiempo real	Velocidad reservada máxima Velocidad sostenida máxima Tolerancia de latencia máxima Prioridad de tráfico	Audio y video <i>streaming</i> , MPEG codificado
nrtPS Servicio de elección sin tiempo real	Velocidad reservada mínima Velocidad sostenida máxima Prioridad de tráfico	FTP
BE Servicio <i>Best-Effort</i>	Velocidad sostenida máxima Prioridad de tráfico	Transferencia de datos, navegación web.
ErtPS Servicio de elección en tiempo real extendido	Velocidad reservada máxima Velocidad sostenida máxima Tolerancia de latencia máxima Prioridad de tráfico Tolerancia a <i>jitter</i>	VoIP con supresión de silencio

La capa MAC, usa una MPDU de longitud variable y ofrece mucha flexibilidad para permitir una eficiente transmisión. Por ejemplo, múltiples MPDUs de una misma o diferente longitud, pueden agregarse dentro de una única ráfaga, para minimizar el *overhead* PHY. De igual manera, múltiples MSDUs provenientes del mismo servicio de capa alta, pueden ser concatenados dentro de una única MPDU, para minimizar el *overhead* del encabezado MAC. En el caso contrario, grandes MSDUs pueden ser fragmentados dentro de pequeñas MPDUs y enviados a través de múltiples tramas [26].

La capa MAC en la estación base, es completamente responsable de la asignación de anchos de banda a todos los usuarios, tanto en UL como en DL [20]. En el único caso en el que un transceptor tiene algún control sobre la asignación de ancho de banda, es

cuando cuenta con múltiples sesiones o conexiones con la BS. Soporta además mecanismos dinámicos de solicitud y asignación de anchos de banda que dependen de parámetros de tráfico y QoS asociados al servicio, de forma dedicada o compartida; este procedimiento es llamado *polling* y puede ocurrir de forma individual o grupal. También provee QoS, que constituye la parte fundamental del diseño de la capa MAC WiMAX; este control se alcanza mediante el uso de una arquitectura orientada a la conexión y establece elementos tales como identificadores, flujos de servicio y clases de servicio. En la tabla 1.7 se especifican los flujos de servicios soportados por WiMAX para QoS [24]. Asimismo habilita servicios *broadcast* y *multicast*. Define características de ahorro de potencia y habilita movilidad. Contiene funciones de seguridad avanzadas. Las subcapas que definen su arquitectura interna están expuestas en la tabla 1.8.

Tabla 1.8 Subcapas MAC de WiMAX

Nombre de la subcapa	Funciones
CS o Convergencia de Servicio Específico	<ul style="list-style-type: none"> • Recepción de PDUs de capas altas. El estándar da especificaciones para dos tipos de capas altas: ATM y Paquetizado. • Clasificación y mapeo de MSDUs en dentro de CIDs apropiados. Esta es la función básica de QoS. • Procesamiento de PDUs de capas altas en la clasificación. • PHS, que permite la supresión de partes repetitivas de encabezados de información en el emisor y restauración de estos en el receptor.
MAC CPS o Parte Común	<ul style="list-style-type: none"> • Asignación de ancho de banda. • Establecimiento de la conexión • Mantenimiento de la conexión entre ambos extremos. • Acceso al sistema • Asignación de ancho de banda bajo demanda • <i>Scheduling</i>
Seguridad	<ul style="list-style-type: none"> • Autenticación • Intercambio de claves • Encriptación • Garantía de integridad en la información.

1.4 ARQUITECTURA DE RED [1][7][8][9].

WiMAX define una arquitectura de red *end-to-end, all-IP*. El *core* de la red está basado en enrutadores y conmutadores IP que son escalables, fáciles de instalar y operar. Las características básicas de la arquitectura son [8]:

- Separación de la arquitectura de acceso a partir del servicio de conectividad IP
- Organización en topologías punto a punto, punto a multipunto y malla
- Soporte para usuarios fijos, nómadas y móviles
- Soporte para *roaming* global e interoperabilidad con otros sistemas inalámbricos 3G
- Flexibilidad para adecuarse a un amplio rango de opciones de implementación, como por ejemplo:
 - Redes WiMAX de pequeña a grande escala.

- Ambientes de radiopropagación urbano, suburbano y rural.
- Bandas de frecuencia con y sin licencia.
- Distintos tipos de topologías: jerárquico, plano, malla.

Cada una de estas características básicas se muestran en la figura 1.9. La separación de la arquitectura de accesos a partir del servicio de conectividad IP, se realiza mediante la delimitación de la red de servicio de acceso ASN, a partir de la red de servicio de conectividad CSN. ASN provee una adición de entidades funcionales para los servicios de acceso y provee interoperabilidad funcional con diferentes clases de terminales WiMAX, tales como laptops y teléfonos. El CSN provee un conjunto de funciones de red, que ayudan a lograr conectividad IP y ofrecimiento de servicios a suscriptores WiMAX. Un CSN puede consistir de servidores AAA, agentes móviles IP o MIP, servidores de subsistema multimedia IP o IMS, bases de datos de usuario o MIB y dispositivos *gateway* de interoperabilidad. IMS usa el estándar IP, el cual permite proveer servicios ya existentes y futuros.

Cada una de las topologías incluye:

- Uso compartido de ASN de un proveedor de acceso de red NAP entre múltiples proveedores de servicios de red NSP y viceversa
- El NAP consiste en uno o más ASN
- La implementación más básica de ASN único junto con un número pequeño de funciones CSN pueden proveer acceso a internet básico sin *roaming*
- Diferentes topologías ASN incluyendo punto a multipunto o distribuida³⁵ para flexibilidad en la ampliación de la red

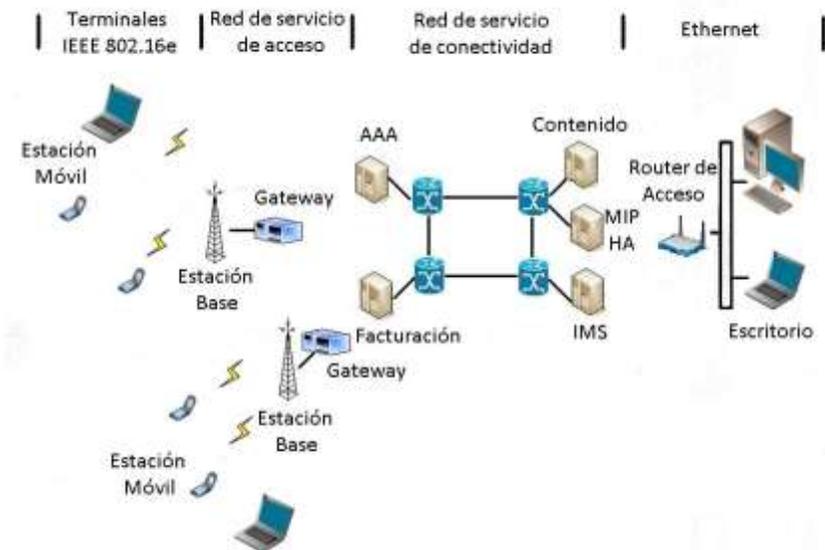


Figura 1.9. Arquitectura de red WiMAX basada en IP

³⁵ Interconexiones multisalto

La figura 1.9 muestra estaciones base teniendo su *gateway* separada o ambas compartiendo una misma *gateway*, dependiendo de la localización y la carga de tráfico. El soporte de usuarios fijos, nómadas y móviles implica que la arquitectura soporta movilidad y *handoff*. La figura 1.9 muestra además, como una MS puede moverse de una celda a otra y el *handoff* entre estaciones. El MIB del core, incluye elementos tales como agentes de hogar HA, que permiten *handoff* continuo de servicios. La arquitectura WiMAX también soporta configuraciones de dirección de hogar estático y dinámico, asignación dinámica de HA, para optimizar el enrutamiento y el balanceo de carga. Soporte de *roaming* global e interoperabilidad con otros sistemas inalámbricos 3G, significa que la arquitectura permite y soporta *roaming* entre diversas NSP y *handoff* entre tecnologías.

1.4.1 Modelo de referencia red NMR

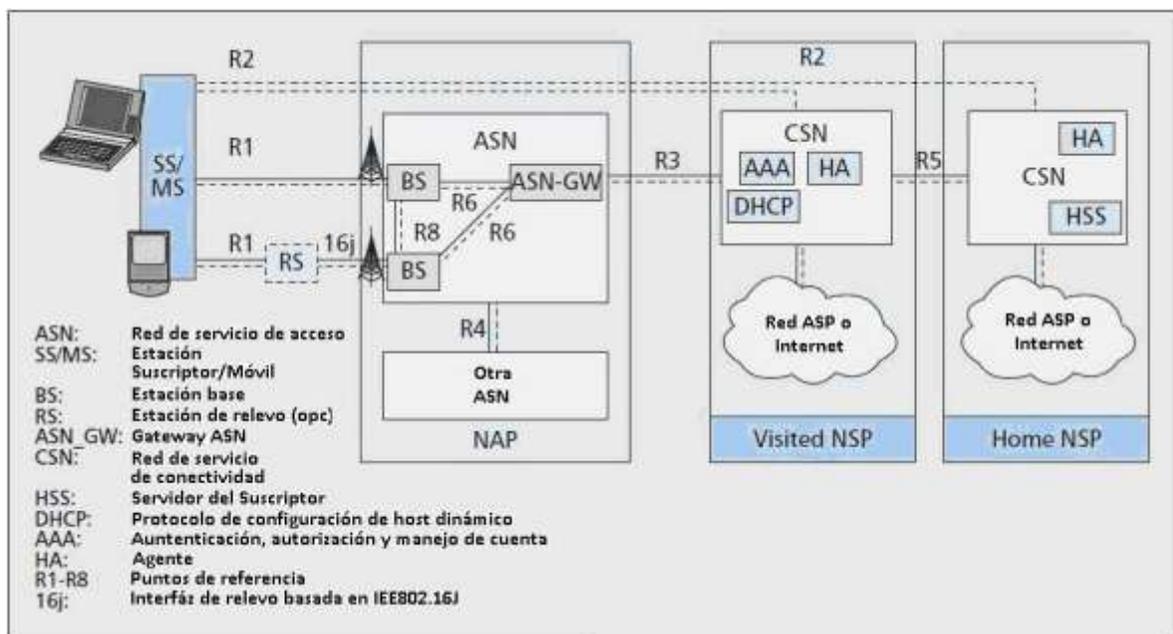


Figura 1.10. Modelo de referencia de red WiMAX

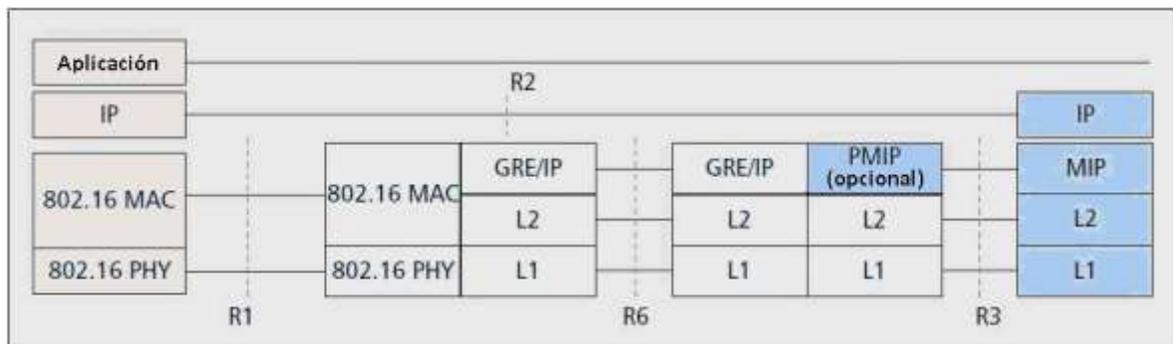


Figura 1.11. Estructura de protocolo simple basada en IP usada por la red WiMAX

El fundamento de la arquitectura de red WiMAX, puede representarse lógicamente por un modelo de referencia de red NMR, el cual identifica las entidades funcionales claves y puntos de referencia, sobre los cuales las especificaciones de interoperabilidad de la red están definidas. El NMR WiMAX, diferencia entre el proveedor de acceso de red NAP y el proveedor de servicios de red NSP. NAP, es una entidad de negocios que provee la infraestructura de acceso WiMAX, mientras que el NSP, es la entidad de negocios que provee conectividad IP y servicios WiMAX a suscriptores, de acuerdo a algunos SLA negociados con uno o más NAP. La arquitectura de red, permite a una NSP tener una relación con múltiples NAP, en una o diferentes ubicaciones geográficas. Esto también habilita el uso compartido de NAP, por parte de múltiples NSP. En algunos casos la NSP puede ser la misma NAP. El NMR WiMAX, como se ilustra en la figura 1.10, se compone de varias entidades de red lógicas: MS, ASN, CSN y sus interacciones a través de los puntos de referencia R1 a R8³⁶. Cada MS, ASN y CSN, representan una agrupación lógica de funciones que se describen a continuación:

MS es el equipo de usuario generalizado; provee conectividad inalámbrica entre una única o múltiples host y la red WiMAX. En este contexto, el término MS es generalmente usado para referenciar a terminales fijos y móviles.

ASN o Red de servicio de acceso, representa un grupo muy completo de funciones de red, necesarias para proveer acceso radio a la MS. Estas funciones incluyen conectividad de la capa dos con el MS de acuerdo a los estándares IEEE 802.16 y el perfil de sistema WiMAX, transferencia de mensajes de autenticación, autorización y gestión de cuentas AAA a la H-NSP³⁷, selección y descubrimiento de la NSP preferida, traspaso de la funcionalidad para establecimiento de conectividad en la capa tres con MS³⁸ y gestión del recurso radio. Para establecer movilidad, ASN soporta movilidad anclada ASN y CSN, gestión de ubicación, buscapersonas y tunelamiento entre ASN y CSN [22].

CSN o red de servicio de conectividad, es un conjunto de funciones de red que proveen servicios de conectividad IP a suscriptores WiMAX. CSN comprende un amplio conjunto de elementos de red tales como enrutadores, servidores proxy AAA, agentes de hogar, bases de datos de usuario, *gateway* de interoperabilidad y servidores de red potentes, para soportar servicios *multicast*, *broadcast* y basados en ubicación. CSN puede ser implementado como parte de un escenario WiMAX NSP. Las siguientes son algunas de las funciones claves de CSN:

- Gestión de direccionamiento IP
- Servidor o proxy AAA
- Políticas de QoS y control de admisión basado en perfiles de suscripción de usuario
- Soporte de tunelamiento ASN-CSN
- Tarificación de suscriptor y solución interoperador
- Tunelamiento entre CSN para *roaming*
- Movilidad entre ASN con CSN anclado

³⁶ De la figura 1.10

³⁷ central NSP

³⁸ Por ejemplo asignación de dirección IP

- Conectividad a Internet y servicios WiMAX gestionados, tales como IMS, servicios basados en ubicación, servicios *peer-to-peer* y servicios *multicast* y *broadcast*
- Activación sobre el aire y ofrecimiento de dispositivos WiMAX.

La red soporta dos niveles de arquitectura de movilidad. La movilidad ASN anclada, ocurre en todos los *handover* BS, independientemente de los cambios de agentes externos móviles IP, prefijos o subredes IP. Este *handover* es completamente transparente al *core* de la red, donde las funciones ASN gestionan los cambios de ruta de datos dentro o entre ASN para mantener rutas de portadoras UL y DL para el MS. El *handover* CSN anclado, es activado cuando hay agentes externos ó cambios de prefijo o subred IP. Este procedimiento de *handover* está basado en cliente o proxy móvil IP para IPv4 o IPv6 [2].

El ASN puede ser implementado como un ASN integrado, donde todas las funciones son colocadas en la misma entidad lógica, o ésta puede tener una configuración dividida, en la cual las funciones ASN son mapeadas selectivamente dentro de dos nodos separados, una BS y una *gateway* ASN o ASN-GW, como se muestra en las figuras 1.10 y 1.11. Un ASN dividido, puede consistir de uno o más BS y al menos una instancia a una ASN-GW. Las BS y las funciones ASN-GW son descritas a continuación [7]:

BS: Entidad de red lógica, que consiste de funciones relacionadas a RF en una interfaz ASN con una conexión sobre el aire, de acuerdo a las especificaciones MAC y PHY de los estándares IEEE 802.16, cuyos parámetros son definidos dentro del perfil del sistema. En esta definición, cada estación base es asociada con un sector que cuenta con una frecuencia asignada, pero puede incorporar funciones específicas de implementación adicionales, tales como programación UL y DL.

ASN-GW: La *gateway* ASN, es una entidad lógica que representa un acuerdo de funciones centralizadas relacionadas a QoS, seguridad y gestión de movilidad para todas las conexiones de datos, servidas por su asociación con BS a través de R6³⁹. La ASN-GW, también soporta funciones relacionadas con interacciones de la capa IP, con el CSN a través de R3⁴⁰, tanto como interacciones con otras ASN a través de R4 en soporte de movilidad.

Comúnmente múltiples BS pueden asociarse de forma lógica a una ASN. También una BS, puede conectarse lógicamente a una ASN-GW para permitir balance de carga y opciones de redundancia. La especificación de red WiMAX, define una división única de perfil ASN, denominada ASN C, con una interfaz abierta R6, tanto como una alternativa ASN B, que puede ser implementada como una ASN integrada o dividida, en la cual R6 es propietaria o no expuesta. Las definiciones de normatividad relacionadas, a los puntos de referencia dentro de una ASN, son solo aplicables al perfil C.

1.5 CONVERGENCIA FIJA MÓVIL o FMC

1.5.1 Definición y conceptos fundamentales [27]. El grupo Ad-Hoc FMC de ETSI define convergencia fija móvil como:

³⁹ Ver Figura 1.10 y 1.11

⁴⁰ Ver Figura 1.10 y 1.11

“Convergencia fija móvil FMC se refiere a la provisión de red y capacidades de servicio, las cuales son independientes de la técnica de acceso. Esto no necesariamente implica la convergencia física de redes. Se refiere al desarrollo de capacidades de red convergentes y soporte de estándares. Este grupo de estándares puede ser usado para ofrecer un conjunto de servicios coherentes mediante accesos fijos o móviles a redes públicas o privadas, fijas o móviles” [28].

El objetivo de convergencia inalámbrica, es diseñar un trayecto comunicación transparente a través de redes inalámbricas heterogéneas, sin importar la tecnología de acceso radio usada.

La convergencia fija móvil implica los siguientes aspectos fundamentales [29]:

- Se asume un ambiente de red multitecnológica, operaciones multiservicios, proveedores de servicios múltiples e interacción de las capas física⁴¹, enlace y red⁴².
- El uso de un único terminal móvil, a través de diferentes redes e interfaces de acceso radio, idealmente sin límites en el área cubierta, movilidad y condiciones radio, mientras mantiene un nivel aceptable de seguridad y QoS.
- La convergencia requiere la adopción de protocolo IP, como único protocolo de red para soportar un extenso rango de servicios de comunicaciones de voz, datos y video.
- Mecanismos de interoperabilidad entre redes inalámbricas fijas y móviles que usan interfaces de accesos diferentes. Estos mecanismos incluyen la asignación de usuario inicial IUA, basando en una selección de red óptima⁴³ y un *handover* transparente entre sistemas ISH.
- Convergencia en el nivel de servicios de usuario, incluyendo grupos de redes inalámbricas WAN, PAN, LAN, MAN y NFC con acceso a Internet, con paquetes de precios consolidados dentro de una sola cuenta si es necesario.
- Criterios de desempeño y parámetros de nivel de sistema bien definidos, que efectúen el proceso de *handover* entre redes inalámbricas heterogéneas o *handover* dentro de redes que usan la misma tecnología y protocolos.
- Uso de soluciones estándar reconocidas internacionalmente para convergencia. Igualmente serían incluidos criterios considerando espectro usado, métodos de acceso radio y otras especificaciones técnicas relevantes.

Los principales temas asociados con la convergencia de redes inalámbricas son [30]:

- Estandarización de criterios de desempeño de *handover* y mecanismos de interoperabilidad.
- Calidad de servicio garantizada *end-to-end*.
- Latencia *end-to-end* para reducir los efectos de cabeceras redundantes.
- *Buffering* y enrutamiento.

⁴¹ Diferentes accesos radio

⁴² Diferentes protocolos

⁴³ Criterios bien definidos

- Descarte y retransmisión de paquetes.
- Uso de espectro de transmisión no licenciado.
- Necesidad de soporte extenso, redes complejas e infraestructuras de aplicación.

1.5.2 Convergencia inalámbrica de alto nivel [29]. Convergencia inalámbrica es un concepto multidimensional que combina infraestructuras IT, redes, aplicaciones, interfaces de usuario y gestión, encaminados a soportar voz, datos y multimedia en redes inalámbricas basadas en IP. Una representación general de construcción FMC se presenta en la figura 1.12 [30]. En la base de la pirámide de convergencia, están los componentes de red físicos de las redes fijas y móviles. El siguiente nivel consiste en las mismas redes, como colecciones de componentes, con diseños topológicos bien definidos y dominios de cobertura, tales como WLAN, WPAN, WMAN y WWAN móvil basado en celdas. El siguiente nivel está representado por las aplicaciones que proveen soporte para una variedad de servicios, tales como voz, datos y multimedia. El acceso a todos estos sistemas requiere interfaces de usuario, donde la pieza central de FMC es el teléfono móvil. La convergencia total de redes y servicios está orientada a proveer QoS de acuerdo con los SLA.



Figura 1.12. Estructura de convergencia de alto nivel

Algunas características adicionales de convergencia de alto nivel son:

- Una infraestructura inalámbrica malla que permita ofrecer comunicaciones de voz, datos y video.
- Capacidad de banda ancha incrementada a usuarios.
- Amplia variedad de aplicaciones multimedia y servicios.
- Gestión o inteligencia distribuida.
- Fácil instalación, ofrecimiento, operación y mantenimiento.
- Capacidad de configuración de servicio de usuario final.

1.5.3 Controladores de convergencia fija móvil [30][31]. Las comunicaciones inalámbricas convergentes, proveen métodos críticos para transmitir voz, datos y aplicaciones multimedia, usando IP a través de redes inalámbricas heterogéneas. La necesidad de esta convergencia, es manejada por aplicaciones que requieren el más

grande ancho de banda disponible al menor costo posible. Se espera QoS para ser comparable con el servicio ofrecido por las redes convencionales de telecomunicaciones cableadas de voz. Esto requiere que los servicios convergentes sean ofrecidos de forma transparente, a través de la red WiMAX convergente, sin importar la ubicación del usuario o la red usada. Las aplicaciones FMC de alto nivel más comunes son:

- Comunicaciones de voz.
- Comunicaciones de VoIP.
- Buzón de voz.
- Buzón de mensajes unificado.
- Contestador automático interactivo.
- Voz y datos sobre redes WLAN y UMTS convergente.
- Acceso a internet estándar y aplicaciones.
- Aplicaciones multimedia.

Adicionalmente, WiMAX fija podría originar aplicaciones y/o servicios específicos en su red, permitiendo ser beneficiado si se extienden a través de una red WiMAX móvil, ofreciendo soporte a servicios adicionales a unidades pequeñas, medianas o grandes y a empresas pequeñas o medianas, tales como [31]:

- Interconexiones de edificios y campus.
- Conexión entre diversas LAN.
- Accesos banda ancha para comunicaciones multimedia.
- Canal *backhaul* para redes móviles y comunicaciones cableadas.
- Canal de reserva usando WiMAX como canal *backhaul*.
- WMAN.

1.5.4 Requerimientos funcionales de convergencia [29][32]. Los siguientes son los requerimientos funcionales de alto nivel de redes y servicios fijos móviles convergentes:

- Soporte para comunicaciones móviles a través de redes inalámbricas heterogéneas.
- Soporte para aplicaciones multimedia: voz, datos y video en aplicaciones de arreglo extenso.
- Soporte total para ubicación, movilidad y servicio transparente.
- Separación de funciones de transporte, control, señalización y gestión.
- Capacidades de gestión de servicios y red incluyendo gestión de red de usuario.
- *Handoff* suave vertical⁴⁴ y horizontal⁴⁵.
- Seguridad en comunicaciones inalámbricas y operaciones de gestión de seguridad.
- Soporte para QoS *end-to-end* y SLA asociados.
- Interoperabilidad y transparencia a través de múltiples proveedores de servicio.

1.5.5 Servicios de *handover* independientes del medio [29] [30]. El mecanismo de *handover*, es una función básica de WiMAX móvil que provee movilidad al usuario, el

⁴⁴ A través de diferentes redes

⁴⁵ En la misma red

handover ocurre cuando usuarios se mueven o cambian de sitio, por lo tanto, *handover* transparente independiente del medio, es el requerimiento clave para la red convergente inalámbrica fija móvil. Hay algunos *handover* que ocurren dentro de redes de proveedor único o entre diferentes proveedores de servicio, este tipo de *handover* es denominado horizontal. Otros *handovers* similares toman lugar dentro de las redes en malla. *Handover* vertical o independiente del medio es un servicio ofrecido entre redes heterogéneas tales como redes fijas y redes móviles celulares. Una arquitectura de alto nivel de MIH se muestra en la figura 1.13.

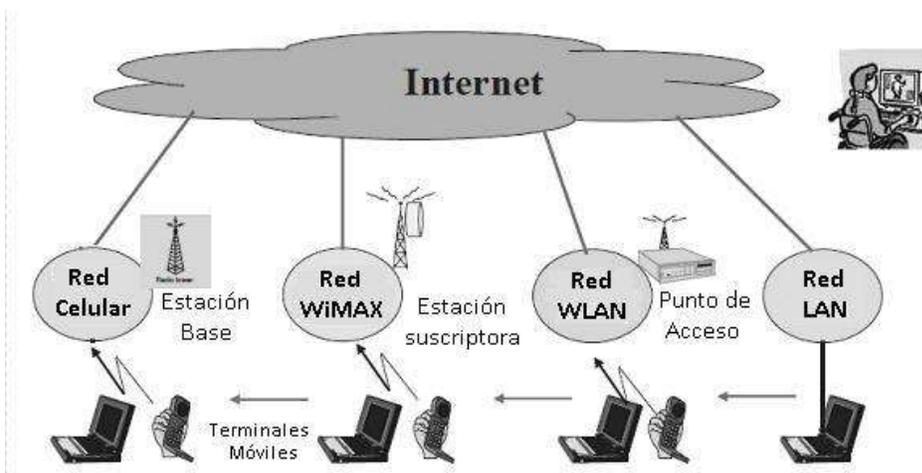


Figura 1.13. *Handover* independiente del medio

Los servicios MIH, proveen *handover* continuo a terminales móviles que son inicialmente añadidos a redes LAN. Basado en algoritmos y procedimientos, el enlace a Internet será mantenido sin importar la ubicación ni el tipo de red WiMAX soportado. Por último, cuando el terminal móvil está fuera del rango de cualquier red inalámbrica móvil, la conexión será continuada a través de la red WiMAX fija. Una arquitectura de protocolo de alto nivel que soporta MIH se presenta en la figura 1.14 [28].

Las funciones de *handover*, son realizadas por la capa 2 y 3 de la pila de protocolos MIH y son independientes del hardware de la red y de los protocolos usados; pueden usarse procedimientos inteligentes y mensajes de *handover*. Las capas superiores de la pila negocian con la gestión de movilidad y *handover* de acuerdo a políticas internas. Las subcapas usan servicios y protocolos estandarizados que se basan en especificaciones IETF⁴⁶.

Los más importantes requerimientos para servicios MIH generalizados incluyen [32]:

- *Roaming* transparente a través de redes.
- Asignación de red inicial y *handover* sucesivos basados tanto en desempeño como costo en general.
- Permite múltiples tecnologías, vendedores y usuarios.
- Soporte para aplicaciones de voz, datos, video y multimedia.

⁴⁶ Internet Engineering Task Force o Grupo de Trabajo de Ingeniería de Internet

- Garantía de un QoS adecuado, mientras existe *roaming* a través de varios tipos de red.
- Capacidad de manejar el MIH usando protocolos estándar SNMP.
- Operaciones de *handover* de baja potencia en múltiples redes.
- Mantenimiento de características de seguridad ofrecidas por otras redes inalámbricas estándar.

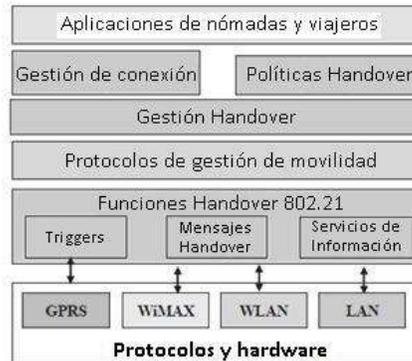


Figura 1.14. Arquitectura del protocolo de *handover* vertical

MIH supone tres operaciones distintas relacionadas a *handover*:

- **Iniciación:** Cuando el descubrimiento, la selección y la negociación tienen lugar.
- **Preparación:** Cuando una nueva conexión es instalada y conexiones en la capa 2 y 3 son ofrecidas.
- **Ejecución:** Cuando la conexión es transferida y los paquetes son recibidos.

1.5.6 Soluciones de red convergente fija móvil [28][30][32]. La convergencia entre sistemas WiMAX fijas y WiMAX móviles, requiere integración en todos los niveles desde el segmento acceso hasta la red *core*. Dentro de esos aspectos de integración se destacan:

- Integración de infraestructuras de red *core*, transparente para todos los usuarios.
- Integración a nivel de accesos mediante el desarrollo de un *handover* transparente entre las redes. Originalmente, las soluciones de convergencia en este aspecto fueron conocidas como especificaciones de arquitectura de Accesos móviles no licenciados UMA actualmente conocidos como GAN⁴⁷.
- Integración en todos los niveles para promover una red totalmente IP desde accesos hasta el *core* de la red. Esto significa que tanto datos como voz serán transportados sobre una red común IP. Las Soluciones de convergencia en este escenario, son generalmente conocidas como arquitectura e interfaces IMS y generadas por el 3GPP⁴⁸ en su especificación *release 6*.

1.5.7 Actores FMC [33]. El ecosistema FMC WiMAX consiste de los siguientes participantes, cada uno buscando obtener valor agregado:

⁴⁷ Luego, ya adoptado por el 3GPP en abril de 2005, el nombre UMA se cambió por GAN.

⁴⁸ **Third-Generation Partnership Project o Proyecto asociado de tercera generación**

- Operadores de acceso y *core* de la red.
- Operadores de *backbone* de red.
- Desarrolladores de *backbone* de red.
- Proveedores de contenido que pueden producir contenido aplicable a dispositivos FMC.
- Operadores de servicio que ofrecen servicios de valor agregado a usuarios finales.
- Desarrolladores de software ofreciendo software para conmutación eficiente entre múltiples tecnologías radio, sistemas para operación de terminales y comercializadores de software.
- Comercializadores de red.
- Autoridades de competencia y regulación de orden nacional.

1.6 INFRAESTRUCTURA DE RED WiMAX

1.6.1 Equipos de usuario [2][33] Existe una gran variedad de productos para los cuales la red coexistente WiMAX fija móvil debe soportar, se presenta una clasificación de tipos de equipo de acuerdo al tiempo de lanzamiento:

Primera generación: Productos CPE. Los primeros en lanzarse al mercado fueron *outdoor*, y después CPE's *indoor*. En algunos casos los fabricantes exigen que sea personal autorizado el que realice la instalación de estos equipos, en otros⁴⁹ el usuario recibe el CPE y lo instala.

Segunda generación: Dispositivos instalados en portátiles. Los modelos de equipo de usuario varían de acuerdo al puerto donde se desee instalar, como es el caso de dispositivos USB, PCMCIA, PCI, o cualquier otro tipo de conector existente. En este caso el suscriptor puede moverse en un área limitada pero con la posibilidad de ser nómada. Por último se espera la aparición de equipos con preinstalación WiMAX, de la misma forma que hoy en día lo es con WiFi. INTEL tiene en el mercado procesadores con WiFi y WiMAX embebido.

Tercera generación: Dispositivos PDA y dispositivos móviles.

1.6.2 Topologías [34][35][36]. Teniendo en cuenta que las tres alternativas más reconocidas para el diseño de redes son:

- Topología Punto a Punto (PtP)
- Topología Punto a Multipunto (PtM)
- Topología en Malla (*Mesh*)

De éstas, WiMAX en sus versiones fija y móvil siempre se ha asociado a la topología Punto a Multipunto o PtM. Las redes multipunto pueden ser vistas como la combinación de un concentrador y varios repetidores. Estas redes usan una Estación Base como concentrador y las unidades suscriptoras como los puntos de conexión, en el otro extremo

⁴⁹ Principalmente *indoor*.

de los repetidores conectados a la Estación Base. Una red multipunto, puede cumplir con los requerimientos de acceso banda ancha a más usuarios que los que pueden ofrecer soluciones con topología punto a punto o PtP.

En una forma más simple, una Estación Base y un suscriptor serían literalmente una red PtP, aunque no tan costosas teniendo en cuenta su efectividad. Las capacidades de banda ancha son compartidas entre todos los miembros suscriptores conectados a la estación base. Esta topología PtM en WiMAX, puede ser implementada simultáneamente junto con los otros dos tipos de topologías de acuerdo a las características y necesidades de la zona de implementación.

Las combinaciones de topologías más frecuentemente usadas en WiMAX son:

- Acceso PtM WiMAX más *backhaul* PtP o Daisy Chained.
- Acceso PtM WiMAX más *backhaul* malla PtP.

La diferencia entre la topología simple PtP y la *Daisy Chained* es que ésta última reduce el desempeño de la disponibilidad de la ruta de acceso, amplía el retardo e incrementa el retardo variable como se muestra en las figuras 1.15 y 1.16, sin embargo, permite que el alcance del Punto de Presencia o PoP, sea considerablemente extendido.

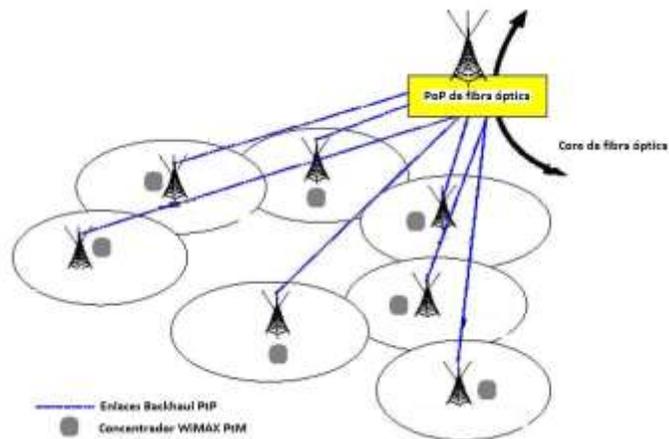


Figura 1.15. Topología *backhaul* Punto a Punto

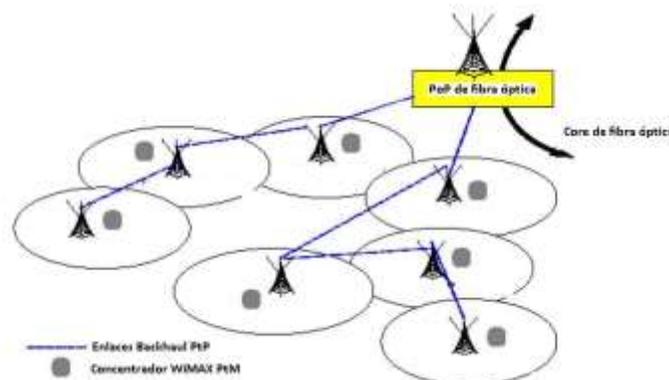


Figura 1.16. Topología *backhaul* Daisy Chained

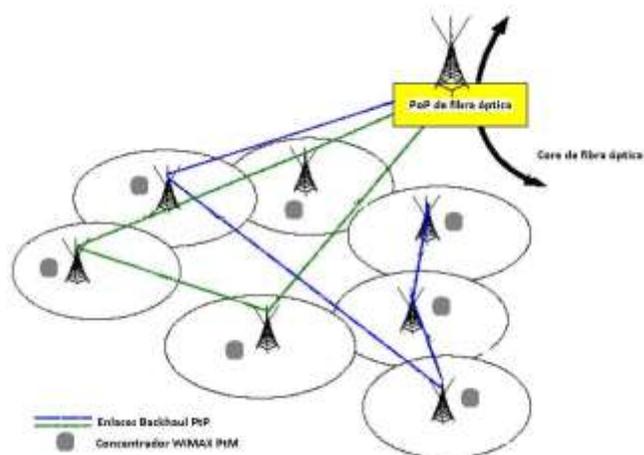


Figura 1.17. Topología *backhaul* en malla

En la segunda topología, se usa una malla Ethernet como se ve en la figura 1.17. La principal ventaja de esta topología es su alta disponibilidad de la ruta de acceso, debido a la inherente diversidad angular y diversidad de espacio dentro de la capa *backhaul* en malla. La configuración *backhaul* en malla a menudo provoca una reducción en la longitud del trayecto promedio a diferencia de una simple topología PtP. Una topología en malla ofrece una combinación de capacidades PtP y PtM debido a que cada nodo suscriptor se puede comunicar directamente con otros nodos. Esto descarta el uso del elemento Estación Base en la red, aunque uno o más de los nodos, son utilizados como rampa para conectar la malla con Internet. La implementación exitosa de una topología en malla, se ha llevado a cabo cuando una única entidad tiene acceso a los nodos, esto es, un solo operador en una red municipal. En caso contrario, estudios indican que ésta topología puede generar grandes retardos en la señal, debido a los múltiples saltos que se deben realizar antes de llegar al nodo que sirve como salida a Internet, por tanto no supone un uso confiable de aplicaciones *streaming* audio y video por sus altos requerimientos. La implementación de una u otra topología, depende de las características de la zona en la que se planea el desarrollo de una solución banda ancha.

Es importante resaltar que en este primer capítulo, aparte de mostrar una visión general de la tecnología WiMAX, al presentar sus características técnicas, se puede también encontrar un aspecto de vital importancia, para el posterior desarrollo del trabajo de grado, donde se busca diseñar un trayecto de comunicación transparente a través de redes inalámbricas heterogéneas, en nuestro caso WiMAX fija y WiMAX móvil, permitiendo con esto fundamentar los parámetros necesarios para la coexistencia de dichas redes, objetivo principal de este documento.

2. WiMAX EN COLOMBIA

A continuación se muestra el estado actual de la tecnología WiMAX en Colombia en aspectos legales, políticos, económicos y técnicos. En los aspectos legales se estudia el marco regulatorio aplicable a los despliegues WiMAX; en este marco se enumeran y clasifican las disposiciones que reglamentan el uso del espectro, los canales, potencias, zonas de cobertura, servicios, aplicaciones, etc. A su vez, el gobierno nacional estableció algunas políticas inherentes al desarrollo de la banda ancha en Colombia que son mencionadas en éste capítulo debido a que tienen estrecha relación con el objeto de estudio. Se muestran los procesos de adjudicación de las bandas usables por WiMAX en el territorio nacional y se listan los adjudicatarios que actualmente poseen licencias de operación. Se determinan cuáles son los operadores que actualmente poseen despliegues WiMAX en la banda de 3.5 GHz. Seguidamente se presenta un estudio real de las implementaciones en Colombia en aspectos técnicos, que incluyen topografías, equipos, cobertura, emplazamientos, participación en el mercado, aplicaciones y servicios. Este capítulo, en conjunto con el primero, complementa una base conceptual sólida que sustenta un desarrollo coherente y responsable de soluciones de coexistencia fija móvil en WiMAX, adaptadas al territorio nacional.

2.1 MARCO LEGAL

La República de Colombia ha establecido leyes y normas para el despliegue, uso, aplicación y usufructo de sistemas de telecomunicaciones. Las implementaciones WiMAX dentro del territorio nacional, están reglamentadas bajo un coherente grupo de normas reglamentarias. Las más generales son mostradas en la tabla 2.1, mientras que la figura 2.1 muestra el proceso del marco legal WiMAX en el país, la normativa que posee mayor relación y relevancia es expuesta más adelante:

Tabla 2.1. Marco legal de WiMAX en Colombia

Nombre ⁵⁰	Año	Organismo	Propósito
Ley 1900	1990	Gobierno Nacional	Define <i>servicio de valor agregado</i> como el servicio de intercambio de información mediante el uso de accesos banda ancha [37].
Res. 087	1997	MINTIC ⁵¹	Establece el régimen de libertad de tarifas [38].
Res. 1833	1998	MINTIC	Autoriza y reglamenta el uso de la banda de 38 GHz para comunicaciones punto a multipunto [39].
Dec. 1418	1998	MINTIC	Permite operación en la banda de 28GHz usando tecnología LMDS, múltiples servicios y topología punto a multipunto [42].
Dec. 1130	1999	Gobierno Nacional	Asigna a la Comisión de regulación de comunicaciones ó CRC la función de regulación de telecomunicaciones [40].
Res. 689	2004	MINTIC	Atribución de bandas de frecuencias para libre utilización en el territorio nacional, usando sistemas de acceso inalámbrico y redes inalámbricas de área local y tecnologías banda ancha de espectro ensanchado, modulación digital y baja potencia [41].
Dec. 2925	2005	Gobierno Nacional	Reglamenta la banda de 3.5 GHz [43].
Dec. 1928	2006	Gobierno Nacional	Establece excepciones adicionales al Decreto 1972 de 2003 ⁵² [44].

⁵⁰ Res de Resolución y Dec de Decreto

⁵¹ Ministerio de Tecnologías de la Información y Comunicaciones, antes MINTIC

⁵² O Régimen unificado de contraprestaciones

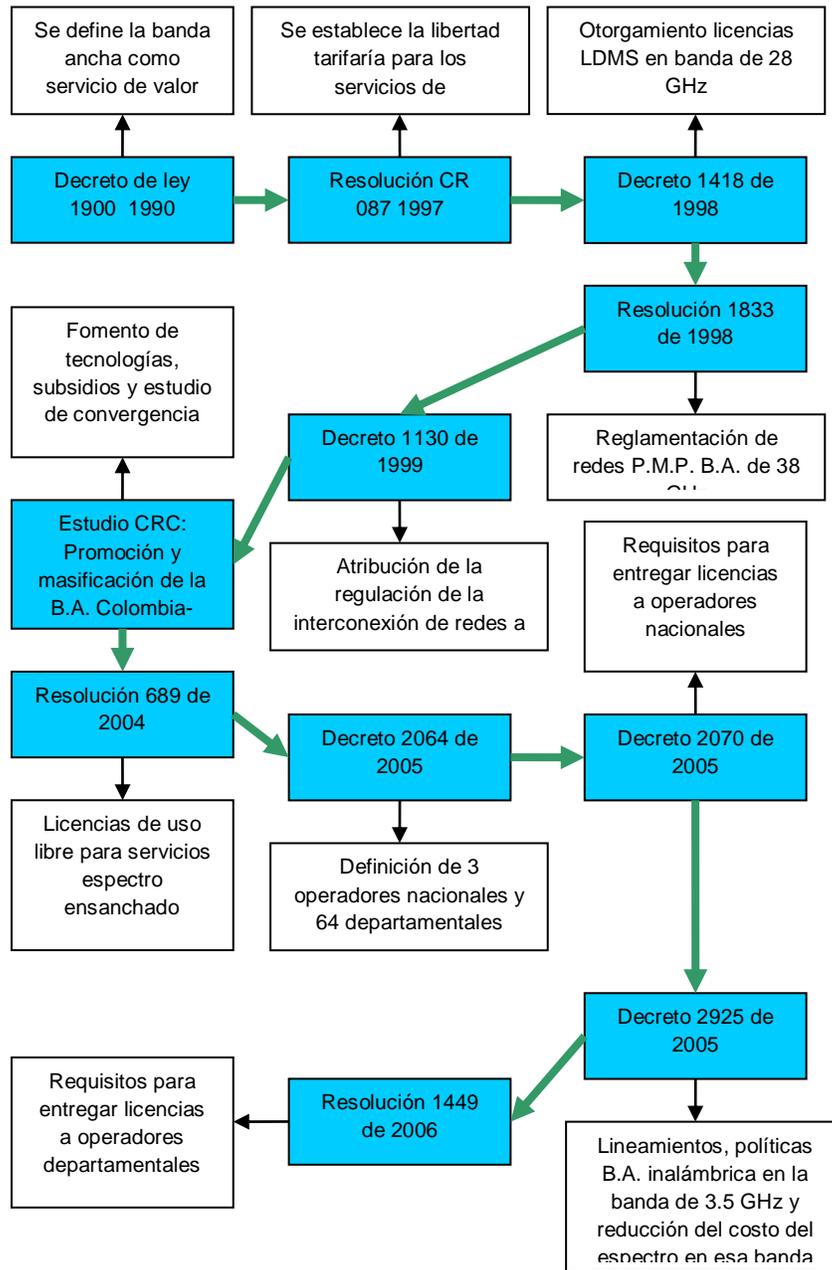


Figura 2.1. Marco legal de la tecnología WiMAX

2.1.1 Resolución 2064 de 2005 [45]. La resolución 2064, expedida por MINTIC, adopta recomendaciones de la UIT y tiene como objeto “*atribuir y planificar las bandas de frecuencias de espectro radioeléctrico, para la prestación de servicios de telecomunicaciones que utilicen sistemas de distribución punto a punto y punto a multipunto para acceso de banda ancha inalámbrica*”. La atribución se realiza para la banda de frecuencias de 3.5GHz, la cual va desde 3400 MHz hasta 3600 MHz. Según el artículo 4 de la presente resolución, la distribución es la siguiente:

Tabla 2.2. Distribución del espectro en la banda de 3.5 GHz

BANDA	RANGO MHz	BANDA	RANGO MHz
A	3400 – 3421	A'	3500 - 3521
D	3421 – 3435	D'	3521 – 3535
E	3435 – 3449	E'	3535 – 3549
B	3450 – 3471	B'	3550 – 3571
C	3471 – 3492	C'	3571 – 3592
F	3492 – 3500	F'	3592 – 3600

Define áreas de servicio en dos tipos: nacionales y departamentales. Asigna bandas para cada una de ellas, determina su proceso de asignación, modos y características de uso. La tabla 2.2 define las clasificaciones de las bandas con su rango correspondiente.

2.1.2 Resolución 2070 de 2005 [46]. La resolución 2070, expedida por el MINTIC, tiene como objeto *“Adoptar medidas tendientes a establecer el correcto y racional uso del espectro radioeléctrico, así como determinar la forma de otorgamiento de los permisos para el uso del espectro radioeléctrico, para la prestación de servicios de telecomunicaciones que utilicen sistemas de distribución punto a punto y punto multipunto para acceso de banda ancha inalámbrica, en la banda de 3400 MHz a 3600 MHz”*, para lo cual establece los requisitos y condiciones para el uso del medio, restringiendo la asignación a empresas debidamente licenciadas, y definiendo las condiciones para los operadores según sea el área de operación ya definida en la resolución 2064 de 2005.

2.1.3 Resolución 1449 de 2006 [47]. Es complemento y profundización de las Resoluciones 2064 y 2070, para operadores de servicio departamental en la banda de 3.5 GHz. Define la cantidad de permisos por departamento, asigna las bandas D y E ya definidas en las anteriores resoluciones. Establece el procedimiento y requisitos para la asignación de los permisos, montos mínimos de activos de los oferentes, la metodología de presentación y evaluación y algunas disposiciones finales.

2.2 POLÍTICAS

2.2.1 Documento CONPES 3371 de 2005 [48]. Son los lineamientos de política para la utilización eficiente del espectro en la banda de 3.5 GHz por parte de tecnologías banda ancha inalámbricas. Establece la búsqueda de un incremento de la penetración de servicios de comunicaciones, mediante la combinación de redes fijas con inalámbricas, la convergencia de redes no sólo hace referencia al hecho de prestar varios servicios a través de un solo canal, sino también al uso eficiente de las diferentes redes disponibles. Para esto, es necesario fomentar el uso eficiente del espectro radioeléctrico en la banda de 3.5 GHz, por parte de aquellos operadores que soporten sus servicios en redes fijas y que estén en capacidad de aprovechar eficientemente las economías de escala logradas con las mencionadas redes y las que se pueden conseguir a través de operaciones integradas. Los siguientes son lineamientos de política expuestos en CONPES 3371:

- “Fomentar la consolidación de un sector de comunicaciones competitivo a través de empresas integradas que cuenten con la capacidad suficiente para realizar inversiones de gran impacto y preservar su valor.”
- “Promover la eficiencia en el uso de recursos escasos propiciando la atribución de espectro, de tal manera que se maximice el potencial de uso de tecnologías de banda ancha por parte de la población y se logre una mayor apertura de los servicios de TPBC.”
- “Asegurar el acceso a los beneficios de las tecnologías de banda ancha por parte de todos los sectores de la población tanto rural como urbana.”
- “Promover el aprovechamiento de la capacidad instalada en el país.”

2.2.2 Promoción y masificación de la banda ancha en Colombia [49] [50] [51]. Es la propuesta del MINTIC para el desarrollo de la banda ancha en Colombia y hace énfasis en aspectos de gran importancia para el desarrollo del sector. Relacionado a WiMAX, el primer aspecto menciona: “fomento al uso de nuevas tecnologías, tanto alámbricas como inalámbricas y sus consideraciones normativas y regulatorias, como es el caso del estándar 802.16 y PLC entre otros”. El documento incluye la visión del gobierno colombiano al respecto, un panorama mundial del tema a la fecha de su elaboración y finaliza con algunas estrategias para el desarrollo de la banda ancha en Colombia. El documento solo define a WiMAX en su versión fija, y resalta la importancia de la implementación de la tecnología, como factor preponderante en el potencial de crecimiento de mercado. Dentro de las acciones a seguir se menciona el estudio de las condiciones regulatorias y de mercado para la tecnología WiMAX.

Este documento fue discutido por el sector y se expresaron algunas importantes preocupaciones en torno a esto:

COLOMBIA MOVIL S.A. E.S.P. recomienda que a las condiciones de otorgamiento del espectro para la explotación de WiMAX se les brinde un trato igual que a los servicios de PCS y/o TMC ó que sean los operadores que ya tienen concesión de operación de servicios móviles, los autorizados a implementar dicha tecnología. Le preocupa que un operador WiMAX haga uso de la tecnología para ofrecer movilidad de datos y voz a sus usuarios. Menciona que se debe respetar las condiciones de mercado y que el gobierno no debe promover el ingreso de la competencia al mercado móvil, sin sujetarse a las condiciones que le fueron otorgadas, para lo cual recomienda que el MINTIC, elabore en forma oportuna un plan que incluya los estudios técnico-económicos que permitan el otorgamiento oportuno y en igualdad de condiciones, en el uso del espectro para aplicaciones móviles de banda ancha de tercera y cuarta generación, conforme a las tecnologías propuestas por el IMT-2000 [51].

ETB sugiere el despliegue de redes híbridas que integren WiFi y WiMAX, con permisos para uso de espectro que se entreguen en “*concurso de belleza*” a los operadores mejor preparados para la provisión de estas soluciones. Por otra parte expresa la importancia de que el gobierno defina la regulación para las tecnologías inalámbricas, ya que la misma presenta un potencial de desarrollo bastante alto para banda ancha. Podría concretarse aún más la metodología para acceder a bandas como la de 3.4 Ghz y las prestaciones que se permitirían a los usuarios⁵³ [50].

⁵³ Fijas, móviles, voz, etc.

En atención a todo lo mencionado anteriormente, el MINTIC expresa que el tiempo de implantación de esta tecnología, está íntimamente ligado al desarrollo de un estándar interoperable, siguiendo los lineamientos del estándar IEEE 802.16. Menciona que la regulación necesaria para terminar de definir la operación de estos sistemas en Colombia, depende en gran medida de las características técnicas de operación de los mismos, en particular en lo referente a la movilidad del servicio que se pueda prestar. En cuanto al proceso de licenciamiento o concesión de dichos servicios, es importante realizar los siguientes dos comentarios:

- El análisis de los mecanismos de asignación de espectro para los distintos desarrollos inalámbricos, como el IMT-2000 no hace parte del alcance de este documento, sin embargo, no se desconoce la importancia de estas definiciones, ya que la forma en que se permita el acceso al mercado tiene un impacto directo en la oferta de servicios, por lo tanto el MINTIC, está realizando los análisis necesarios para determinar las condiciones de asignación y atribución de espectro que sean más convenientes para el país.
- La asignación y atribución de espectro, tiene como base fundamental la neutralidad tecnológica y las recomendaciones de los organismos internacionales como la UIT, por lo tanto, no se puede hablar de espectro para WiMAX, pues, éste responde a un desarrollo específico. Se debe hacer referencia a las bandas de frecuencia, en las cuales trabajan las tecnologías⁵⁴.

En cuanto al uso de la tecnología WiFi y otros desarrollos tendientes a la estandarización WiMAX en bandas de uso libre, ya pueden ser implantados de acuerdo con la Resolución 689 de 2004 del MINTIC, en la cual se definieron unos rangos de frecuencia específicos para uso libre, sin ningún tipo de permiso o pago previo.

La promoción de la banda ancha, representa solamente uno de los aspectos necesarios para el desarrollo de la sociedad de la información en Colombia. Para el logro de lo anterior, es imprescindible la realización de esfuerzos paralelos en otros sectores, los cuales deben ser promovidos conjuntamente por el Gobierno y por el sector privado.

Se aclara que el régimen unificado de contraprestaciones⁵⁵ contempla las tarifas diferenciales para el uso del espectro electromagnético en proyectos de telecomunicaciones que se lleven a cabo en zonas rurales o municipios de baja densidad poblacional. Igualmente, la Resolución 689 de 2004 regula el uso de tecnologías inalámbricas como Wi-Fi, WiMAX y otras que se adapten, a las limitaciones técnicas establecidas en la misma, y además atribuye frecuencias de uso libre en las bandas de 902 a 928 MHz, banda de 2 400 a 2 483,5 MHz, banda de 5 150 a 5 250 MHz, banda de 5.250 a 5 350 MHz, banda de 5 470 a 5 725 MHz, banda de 5 725 a 5 850 MHz.

2.3 ADJUDICACIÓN DE ESPECTROS USABLES POR WiMAX

En Colombia ha sido bastante discutido el proceso de asignación de espectro para la implementación de nuevas tecnologías inalámbricas, a continuación se presenta un

⁵⁴ como WiMAX

⁵⁵ Decreto 1972 de 2003

análisis de los aspectos regulatorios mencionados anteriormente, con respecto a la adjudicación y uso de los espectros que pueden ser usados por WiMAX para su implementación. Se divide en el proceso de asignación de la banda de 3.5 Ghz, la asignación para espectros de libre uso y por último el que se está llevando a cabo para la banda de 450 Mhz e IMT-2000⁵⁶.

2.3.1 Banda 3.5 GHz. Este se divide en dos partes: nacionales y departamentales.

Nacionales. Con base en las anteriores normas nacionales y el documento CONPES 3371 de 2005, a finales del año 2005 el MINTIC otorgó tres permisos para la prestación de servicios de telecomunicaciones, que utilicen sistemas de Distribución PtP y PtM para Acceso de Banda Ancha Inalámbrica, dentro del área de servicio nacional, en la banda de 3,5 GHz del espectro radioeléctrico. Los tres permisos fueron otorgados a los operadores ORBITEL, ETB y TELECOM, los cuales pueden usar las bandas A, A', B, B', C y C' respectivamente.

El proceso de licitación fue muy discutido debido a que en la escogencia de los operadores no hubo ningún tipo de concurso ni licitación, solamente se aprobaron las empresas que cumplían con los requisitos mencionados en el Decreto 2070. Estas son tres de las razones que justifican la asignación de los permisos a los operadores antes mencionados:

Según el MINTIC, si se quiere una ampliación rápida del acceso de los colombianos a Internet hay que encargarle la tarea de WiMAX, a quienes ya tienen redes de cobertura nacional. Montar nuevas infraestructuras tomaría su tiempo. Se busca proteger a los operadores de capital público, para estimular su competitividad en el mercado, justo en la coyuntura en que estos se ven más amenazados por la llegada de Telmex y Telefónica. Por otra parte, por razones técnicas no puede otorgar más que tres licencias nacionales en la banda de 3.5 Ghz, ya que ese espectro es relativamente limitado.

*Según Orbite*⁵⁷, uno de los propietarios de permiso de operación nacional, para desarrollar la banda ancha a nivel nacional, el MINTIC analizó la forma en la cual se permitiera el uso del espectro radioeléctrico, especialmente en la banda de 3,5 GHz, por parte de aquellos operadores que tuvieran cubrimiento nacional de redes fijas, de tal forma que se aprovecharan más eficientemente las economías de escala. El MINTIC señaló que la atribución a título primario, debe realizarse a los operadores de larga distancia, dada la capacidad de redes nacionales instaladas en el país, por su viabilidad de ofrecer servicios convergentes e integrados, como una forma de fomentar el patrimonio nacional y asegurar la prestación de servicios en zonas urbanas y rurales. De esta forma, en el año 2005 el gobierno otorgó frecuencias a los operadores de larga distancia, previo cumplimiento de los requisitos exigidos por la normatividad vigente. Uno de los requisitos para obtener el permiso nacional, es operar directa o indirectamente, a través de empresas vinculadas, socios, accionistas al menos un millón de líneas telefónicas fijas instaladas en el país, para así garantizar que el operador posea una infraestructura lo suficientemente extensa o de cubrimiento nacional. ORBITEL reitera que fue voluntad del

⁵⁶ en todas las frecuencias que se mencionarán a continuación es posible implementar WiMAX.

⁵⁷ en comentarios realizados en el artículo de Promoción y masificación de la banda ancha en Colombia, por parte del representante de Orbitel [51]

Gobierno Nacional, dentro del marco estratégico trazado por el CONPES, beneficiar a unas empresas con el otorgamiento de una licencias en la banda de 3.5 GHz.

Según entrevista realizada al Ingeniero Iván Hernández del MINTIC, otra de las razones por las cuales se otorgó estas licencias nacionales, fue porque ORBITEL 005, ETB 007 y TELECOM 009, pagaron a la nación licencias de alto costo para operar accesos internacionales, pero debido a VoIP, esas inversiones no retornaron la ganancia esperada, generando un detrimento en su patrimonio, por esta razón el Ministerio usó estas frecuencias como compensación, para que así estas compañías tuvieran la posibilidad de recuperar la inversión realizada en la adquisición de las licencias de operación de acceso internacional.

Departamentales. De conformidad con la Resolución 1449 de 2006, los operadores de servicios de telecomunicaciones deben someterse a un proceso administrativo por concurso público, para obtener el permiso al uso de la banda de 3.5 GHz en cualquiera de los departamentos del país.

Con base en las anteriores normas nacionales y las Resoluciones 1449 y 1616 de 2006, el 14 de agosto de 2006 el MINTIC abrió el proceso para la presentación de solicitudes para el otorgamiento de los permisos para el servicio fijo radioeléctrico, para la operación de los sistemas de distribución PtP y PtM para acceso de banda ancha inalámbrica, dentro de las áreas de servicio departamental, en la banda de 3,5 GHz del espectro radioeléctrico. Al proceso para el otorgamiento de los permisos se presentaron al MINTIC veinticuatro empresas solicitantes, con un total de ciento sesenta y un solicitudes. El 22 de diciembre de 2007, en Audiencia Pública celebrada en el MINTIC se efectuó el otorgamiento de cincuenta y cinco permisos para las áreas de servicio departamental, en la banda de 3.5 GHz.

2.3.2 Bandas no licenciadas. Según la normatividad vigente, el uso de frecuencias radioeléctricas requiere de permiso previo otorgado por el MINTIC y dará lugar al pago de los derechos que correspondan. Cualquier ampliación, extensión, renovación o modificación de las condiciones, requiere de nuevo permiso, previo y expreso [37]. Sin embargo, en [41], se autoriza su uso sin necesidad de contraprestación o pago, de algunas frecuencias o bandas de frecuencias del espectro radioeléctrico, atribuidas, permitidas y autorizadas de manera general y expresa por el MINTIC. A través de esta resolución, se atribuyen dentro del territorio nacional, a título secundario, para operación sobre una base de no interferencia, los siguientes rangos de frecuencias radioeléctricas, para su libre utilización:

- a) Banda de 902 a 928 MHz
- b) Banda de 2.400 a 2.483,5 MHz
- c) Banda de 5.150 a 5.250 MHz
- d) Banda de 5.250 a 5.350 MHz
- e) Banda de 5.470 a 5.725 MHz
- f) Banda de 5.725 a 5.850 MHz

2.3.3 Banda de 450 MHz e IMT-2000. La Recomendación de CITELE “*Uso de las Bandas de 410-430 MHz y 450-470 MHz, para los servicios fijos y móviles para comunicaciones digitales en áreas de densidad demográfica baja*”, expresa que la utilización digital de la

banda de 450 MHz, se constituye en una herramienta útil a las administraciones de las Américas para que las comunicaciones y el acceso a la información lleguen a todas las comunidades, especialmente a poblaciones menos favorecidas y en zonas remotas, para que se constituyan en elementos de amalgama e integración social y desarrollo, como una de las prioridades más importantes de los gobiernos de países en desarrollo. Se recomienda a los países de las Américas considerar el uso de estas bandas:

- Donde el espectro necesario esté disponible o en donde pueda disponerse del mismo a través de medios técnicos y/o regulatorios.
- Donde puedan coexistir los sistemas radioeléctricos nuevos y los existentes sin interferencia perjudicial.
- Donde, en el caso de las áreas de frontera, se puedan lograr acuerdos de coordinación entre las administraciones.
- También se pueden tomar en consideración los estudios de compartición de frecuencias⁵⁸.

En junio de 2008, el MINTIC dispuso para consulta pública, el documento: “*Exploración de interesados en el otorgamiento de permisos en la banda de 450 MHz ...*”. El propósito de la consulta consistía en:

- Analizar la viabilidad de desarrollo de servicios en banda de frecuencias de 450 MHz.
- Conocer las áreas geográficas de interés.
- Programar la posibilidad de migración de operadores establecidos a otras bandas.
- Proyectar la planificación y distribución del espectro y de establecer las bases para la provisión de acceso de Banda Ancha.

A esta invitación respondieron 5 empresas de telecomunicaciones. Dichas empresas elevaron intenciones para implementar desarrollos en 295 municipios de 29 diferentes departamentos del país. A la fecha, el MINTIC ha puesto a consideración del sector de telecomunicaciones, el proyecto de resolución: “*Por la cual se atribuyen y planifican unas bandas de frecuencias radioeléctricas en el rango comprendido entre 450 a 470 MHz para el desarrollo de servicios de telecomunicaciones que utilicen sistemas para acceso de banda ancha inalámbrica y se dictan otras disposiciones*”. Este proyecto de Resolución se encuentra en ejecución.

Con respecto a IMT-2000, las bandas que se definen son las siguientes:

Banda de 450-470 MHz;
Banda de 698-862 MHz
Banda de 790-862 MHz
Banda de 2,3-2,4 GHz
Banda de 3,4-3,6 GHz
Banda de 3,5-3,7 GHz

El MINTIC ha recibido solicitudes de asignación de espectro radioeléctrico en las bandas de 850 MHz, y 1900 MHz. Como consecuencia de estas solicitudes, y a partir de los estudios que ha venido realizando el Ministerio sobre las bandas identificadas o

⁵⁸ para el uso eficiente de la banda

candidatas a IMT, se ha decidido realizar un proceso público con el fin de tomar en consideración los diferentes planteamientos de los interesados, y así establecer la política de espectro radioeléctrico más conveniente para el desarrollo del país, teniendo en cuenta la mayor cantidad de elementos de juicio. Actualmente este proceso se encuentra en estudio.

2.4 LICENCIAS OTORGADAS

Como se mencionó en la sección 2.3.1, las licencias de operación en la frecuencia de 3.5 GHz dentro del área de servicio nacional, fueron otorgadas a TELECOM, ETB Y ORBITEL en un proceso no licitatorio. En el Anexo B se muestra una lista por departamentos de los solicitantes de asignación de espectro en la banda de 3.5 GHz para la operación en áreas de servicio departamental. El proceso de adjudicación de licencias para operadores departamentales, se llevó a cabo un proceso licitatorio, otorgando 64 permisos.

El 22 de diciembre de 2007, en Audiencia Pública celebrada en el MINTIC y con la asistencia de la Ministra, el Viceministro, el Secretario General del Ministerio y representantes de la Procuraduría, de las empresas interesadas y la prensa nacional, se efectuó el otorgamiento de cincuenta y cinco (55) permisos para las Áreas de Servicio Departamental, en la Banda de 3.5 GHz, con base en la evaluación realizada siguiendo los lineamientos de la Resolución 1449 de 2006 [52].

2.5 REDES WIMAX EXISTENTES EN COLOMBIA

Gracias al Sistema de información unificado del sector de las telecomunicaciones o SIUST, se puede obtener información veraz acerca de cuáles y cuántos son los municipios que tienen acceso a banda ancha, a través de WiMAX y su proveedor de servicios correspondiente. Veintitrés (23) son los municipios que actualmente tienen implementado WiMAX como solución de acceso a Internet.

2.5.1 Topologías de red [53][54][55]. Como se mencionó al finalizar el primer capítulo de este documento, a WiMAX se le relaciona generalmente con la topología PtM, y dependiendo del escenario de implementación, esta topología puede ser combinada con las otras dos clases de topologías para lograr una mayor diversidad de espacio, o bien una mayor cobertura conectando mediante PtP varias Estaciones Base o antenas que cumplan las veces de concentradores en la red. Sin embargo [41], sólo permite PtP y PtM en Colombia.

2.5.2 Equipos. El *WiMAX Forum* ha certificado los productos de 25 compañías dedicadas a la fabricación y venta de Estaciones Base y de 45 compañías dedicadas a la fabricación y venta de Estaciones Suscriptoras [56].

UNE EPM Telecomunicaciones, la única compañía con despliegues de redes WiMAX en Colombia, utiliza equipos de la marca Nokia Siemens Networks. Por tal motivo, se realiza un análisis a los dispositivos de dicha marca, utilizados actualmente.

2.5.2.1 Estación Base. El 17 de Marzo de 2006, Nokia Siemens Network obtuvo la certificación por parte del *WiMAX Forum*, para la comercialización de la estación base *WayMAX@vantage* [57], mostrada en la figura 2.2; actualmente utilizada en las redes

WiMAX fijas implementadas en Colombia. Los beneficios técnicos y su correspondiente *datasheet*, aparecen en el Anexo C. La interfaz aérea es IEEE 802.16d-2004 y es actualizable a la versión IEEE 802.16e.



Figura 2.2. Estación Base *WayMAX@vantage* de Nokia Siemens Networks

2.5.2.2 Estaciones Suscriptoras. La gama de dispositivos fabricados por Nokia Siemens Networks para estaciones suscriptoras WiMAX fijo llevan el nombre de *Gigaset WiMAX Family* [58]. UNE EPM Telecomunicaciones utiliza las referencias Gigaset SE461 y Gigaset SE471, mostradas en la figura 2.3. Las características de estos dispositivos se especifican en el Anexo C. “*Con la posibilidad de actualización, autenticación, configuración y administración de manera remota, estos dispositivos garantizan una experiencia positiva al usuario suscriptor*” [59].

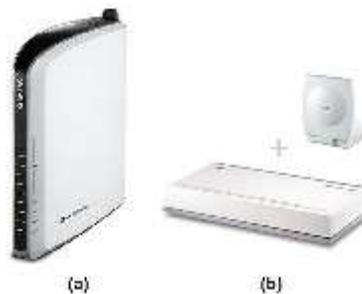


Figura 2.3. (a) Gigaset SE461 Indoor, (b) Gigaset SE471 Indoor

Para usos *outdoor*, Gigaset posee una antena de exteriores que proporciona una ganancia adicional de 18 dBi. El equipo se muestra en la figura 2.4. La interfaz aérea de estos equipos es IEEE 802.16d-2004 y son actualizables a la versión IEEE 802.16e.



Figura 2.4. Antena para exteriores compatible con la familia Gigaset

2.5.3 Cobertura y Emplazamientos [61][62]. La primera ciudad en implementarse WiMAX fue Santiago de Cali. La cobertura WiMAX de UNE EPM Telecomunicaciones comprende 23 ciudades colombianas. La primera ciudad en implementarse WiMAX fue Santiago de Cali. Para una descripción más exacta de los emplazamientos, se desarrolla la tabla 2.3 [62][63][64][65][66], que contiene factores como: el número de habitantes, densidad de población medida en habitantes por kilómetro cuadrado en el casco urbano, altura en metros sobre el nivel del mar (msnm), temperatura promedio en grados centígrados (°C), extensión territorial en kilómetros cuadrados (km²), los accidentes geográficos presentes en las áreas de mayor densidad de población y suscriptores WiMAX a la fecha.

Tabla 2.3. Municipios con cobertura WiMAX y sus características⁵⁹

Municipio	Habitantes	Densidad de población (hab/km ²)	Altura (msnm)	Temperatura (°C)	Superficie (km ²)	Accidentes Geográficos	Suscriptores WiMAX
Tunja	164.676	1.424	2.810	12	118	Valle y Meseta	1925
Manizales	386.931	725	2.160	18	571.84	Montaña	693
Yopal	119.692	45,29	350	26	2.771	Llanura	5
Popayán	258.653	568	1.760	19	512	Valle y Montaña	1921
Valledupar	354.180	7.089	169	28	45.3	Llanura	2
Montería	381.525	77,6	18	28	3.141	Llanura	8
Riohacha	167.865	61	1	30	20.848	Llanura	11
Neiva	354.385	230	442	28	1.553	Valle	613
Santa Marta	415.270	146.33	3	34	2.448	Llanura	1716
Villavicencio	384.131	242,26	467	27	1.328	Llanura	948
Pasto	382.618	409	2.527	14	1.181	Valle y Montaña	2365
Cúcuta	948.942	638	320	28	1.176	Valle y Montaña	267
Armenia	340.000	2.368	1.551	21	121,33	Montaña	375
Pereira	454.291	626	1.411	23	702	Montaña	580
Bucaramanga	523.040	200	959	23	165	Montaña	666
Sincelejo	234.886	850,5	213	27	32,39	Llanura	1
Ibagué	520.974	36	1.285	21	1.498	Valle y Montaña	2407
Cali	2'068.386	3.816,2	995	25	562	Valle y Montaña	7605
Medellín	2'223.078	5.840	1.538	22	380,64	Montaña	552
Rionegro	101.046	466	2125	17	196	Montaña	332
Barranquilla	1'148.506	6.918.14	4	27	166	Llanura	3948
Bogotá DC	6'776.009	4.270	2.600	14	1.776	Valle y Meseta	1103
Cartagena	892.545	365,29	2	28	256	Llanura	1725

El número de suscriptores a banda ancha mediante WiMAX en Colombia es de 29.771⁶⁰.

⁵⁹ La tabla 2.3 fue desarrollada con datos obtenidos de la Comisión de Regulación de Comunicaciones – CRC, del Sistema de Información Unificado del Sector de las Telecomunicaciones – SIUST, del Departamento Administrativo Nacional de Estadísticas – DANE y del Instituto Geográfico Agustín Codazzi – IGAC.

⁶⁰ Datos actualizados obtenidos del SIUST

Los accidentes geográficos presentes en cada una de las ciudades van relacionados con la localización de dichas ciudades dentro del panorama montañoso circundante. Es decir, a las ciudades que se encuentran cerca de la costa, se les relaciona con llanuras debido a sus superficies horizontales u ondulaciones leves, mientras que para las ciudades ubicadas en zona de cordillera, se las relaciona con las grandes elevaciones de terrenos: montañas. Es preciso anotar que algunas ciudades debido a su gran extensión del casco urbano, pueden presentar múltiples accidentes geográficos y se les relaciona con los accidentes predominantes en los lugares de alta densidad de población.

2.5.4 Participación en el mercado. La llegada de Telmex y los nuevos servicios que prestan las compañías de telefonía móvil locales a precios razonables, provocan migraciones masivas de suscriptores de una empresa a otra, con el fin de buscar mayor economía, estabilidad, confiabilidad y acceso a un portafolio de aplicaciones y servicios que vayan de acuerdo a las necesidades crecientes de la sociedad. Como lo muestra la tabla 2.4 [62], el medio de acceso a Internet con mayor crecimiento en el último trimestre del año 2009 con respecto, al trimestre inmediatamente anterior, fue el acceso a Internet a través de redes móviles de telefonía celular con una variación del 45,23%, mientras que el medio de acceso con un decrecimiento considerable es el conmutado con un -50,97%.

Tabla 2.4. Distribución de suscriptores de Internet en Colombia por tipo de acceso.

Medio de Acceso	Suscriptores Junio 2009	Suscriptores Septiembre 2009	Variación
Acceso Conmutado	127.578	62.548	-50,97%
Acceso dedicado fijo			
xDSL	1'360.553	1'405.742	3,32%
Cable	685.817	704.134	2,67%
WiMAX e inalámbricos	44.707	40.044	-10,43%
Otros	32.431	34.365	5,96%
Subtotal dedicado fijo	2'123.506	2'184.285	2,86%
Total de Accesos Fijos	2'251.086	2'246.833	-0.19%
Acceso a través de redes móviles	495.730	719.943	45.23%
TOTAL (fijo+móvil)	2'746.816	2'966.766	8.01%

“Al realizar un análisis por proveedores de redes y servicios de telecomunicaciones, se observa que las cuatro empresas más representativas en cuanto a cantidad de suscriptores comprenden el 81,8% de las conexiones dedicadas fijas, lo cual representa una reducción del 0,38% en comparación con Junio de 2009. De este modo, EPM Telecomunicaciones alcanza el 22,49%, seguido por ETB con el 20,36%, Colombia Telecomunicaciones se ubica en el tercer lugar con el 19,9% de los suscriptores dedicados fijos, mientras que Telmex Hogar ostenta la cuarta posición con 19,05%.”[62]

Tabla 2.5. Distribución de suscriptores de accesos dedicados fijos por proveedor.

Proveedor	Banda ancha	Banda angosta	TOTAL	Variación
EPM Telecomunicaciones	481.950	9.361	491.311	3,71%
ETB	439.873	4.760	444.633	0,34%
Colombia Telecomunicaciones	385.181	49.599	434.780	1,11%
Telmex Hogar	348.837	67.277	416.114	4,47%
Emcali	79.693	0	79.693	2,04%
Telebucaramanga	40.516	19.454	59.970	2,53%
EdateL	751	53.935	54.686	12,16%
Metrotel Redes	34.581	13.032	47.613	4,64%
ETP	43.806	66	43.872	6,11%
Telmex Colombia	23.322	2.280	25.602	3,89%
Otros	47.241	38.770	86.011	5,51%

Las tablas 2.5 y 2.6 [62], revisan el número de suscriptores que tienen los proveedores de acceso y clasifica a los mismos, de acuerdo a la tecnología que usan y los municipios cubiertos.

Tabla 2.6. Proveedores de redes y servicios con mayor cobertura de municipios por tecnología.

Tecnología	Proveedor	Municipios Cubiertos
xDSL	Colombia Telecomunicaciones	273
	EdateL	140
	EPM Telecomunicaciones	57
	ETB	40
Cable	Telmex Hogar	46
	Cable Unión	41
	Telmex Colombia	39
	EPM Telecomunicaciones	29
WiMAX e Inalámbricos	ETB	41
	Media Comerse Partners S.A	41
	S3 Wireless Colombia S.A	39
	EPM Telecomunicaciones	26
Otras Tecnologías	Axesat	946
	BT Latam Colombia	684
	Gilat Colombia	637
	Internet por Colombia	578

2.5.5 Aplicaciones y servicios. La implementación de WiMAX como alternativa para acceso a banda ancha en el territorio Colombiano es un aspecto clave para la competitividad del país. UNE EPM Telecomunicaciones tiene como reto *“impulsar el desarrollo de banda ancha en Colombia”*, a través de WiMAX, para *“brindar acceso a un*

*mundo ilimitado de negocios, entretenimiento, aprendizaje, comunicaciones y transacciones*⁶¹.

Los servicios incluidos en los paquetes ofrecidos para acceso a banda ancha por UNE EPM Telecomunicaciones a las empresas en Colombia utilizando WiMAX, son: Internet, *hosting*, *e-mail* con antivirus y *anti-spam*, dirección IP pública, accesos conmutados, obtención de dominio, soporte técnico y capacidad adicional en almacenamiento de página web y correo.

De esta manera se ha puesto en evidencia el estado de la tecnología WiMAX en el país. Resaltando el trayecto legal que tuvieron que atravesar los operadores para obtener servicios de operación en la banda de 3.5 GHz. Se logró investigar en este capítulo, los dispositivos WiMAX que se usan actualmente en Colombia, el nivel de penetración de la tecnología en el mercado nacional, los distintos emplazamientos y coberturas soportados por el sistema de UNE y algunos análisis inherentes al comportamiento del mercado. Con los capítulos uno y dos, se cumple con el primer objetivo específico de construir una base conceptual para la coexistencia de redes WiMAX fijas y WiMAX móviles y de esta forma, aportar al logro del objetivo general de realizar el análisis de la coexistencia de redes WiMAX fijas y WiMAX móviles.

⁶¹ comenta un Ingeniero empleado en el área de infraestructura de UNE EPM Telecomunicaciones en Popayán, en entrevista concedida.

3. ESTRATEGIAS Y PROCEDIMIENTOS PARA LA COEXISTENCIA

El primer y segundo capítulo, consolidan una base teórica para el desarrollo de estrategias y procedimientos técnicos a nivel de arquitectura de red, para la adaptación de accesos móviles a una infraestructura de red WiMAX fija existente. El desarrollo del segundo objetivo específico exige la atención de cinco aspectos principales: fundamentación teórico práctica sobre planeación de redes WiMAX, determinación del escenario de implementación, determinación de la necesidad y plan de solución.

La metodología de despliegue propuesta en este capítulo, se basa en los conceptos de FMC expuestos en el capítulo uno, definiendo a las dos versiones WiMAX como tecnologías que poseen diferentes características, las cuales es necesario que converjan. Se busca por lo tanto, contribuir al nivel más básico de convergencia, es decir, la coexistencia de componentes inalámbricos de diferente clase en una misma red, en este caso, estaciones base, dispositivos de usuario y componentes adicionales del core de la red, si son requeridos.

3.1 PLANEACIÓN DE UNA RED INALÁMBRICA WIMAX

Los requerimientos, segmentos de mercado objetivo, patrones de uso, localizaciones, rendimiento, dispositivos de usuario y acuerdos de nivel de servicio, etc., son diametralmente diferentes para ambas versiones de WiMAX. El rendimiento de las dos versiones de WiMAX puede cambiar considerablemente para aplicaciones específicas, porque el acceso IEEE 802.16d-2004 está optimizado para accesos fijos mientras que, IEEE 802.16e lo está para accesos móviles.

Los factores primordiales a tener en cuenta a la hora de tomar la decisión de implementar accesos móviles son los siguientes:

- Servicios a ofrecer
- Modelo de negocio del operador
- Objetivos de mercado
- Espectro
- Regulación

El *WiMAX Forum* además recomienda las siguientes opciones disponibles para realizar la migración a WiMAX móvil [67]:

Red Superpuesta: En áreas donde un operador quiere adicionar portabilidad y accesos móviles, una red superpuesta WiMAX fija que opere en paralelo con una red WiMAX móvil puede desarrollarse si el espectro así lo permite. Esto habilita al operador para el ofrecimiento de accesos fijos y móviles en la misma área, pero requerirá que los suscriptores tengan los dos tipos de dispositivos de usuario, si desean tener acceso a ambas redes.

Dispositivos de usuario de modo dual: Operadores que quieran cambiar a WiMAX, móvil pueden desplegar CPE duales que soporten ambas versiones. Inicialmente, el

operador desplegará estaciones base fijas y CPE fijos, después, cuando los productos IEEE 802.16e estén disponibles, iniciará la introducción de CPE duales; una vez sean desplegados accesos duales, el operador podrá cambiar las estaciones base fijas a móviles.

Estaciones Base con software actualizable: Esta solución puede usarse en conjunto con CPE duales. En este caso, en lugar de reemplazar la estación base, el operador puede ejecutar una actualización de software para modo móvil.

Estaciones base duales: Si los CPE desplegados, soportan un modo único y el operador planea un movimiento gradual a 802.16e, se pueden instalar estaciones base duales. En los casos donde redes superpuestas prueban no ser una opción beneficiosa o el operador carezca del espectro requerido, las estaciones móviles duales pueden proveer una vía para soportar ambos modos y eventualmente, un cambio absoluto hacia WiMAX móvil cuando todas las CPE sean actualizadas. Algunos fabricantes ofrecen estaciones base que parten el canal disponible entre los dos modos, mientras otros soportan ambos modos en el mismo canal, alternando tramas IEEE 802.16d-2004 e IEEE 802.16e.

La definición de la UIT [68], es: “...consiste en la utilización de métodos científicos para optimizar las inversiones y para dimensionar los equipos...con el objeto de cumplir objetivos realistas (en función de los recursos disponibles) definidos previamente...” En este sentido, los métodos científicos pueden ser por ejemplo, en el caso de la planificación de la frecuencia, la utilización de modelos de propagación. El objetivo general es el despliegue de una red coexistente WiMAX fija móvil, pero ajustada a la realidad de acuerdo a: modelos de negocio, recursos financieros, equipos, personal y demás limitaciones técnicas, económicas y legales.

3.1.1 El proceso de planeación de la red. La figura 3.1 [3], es un esquema del proceso de planeación de una red, con el propósito de diseñar una nueva red inalámbrica en un área determinada, un plan de despliegue *greenfield*⁶². El proceso de planeación puede ser descrito y comprendido en tres fases principales: La primera fase es de recopilación de información, la segunda la fase de planeación y despliegue y la tercera de evaluación, verificación y optimización. Este proceso puede no ser lineal, la alimentación desde la tercera fase puede afectar la información recolectada y puede cambiar el plan. Otros bucles de realimentación son inherentes en el proceso, debido principalmente a las limitaciones en la captura de información completa y confiable en el área objetivo.

3.1.1.1 Fase de recolección de datos. Se usan tres tipos de información:

Información Geográfica: Incluye todos los datos geográficos del área a ser cubierta, alturas del terreno, mapa de usos de la tierra y mapa de las locaciones y formas de edificios y sus alturas y una lista de locaciones potenciales para estaciones base.

Información de Clientes: Incluye datos de mercado, tales como número de usuarios potenciales, mapa de densidad demográfica, perfil de tráfico de los usuarios, etc. Mientras redes de celular tradicional asumen un tipo singular de usuario con un tipo único de servicio y en 3G introducen algunos tipos de servicio, los sistemas WiMAX posibilitan la

⁶² Se refiere a realizar un proyecto desde cero o cambiar completamente uno existente.

definición de diferentes tipos de servicios a usuarios, cada uno con su propio perfil de uso y acuerdos de nivel de servicio, etc.

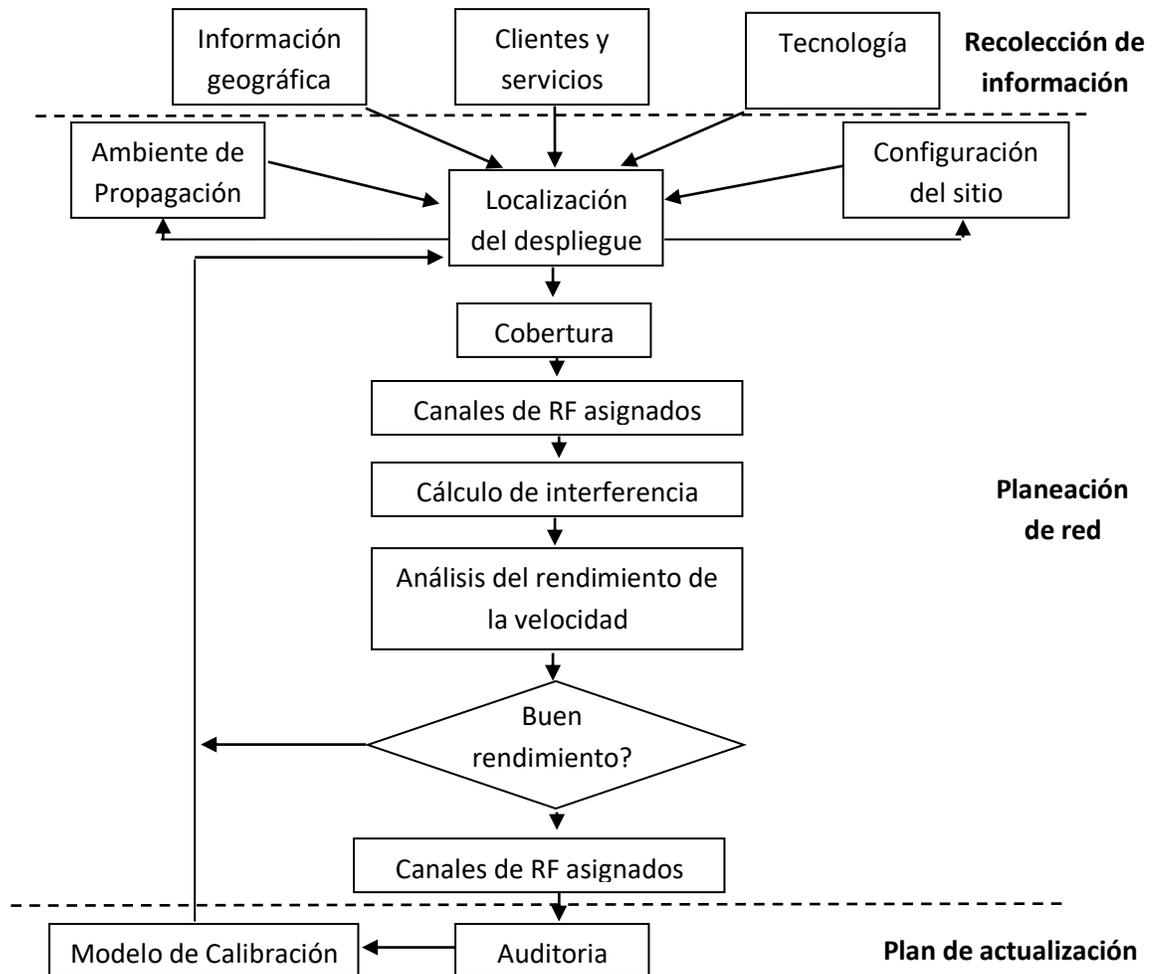


Figura 3.1. Proceso de planeación de red

Previsión de la Demanda. En la previsión de la demanda se especifica el número de usuarios que tendrá la red y el tráfico que deberá soportar cada punto en un determinado período. Esta evolución está determinada por los resultados de los objetivos globales de cantidad y calidad de servicio de cada período. A corto plazo, prevé la saturación de algún equipo con anticipación. A largo plazo permite determinar la evolución de la red, las posibles necesidades de mano de obra, permisos, licitaciones y recursos.

Previsiones del Tráfico. Los métodos de dimensionamiento y optimización de las redes se basan en las previsiones del tráfico. En estas previsiones se pueden utilizar mediciones de tráfico, cuando es posible, pero generalmente están basadas en hipótesis del planificador relativas al tráfico promedio por usuario y la distribución del mismo en la zona de estudio.

Optimización y Dimensionamiento. El propósito de la optimización de una red es el de encontrar el mejor plan de desarrollo de la misma; la dificultad radica en la elección de los criterios de optimización, de modo que se puedan comparar distintas soluciones desde un punto de vista cuantitativo y objetivo. Los criterios a ser evaluados son:

- Contribución al alcance de los objetivos de la administración general.
- Compatibilidad con la política general de desarrollo de la red y con los planes estratégicos.
- Costo, exigencias en recursos y de financiación.
- Nivel de flexibilidad para la evolución de la red.

Otros aspectos: Una parte importante de la información tecnológica es una especificación del espectro a ser usado, que incluye el número de canales de frecuencia disponible para el despliegue, información acerca operación de sistemas externos, limitaciones regulatorias en el uso del espectro y potencia en diferentes partes del área planeada.

3.1.1.2 Fase de Planeación de la Red

Base de datos de cobertura: En el caso presuntivo de sistemas de acceso inalámbrico fijo, la planeación se concentra en la ubicación real de las antenas del suscriptor, que por lo general están ubicadas en los techos. Cada punto sirve como un punto de referencia para calcular la intensidad de la señal recibida RSS, estimar el nivel de interferencia, obtener SINR⁶³ y el desempeño. Para el sistema móvil, la cobertura es calculada generalmente para una grilla igualmente espaciada de puntos, cada uno de estos representa un área llamada *bin* [3]. Cada estación *bin* es un punto de referencia. Herramientas avanzadas de planeación soportan bases de datos de cobertura en tres dimensiones, la cual también define varios *bin* en los pisos de los edificios a diferentes alturas. En la figura 3.2 se muestra un ejemplo de esto, donde cada *bin* fue distribuido uniformemente a lo largo de calles y en cada piso dentro de las construcciones.

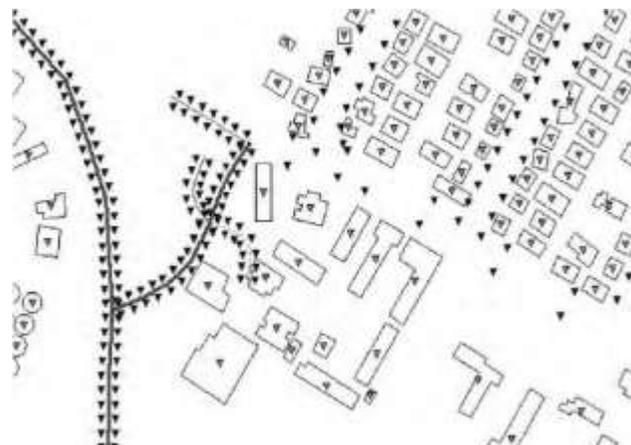


Figura 3.2. Puntos típicos en un área urbana, *indoor* y *outdoor*

⁶³ Relación señal a ruido

Modelos de canal y propagación: La predicción de la intensidad de la señal es un procedimiento básico para estimar la señal referencia, tanto como la interferencia. Una solución exacta de la ecuación de Maxwell es imposible, para lo cual existe una larga variedad de modelos disponibles. Se pueden aplicar modelos diferentes a los puntos de área de cobertura de acuerdo al uso de tierras y a la ubicación de los usuarios. El Anexo D, expone el modelo de propagación COST 321 aplicable a WiMAX.

El desempeño del sistema no está determinado solo por el RSS o el SINR en el receptor, esto también depende del canal y receptor usado. Un modelo estadístico puede ser aplicado con el fin de predecir el actual desempeño en un nivel de disponibilidad requerido. Herramientas sofisticadas usan diferentes modelos para diferentes puntos de referencia para proveer la mejor imagen del ambiente.

Despliegue de capacidad limitada o rango limitado: El número de estaciones base requeridas para cubrir un área determinada es definido por el tamaño de la celda o por el tráfico total que necesita ser transportado. En el primer caso, el despliegue es llamado de rango limitado y el segundo de capacidad limitada. La planeación es diferente en los dos casos. En el primer caso, el propósito es incrementar el rango que cada estación base puede alcanzar. En el segundo caso, una estación base no cubrirá una celda completamente, pudiendo generar interferencia a otras estaciones, el reto aquí es mitigar esa interferencia.

Despliegue requerido por la oferta o por la demanda: Hay dos tipos de alcance para este proceso de planeación. El primero se logra teniendo en cuenta que se hará para un tamaño del sistema proyectado a futuro. Un despliegue de sistema real puede ser originado de un plan maestro y puede ser actualizado hasta que dicho despliegue alcance el tamaño final del sistema. Se enfoca en asegurar una operación optimizada a largo plazo, previendo una alternativa de escalabilidad al sistema. Por otra parte, si las predicciones no son exactas, la planeación y el despliegue tendrían que ser modificados. El alcance impulsado por la demanda, inicia con la mínima configuración del sistema necesaria para proveer una demanda existente. Para las redes fijas esto podría significar un despliegue solo de estaciones base en regiones limitadas donde exista demanda. Para sistemas móviles esto podría significar únicamente el despliegue de un sistema de rango limitado y posteriormente adición siguiente de celdas, para proveer capacidad donde fuese necesario. La división entre celdas es un buen ejemplo de este alcance. El despliegue impulsado por la demanda es más flexible, sin embargo, esto resulta en un sistema no optimizado, debido a que cada actualización tiene que ser hecha basada en características impuestas por despliegues ya existentes.

Configuración de la estación base: El rango y la capacidad de la estación base dependen de su configuración, la altura y directividad de la antena, lo que implica el número de sectores desplegados. El número típico de sectores en sistemas móviles es tres. Dentro de una estación única, se puede encontrar una variedad de configuraciones de celda, dependiendo de la zona específica. En redes móviles uno puede encontrar una jerarquía de estaciones base, las cuales cubren la misma región pero para diferentes propósitos.

Ubicación de la estación base: La ubicación es un factor crítico en el despliegue de redes. Es uno de los factores de costo principales de la red, no solo incluye costo del equipo, también incluye el costo de adquisición o arrendamiento, licencia, implicaciones ambientales, construcción, electricidad, aire acondicionado, red *backhaul* y de transmisión y el mantenimiento a largo plazo. Todo lo mencionado anteriormente representa la mayor inversión de capital. Las herramientas de planeación que habilitan la optimización de la red y despliegue con un número mínimo de sitios resulta una muy buena inversión en los costos del equipo. El método clásico de planeación está basado en el patrón de grilla hexagonal. El hexágono, es la mejor aproximación a un círculo, el cual refleja el hecho que la intensidad de la señal es extremadamente dependiente del radio. Después de determinar el radio de la celda, la grilla de hexágonos es colocada en el área que se desea cubrir. Ubicaciones reales de estaciones base son seleccionadas tan cerca como sea posible al centro de la celda, cuidándose de no sobrepasar un cuarto del radio de la celda.

Algoritmos sofisticados tienen como objetivo buscar un mínimo número de estaciones base para las necesidades cobertura y la capacidad requeridas. Otras necesidades complejas externas también pueden ser consideradas, por ejemplo, establecer el despliegue de un *backbone* microondas o la búsqueda de los emplazamientos más económicos.

Cobertura y sitios de conectividad: El área de cobertura de cada celda puede determinarse una vez ubicados los sitios de conectividad. Una celda está programada para cubrir un punto de referencia o un *bin* si la fuerza de la señal en aquel punto está sobre un nivel definido, que habilita a la estación base para servir a un suscriptor en ese punto. En la red fija, el área de cobertura, o el conjunto de posibles estaciones suscriptoras, se divide a través de celdas sin superposición. En el caso de sistemas móviles, hay una superposición inherente, la cual es esencial para proveer *handover*, pero debe limitarse debido que una alta superposición puede ocasionar interferencia entre celdas.

La planificación de cobertura usa modelos de propagación, especificados en el Anexo D, que permiten estimar las pérdidas que sufren las señales; estos se usan para el cálculo del radioenlace, donde se especifican ganancias, pérdidas y márgenes de cada elemento que participa en un enlace. El resultado es una aproximación de la potencia a la cual se debe transmitir. La precisión dependerá del modelo utilizado junto a los datos que representen la geografía del área en estudio. El cálculo del radioenlace permite obtener el valor máximo al cual pueden llegar las pérdidas por propagación. Actualmente, algunos paquetes de software realizan planificación de cobertura y el cálculo del radioenlace; utilizan información acerca de la geografía y edificaciones, lo cual permite obtener cálculos y predicciones más precisos.

La planificación de cobertura calcula las pérdidas tanto en UL como en DL, se considera el peor caso, que generalmente es UL y se toman las medidas respectivas, hasta lograr cierto balance. En el Anexo E se especifican las fórmulas inherentes al balance del enlace. El balance se realiza para que el alcance de los enlaces UL y DL sean iguales y de esta forma no exista lugares en donde MS tenga un nivel de cobertura bueno, pero no pueda concretar la llamada porque el alcance del MS no lo permita. Es UL quien determina el tamaño de las celdas por ser más crítico que DL.

Capacidad de celda requerida. Consiste en adecuar la capacidad de la red en función de la variación de la demanda en el tiempo, que puede tener una curva creciente y constante o puede ser sólo estacional, lo que determina la necesidad de establecer estrategias pertinentes para el ajuste de la capacidad en corto, mediano o largo plazo.

La metodología para diseñar un proceso de planificación de capacidad puede realizarse a través de varios enfoques, el objetivo es presentar los elementos necesarios del proceso de la forma más general posible y debe contar con etapas bien definidas. Conocer estas etapas, inherentes al modelo a desarrollar es relevante, ya que cuando se desee realizar algún cambio al proceso de planificación se deberán ajustar ciertos parámetros del proceso, con tal de obtener un mejor desempeño y optimizar el funcionamiento de cada uno de los subprocesos y actividades realizadas dentro del proceso.

Cuando se determina el área cubierta por la celda, se puede calcular más fácilmente la capacidad de tráfico total a transportarse por cada celda, sumando los nodos de tráfico y la carga de *handover* estimada. En consecuencia, el número de canales de RF/bloques de los recursos físicos necesarios para cada celda puede determinarse. Sin embargo, el número puede variar de acuerdo a las condiciones del canal real y la interferencia en cada estación suscriptor. Modulación adaptativa, multiplexación espacial y otras técnicas pueden permitir un mayor tráfico, y reducir el requerimiento por canal. Así, una evaluación aproximada se toma en la primera fase y luego se corrige cuando haya una condición real de canal por usuario más exacta.

Los índices de capacidad son herramientas que permiten observar los resultados del proceso de planificación. Algunos índices se listan a continuación:

- Tablas y gráficos de estados actuales de capacidad.
- Gráficos de evolución histórica de la capacidad.
- Definición de variables con base en pronósticos.
- Tablas y gráficos con pronósticos, que incluyan certeza de los valores.

Las variables con base a pronósticos permiten cuantificar el tiempo que la red o sistema en general será capaz de soportar sin mayores cambios, suponiendo una tasa constante de crecimiento de la demanda, la cual puede ser una estimación o la demanda que presenta en la actualidad la red o sistema.

Plan de configuración de sistema y frecuencias. Determinando el número de canales RF por celda, es posible planear la frecuencia para cada canal RF.

El objetivo de la planificación de frecuencias es minimizar la interferencia entre celdas que utilizan los mismos canales o adyacentes, el tipo de antenas a utilizar es parte del proceso de planificación de frecuencias de una red inalámbrica. En la figura 3.3 se muestra el proceso conceptual de la planificación de frecuencias, un proceso secuencial donde la calidad de los resultados obtenidos depende de las etapas previas, estos procesos son realizados por software de planeación especializado.

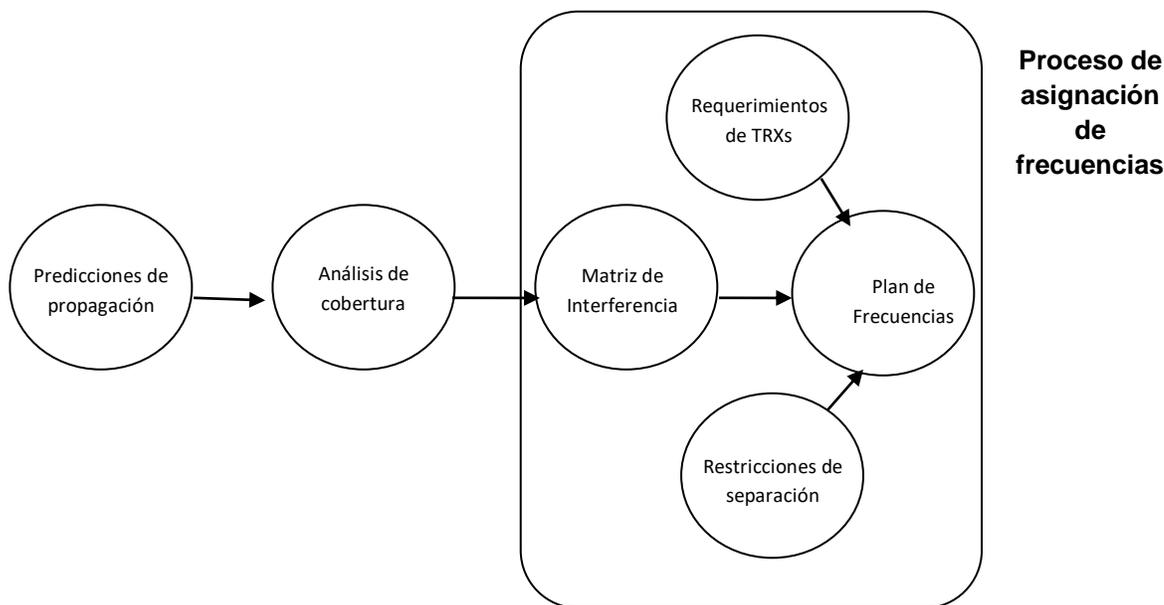


Figura 3.3. Proceso de asignación de frecuencias

El proceso de planeación comienza realizando las predicciones de propagación, seguidamente se calcula la cobertura para establecer el nivel de interferencia entre celdas, con lo cual se construye una matriz de interferencia $X = [x_{ij}]$, donde el elemento x_{ij} de la matriz representa la posible interferencia, de la celda j en los MSs de la celda i . Por último, se realiza el plan de frecuencias teniendo en cuenta la matriz de interferencia, las restricciones de separación entre celdas y los requerimientos de transmisión. Las frecuencias se asignan de tal manera que las frecuencias co-canal son reusadas en celdas tan lejos como sea posible.

La precisión de los resultados depende, en primer lugar, del modelo de propagación que se utilice y luego del nivel de precisión de los mapas. Se debe calcular un punto de equilibrio exacto entre el gasto económico y el trabajo computacional, con el fin de evitar resultados erróneos, retrasos y altos costos.

El resultado anterior se integra con mediciones de intensidad de señal, que realiza cada MS de la red, lo cual tiene además, la ventaja de tener en forma implícita la distribución de los usuarios; este método es más comúnmente utilizado por operadores que ya han desplegado sus redes y desean aumentar su capacidad o cobertura.

Plan de optimización y evaluación de desempeño. La evaluación involucra el cálculo para cada punto de referencia o *bin*, incluye RSS, la interferencia y la SINR, los cuales determinan las condiciones de operación y punto de referencia. También puede evaluarse el canal, junto con la estimación de la SINR y el rendimiento alcanzable. Para que el plan pueda ser mejorado y optimizado, la evaluación del rendimiento deberá retornar a fases previas. Esto incluiría un recalcu de la carga en las celdas, se volvería a planear la configuración del sistema y el plan de frecuencias, cambiaría la configuración de parámetros de las celdas tales como el *azimuth* de las antenas y su inclinación, ajustes en el umbral del *handover*, etc. También pueden ser usadas simulaciones de tráfico y del

scheduler en el transcurso en que los sistemas se vuelvan más complejos. Como la simulación a menudo puede consumir mucho tiempo, generalmente se realiza en la fase de verificación final.

Requerimientos adicionales para redes WiMAX. El impacto de las nuevas características de WiMAX radica en la estimación de la capacidad de celda requerida y planeación de frecuencia. La planeación de frecuencia en WiMAX no está limitada a la asignación de canales de frecuencia; realmente este es solo el primer estado en la planeación. De hecho, en esta fase, un gran conjunto de parámetros deben planearse. Comprende las siguientes partes:

- Planeación de las zonas segmentadas.
- Planeación de las zonas de uso pleno.
- Estimación del rendimiento para los usuarios cubiertos por cada celda.
- Planeación de la trama.
- Planeación de potencia.

Las zonas segmentadas son las zonas en las cuales las celdas usan solo una parte del ancho de banda del canal. Las celdas que se asignan a diferentes segmentos del espectro no interfieren con otras. En las zonas de uso pleno se establece la máxima capacidad, tales recursos en estas zonas pueden ser reusados por celdas vecinas. Para cada celda, se debe determinar el segmento que cada estación base tomará cuando opera en una zona segmentada, la secuencia preámbulo, las bases de permutación para las direcciones DL y UL, la secuencia usada por el piloto de modulación y la selección aleatoria de datos.

El rendimiento que un usuario puede disfrutar es altamente dependiente de la SINR, de las condiciones del canal y la capacidad de los equipos. Los requerimientos de recurso promedio por trama son una función del rendimiento y de la demanda del usuario final. En la fase de planeación no se puede conocer exactamente la demanda de usuarios, capacidad de los equipos y condiciones de operación por ubicación, sin embargo, asumiendo una distribución de los usuarios, la demanda global de usuarios y la capacidad del sistema pueden trasladarse dentro de una distribución específica de usuario por celda, la cual, en conjunto con la estimación de los *bin* dentro del área de cobertura de la celda, pueden usarse para estimar el requerimiento de recurso por celda; este requerimiento de recurso se necesita para el diseño de la trama. En sistemas TDD, los intervalos DL y UL deben ser conmutados simultáneamente en todas las celdas, para evitar interferencias entre estaciones base y entre estaciones móviles.

Lo mismo se aplica para zonas de uso segmentado y uso pleno. Aquellas zonas deberían asignar exactamente el mismo intervalo de tiempo en todas las celdas, para evitar interferencia entre zonas de uso pleno y zonas segmentadas. El proceso de diseño de la trama esta basado en la ubicación del punto de conmutación entre las zonas, y su objetivo es proveer recursos adecuados para cada zona de acuerdo a la demanda. Esto es un proceso iterativo, por lo cual la demanda de usuario por celda es particionada entre las zonas. La asignación de un usuario a la zona segmentada habilitará su operación con menos interferencia, pero esto requerirá mas intervalos de tiempo debido a que la estación base está limitada a un pequeño número de subportadoras. El movimiento de la

demanda a una zona de uso pleno permitirá reducir el número de intervalos de tiempo requeridos, pero el receptor quedaría expuesto a interferencias. Se espera entonces que los usuarios en el extremo de la celda sean ubicados en una zona segmentada, mientras que los no susceptibles a interferencias serán asignados a una zona de uso pleno.

Otra dimensión de planeación sería el ajuste de potencia. Básicamente esta es la función *scheduler*, sin embargo, en la fase de planeación es importante evaluar el efecto de ajustes de potencia. El procedimiento puede ser ejecutado reduciendo la potencia asignada a usuarios para los cuales la potencia asignada está por encima del umbral necesario para la modulación, o disminuyendo la potencia de transmisión total de la estación base, reduciendo con esto la interferencia a otras celdas. En el UL, reduciendo la potencia solo se puede reducir la interferencia causada a otros receptores de estación base.

Todos estos procesos están relacionados entre sí y dependen intrínsecamente. El proceso de planeación es usualmente iterativo; iniciando desde una cierta frecuencia y un plan de zona, puede calcularse la distribución SINR, y además, pueden estimarse las condiciones del canal, el rendimiento y los recursos requeridos por las celdas evaluadas.

3.1.1.3 Fase de Planeación de evaluación, verificación y optimización. El proceso de planeación es actualmente un proceso de bucle cerrado. La planeación se verifica y actualiza de acuerdo a una realimentación ofrecida por el medio, recibida a lo largo del tiempo de vida del sistema. Antes de un despliegue real, se hacen estudios de campo para verificar los datos usados en la planeación. Se llevan a cabo estudios para verificar la idoneidad del modelo de propagación.

Durante el despliegue y operación, se realizan un conjunto de ciclos de prueba y *test* de funcionamiento, con el objetivo de revisar la cobertura real y comparar esto con las predicciones de cobertura. Durante estos *test*, la intensidad de la señal de las celdas se mide en cada punto a lo largo del despliegue. Se equipa con dispositivos de navegación tales como receptores GPS⁶⁴, para proveer las coordenadas correspondientes y relacionarlas con la señal que se percibe en un punto específico.

Un uso típico del ciclo de pruebas es llevado a cabo para calibrar los modelos de propagación. En el proceso de calibración de un conjunto de parámetros, los modelos son ajustados para entregar una desviación mínima en comparación con las medidas. En puntos donde no se han realizado mediciones, se asumen los modelos de calibración para proveer predicciones mucho más exactas. La calibración se puede especificar para un área determinada mediante un conjunto de ciclos de pruebas robustas. Además, existen herramientas sofisticadas que pueden proveer modelos de calibración en secciones específicas de la celda.

Sin embargo, con la experiencia acumulada en operaciones de redes celulares, la mayoría de los operadores están de acuerdo con que el ciclo de pruebas es una técnica muy limitada para recolectar información sobre cobertura [3]. Los *test* de cobertura solo proveen información en las vías o en áreas públicas, donde se pueden ejecutar los *test* de funcionamiento. Hoy la mayoría de tráfico, es decir, entre un 70 y 80 por ciento es

⁶⁴ Sistema de posicionamiento global

producido desde CPEs⁶⁵, lejos de las vías. Además, servicios de datos tales como video, incrementan el tráfico entrante.

Una solución aceptable, debe proveer una eficiente y exacta herramienta para recolectar la información de cobertura en las CPEs. También se pueden leer reportes de estaciones móviles usando técnicas de ubicación, tales como GPS, GPS asistido, triangulación, etc., todo esto se define como un ciclo de pruebas virtuales, el cual extiende la capacidad del tradicional ciclo de pruebas y además refleja el uso del sistema por sus usuarios.

En muchos sistemas inalámbricos se envían reportes de estaciones móviles para informar problemas, tales como llamadas caídas. Se puede solucionar fácilmente dicho problema, ubicando la llamada caída y comparando las medidas con la base de datos de cobertura predicha.

La combinación de la predicción de cobertura, el ciclo de pruebas y las medidas de estación móvil permite la más completa evaluación de cobertura.

Aparte de la medición de la intensidad de la señal, es importante medir el flujo de tráfico. Como no siempre es homogéneo en una celda, se hace necesario distribuir la celda en clústeres. La información actualizada sobre tráfico y cobertura puede usarse para optimizar la red. El proceso de optimización puede verse y repetirse en el proceso de planeación, usando datos medidos y limitaciones impuestas por redes existentes.

Se recomienda usar indicadores de desempeño clave KPIs⁶⁶ para evaluar el desempeño de la red. Estos KPIs pueden incluir indicadores de acceso, indicadores de rentabilidad, indicadores de integridad, etc.

3.1.2 Desarrollos adicionales WiMAX. Incluye estos cinco desarrollos:

- Técnicas espaciales avanzadas.
- Femtoceldas, saltos y configuración en malla.
- Autoconfiguración.
- WiMAX cooperativo.
- Radio Cognitivo.

Técnicas espaciales avanzadas. Las técnicas espaciales avanzadas, tales como *beamforming*, cancelación de interferencia, diversidad extendida y multiplexación espacial, hacen uso del hecho que están presentes múltiples antenas en la estación base, estaciones móviles o en ambas. Las antenas inteligentes son descritas en el anexo F.

Diversidad de recepción y transmisión. Mejora el desempeño del enlace en condiciones de desvanecimiento y por lo tanto es reducido el margen de desvanecimiento que necesita ser tomado.

⁶⁵ Equipos de clientes locales

⁶⁶ Key Performance Indicator, indicador de rendimiento clave

Beamforming. Incrementa la ganancia de antena efectiva hacia un usuario requerido y disminuye la potencia radiada en otras direcciones. El impacto en la planeación es que se tienen que aplicar algunas estadísticas para determinar la dirección del haz, con el fin de estimar la interferencia causada por una estación base interferente a una estación móvil interferente, debido a que la dirección de transmisión no siempre es la misma.

Cancelación de Interferencia. El impacto de una determinada técnica en la planeación es altamente dependiente de implementaciones específicas.

SDMA. Establece el número de usuarios a ser servidos simultáneamente, usando los mismos recursos de frecuencia, mediante el uso de *beamforming* al usuario requerido y usando cancelación de interferencia a los usuarios no requeridos. El efecto en la planeación de la red es el incremento en el número de usuarios que una estación base es capaz de soportar. SDMA se trata con mayor profundidad en el Anexo F.

Multiplexación espacial. Usando técnicas de detección multiusuario, un receptor con múltiples antenas puede separar la transmisión que llega a este desde diferentes antenas de origen, hasta que el número de fuentes es menor o igual que las antenas del receptor y el medio con dispersión considerable, es decir, esto provee suficientes caminos independientes haciendo posible la separación. Las antenas pueden pertenecer al mismo transmisor, para incrementar el desempeño del enlace, o pertenecer a diferentes transmisores, así se establece un mejor uso del recurso radio debido al incremento en el número de usuarios. Las herramientas de planeación de redes pueden predecir las pérdidas de propagación y el nivel de interferencia, además, si el canal puede soportar multiplexación espacial, también pueden estimar las capacidades del sistema, de la celda y de la conexión cuando estas técnicas son usadas.

Repetidores y Redes en malla. Los repetidores y redes en malla cambian el paradigma de las redes celulares punto a multipunto dentro de una red distribuida y extiende el rango de soluciones de despliegue de la red. Los repetidores o *relays* extienden la cobertura de una celda más allá del alcance de la estación base. Hay muchos tipos de repetidores, pero se destacan dos tipos: repetidores en banda y fuera de banda, los repetidores en banda usan los recursos de la celda tanto para los enlaces entre la estación base y el repetidor, como para los accesos entre los receptores y el repetidor. El repetidor fuera de banda usa otros métodos⁶⁷ para conectarse con la estación base. Desde el punto de vista de las redes inalámbricas, el repetidor transforma el punto de transmisión al acercarse a las estaciones móviles, así permite una transmisión que supera los obstáculos, reduce la potencia de transmisión necesaria y la interferencia. Un repetidor en banda requiere que sean asignados muchos recursos entre la estación base y el repetidor, reduciendo la capacidad total disponible. Los repetidores pueden ser considerados como un medio adicional para el planeador, reemplazando costosas estaciones base, mientras la red aumenta la capacidad de tráfico en su zona de cobertura.

Las redes en malla usan estaciones suscriptoras para retransmitir información a otros usuarios. La información puede viajar en estas redes usando cualquier camino: entre usuarios o a través de estaciones base. En un extremo, las estaciones base sirven solo como puntos de acceso hacia Internet. En otros esquemas, la estación base sirve de

⁶⁷ Enlace microondas punto a multipunto, fibra óptica, etc.

controlador para el tráfico de las estaciones base dentro de la zona de cobertura. En otros casos el tráfico debe ser enrutado a través de la estación base en una topología en árbol, donde la estación base es la raíz de aquel árbol.

3.2 DETERMINACIÓN DEL ESCENARIO ACTUAL

La determinación del escenario actual es el punto de partida para el desarrollo de accesos móviles en redes WiMAX desplegadas. Esta sección busca ofrecer un conjunto de estrategias y procedimientos que ayuden al planeador a conocer con profundidad la red establecida, para el aprovechamiento de toda la capacidad que la red ofrece y minimizar la incertidumbre en el diseño y posterior despliegue de la red.

El análisis de una red ya establecida puede ofrecer información sobre la idea de negocio inicial, donde se plantean las expectativas que tuvo el operador a la hora de iniciar el proceso, el conjunto de cálculos, predicciones y planes que constituyen la base metodológica para desplegar la red, y la evaluación y mejoras realizadas que están íntimamente relacionadas con las condiciones internas y externas de la red; así mismo, el análisis global de este proceso permite contrastar las premisas iniciales con los resultados finales, con el fin de construir y/o adaptar modelos particulares que estén íntimamente adaptados al escenario de implementación. La meta de esta primera serie de estrategias y procedimientos es encontrar una información sólida que le permita al operador, tener herramientas de apoyo para la toma de decisiones.

A continuación se expone el conjunto de estrategias y procedimientos antes mencionados con el fin de conocer y analizar, la historia, proceso de despliegue y desempeño de la red actual WiMAX fija.

Mercado. El inicio de cualquier tipo de negocio está fundamentado en el conocimiento del mercado. La viabilidad de un negocio está determinada por el nivel de ganancias, la velocidad de retorno de la inversión, permanencia en el tiempo, etc; esto hace que sea el estudio de mercado, el punto de partida para el establecimiento y despliegue de cualquier negocio de telecomunicaciones. Por lo tanto, para el estudio del escenario actual es importante conocer la idea de negocio inicial y los estudios que se llevaron a cabo, previos a la planeación y despliegue de la actual red. Estos datos permiten alimentar el proceso de adecuación de la red debido a que poseen elementos para el conocimiento del mercado, y podrían complementar los estudios de mercado requeridos para la adaptación.

Algunos parámetros para el análisis de mercado son expuestos en el Anexo G.

Modelo de negocios. Los modelos de negocio son planes que permiten la introducción de la tecnología para el ofrecimiento de servicios. Los modelos determinan la forma en que el negocio operará y crecerá, así mismo determina el comportamiento de todo el proyecto y el orden de los procesos técnicos para el diseño, ejecución y mejoramiento. Para el caso colombiano el modelo usado actualmente es el modelo centrado en datos. En muchas economías en desarrollo, este modelo es la mejor opción para desarrollos iniciales. Debe reconocerse que el crecimiento de la banda ancha en muchas regiones ha sido modesto y hay demanda por parte del sector comercial y usuarios del hogar por conectividad basada en calidad de servicio. En tales casos, el número de suscriptores puede ser estimado mediante la cantidad de usuarios, multiplicada por la cantidad de

ancho de banda requerida por cada uno. La capacidad del sector en TB por mes es la vía más razonable para estimar la capacidad del sistema.

Servicios. En la actualidad y para efectos de cualquier tipo de cálculo, en Colombia ninguna red WiMAX ha implementado servicios diferentes a datos en sus redes, por tal razón el estudio se reduce al análisis del servicio de transmisión de datos IP en redes WiMAX. El potencial de servicios en redes WiMAX fija puede extenderse al ofrecimiento de VoIP fijo, sin embargo ninguna de las empresas ha extendido su modelo de negocio con el fin de ofrecer este tipo de paquetes a los usuarios.

Espectro. La banda de 3.5GHz es una banda licenciada en Colombia para su uso dentro del territorio nacional en sistemas de comunicación inalámbricos banda ancha fijos y es la banda más usada mundialmente en redes WMAN. De acuerdo a los perfiles iniciales de sistema WiMAX solo existe dos opciones de implementación en frecuencia, subcanalización a 3.5 MHz o 7 MHz y dos modos de configuración TDD o FDD, para un total de 4 perfiles en la banda de 3.5 GHz. Las CPE WiMAX usadas actualmente soportan las cuatro configuraciones, se hace necesario entonces revisar la configuración propia del sistema para la determinación del modo de operación.

Las posibilidades de configuración de un sistema WiMAX en Colombia, con respecto a las bandas usables por WiMAX, están definidas por el gobierno nacional mediante la Resolución 2064 de 2005 que establece tres tipos de casos: permisos de uso nacionales, permisos de uso departamentales, y canal de uso reservado.

En el caso de los operadores nacionales de larga distancia internacional, que cuentan con licencias nacionales, es el caso de UNE, ETB y TELECOM, cuentan cada uno, con canales de 21 MHz, para un total de ancho de banda del canal de 42 MHz, tal como se mostró en la tabla 2.2.

Los operadores departamentales, que poseen permisos para zonas específicas, delimitadas territorialmente de acuerdo al mapa político por departamentos, cuentan con dos canales de 14 MHz, es decir, un total de 28 MHz de ancho de banda de canal.

El canal de reserva, es el más pequeño de los tres y cuenta con dos canales de 8 MHz, es decir, un canal de 18 MHz para UL y DL.

Debido a que los equipos, de acuerdo a los perfiles de sistema WiMAX fijo, pueden ser de 3.5 MHz o 7 MHz, las bandas de frecuencia asignadas por Colombia permiten hacer división exacta del canal en 6 canales de 7 MHz o 12 canales de 3.5 MHz para operadores nacionales, ó, 4 canales de 7 MHz o 8 de 3.5 MHz para operadores departamentales.

Como se mencionó en el capítulo uno la capa física de WiMAX fijo, para todos los casos está basada en el uso de 256 subportadoras FFT, por lo tanto y para efectos de todos los análisis se considerará cualquier red WiMAX fija solo se usará 256 FFT.

En la tabla 3.1 se establecen algunas configuraciones típicas para Colombia. Es necesario que el diseñador de la red complete con las características y formas antes mencionadas. En el Anexo E se explica la forma de calcular la velocidad de datos bruta.

Tabla 3.1. Velocidades de datos en WiMAX fija, operando en la banda de 3.5 GHz

Modulación	Velocidad de código FEC	Bits codificados por subportadoras	Bits codificados por símbolo OFDM	Velocidad de datos bruta (Canal de 3.5 GHz) Mbps (a la velocidad de símbolo de 13.8K simbseg)	Velocidad de datos (Canal de 3.5 GHz) Mbps (a la velocidad de símbolo de 13.8K simbseg)
BPSK	1/2	1	192	2.65	1.3
BPSK	3/4	1	192	2.65	2.0
QPSK	1/2	2	384	5.30	2.6
QPSK	3/4	2	384	5.30	4.0
16 QAM	1/2	4	768	10.60	5.3
16 QAM	3/4	4	768	10.60	7.9
64 QAM	3/4	6	1152	15.90	11.9
64 QAM	5/6	6	1152	15.90	13.2

Consideraciones demográfica. Los modelos de propagación que se proponen cubren tres tipos de terrenos. A, B y C. Siendo A la categoría con mayores pérdidas y C el caso con menos pérdidas en el trayecto. A se usa principalmente para zonas urbanas, B para suburbanas y C para rurales, sin embargo, debe considerarse los casos en los que por las mismas condiciones topográficas, vegetación, etc, una zona rural puede ser considerada como A. El análisis de las condiciones del terreno es un factor importante a la hora de diseñar la red.

3.2.1 Análisis de Cobertura. El análisis de cobertura sigue siendo el paso fundamental en el diseño de cualquier red. Debe determinarse por lo tanto el modelo de propagación a usar para cada escenario. Así mismo los datos inherentes al espectro, la subcanalización de UL y codificación. Debe determinarse además si la red actual utiliza diversidad en transmisión y recepción, y alguna otra característica adicional posible en WiMAX fija. La sensibilidad del equipo receptor para todos los esquemas de modulación ofrecidos por WiMAX se obtienen de la base de datos del equipo o por medio de cálculo de los valores SNR que se basan en esquemas de modulación específicos de una antena bajo determinadas condiciones de canal⁶⁸, junto con las pérdidas asumidas del equipo usado y su implementación. El cálculo de enlace especifica el máximo valor de pérdida en el trayecto entre la BS y el SS, es decir, muestra el límite al rango de las celdas para diferentes configuraciones con el fin de mantener un UL y DL balanceado.

3.2.2 Análisis de Capacidad. Como se explicó anteriormente, los despliegues pueden ser de rango limitado o capacidad limitada. En el caso de rango limitado, la red tiene determinado los porcentajes de usuarios activos que operan en cada modulación. En el caso de capacidad limitada se tiene una distribución que se basa en el tipo de usuario, la descripción del servicio y el factor de reuso.

3.2.3 Análisis de Celda. Dependiendo de la complejidad, la capacidad y la cobertura, el sistema puede tener un reuso de frecuencia de uno, tres o siete. Para la revisión del sistema, la nomenclatura a usar es la siguiente (c,s,f) donde c es el número de clústeres, s es el número de sectores por celda, y f el número de frecuencias por clúster. Estos tres factores definen toda la configuración de la frecuencia en el sistema.

⁶⁸ obtenidos de la simulación a nivel de enlace

3.2.4 Análisis de la Arquitectura de la Red. La figura 3.4, resume las partes principales y los componentes específicos que integran una red WiMAX. Para las redes WiMAX existentes en Colombia, solo aplican algunos módulos. Es necesario desarrollar un esquema que divida la red desplegada, dentro de estas tres partes principales, y así dar una descripción transversal de la red. La descripción de arquitectura debe contar con la clasificación de cada uno de los equipos, con las características técnicas dadas por el fabricante, las configuraciones realizadas por el operador, cantidad de equipos y las mediciones de desempeño obtenidas. También se describen las distintas interfaces que conectan la red, el modo de conexión y su jerarquía, es decir la topología de la red.

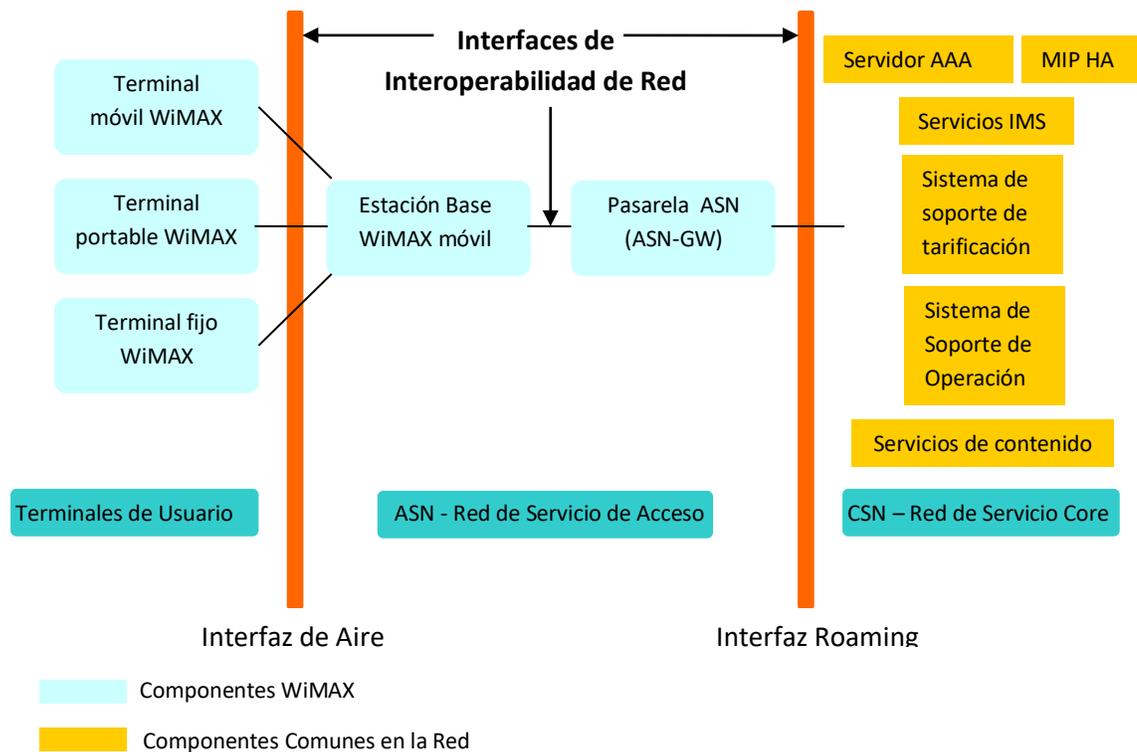


Figura 3.4. Arquitectura General de la Red

3.3 DETERMINACIÓN DE LA NECESIDAD

Actualmente, la planeación de redes cuenta con un conjunto de herramientas software, para cada una de las etapas, que le permiten definir y determinar cada una de las fases propuestas en esta sección. Sin embargo, es importante que el planeador conozca de primera mano, cuales son los datos que está manipulando, el origen y la lógica de estos, y de esta forma pueda comprender con exactitud el proceso de despliegue de una red inalámbrica WiMAX móvil.

Este documento no busca ser una guía cuantitativa para el desarrollo de estos procesos, cada uno con una complejidad definida; pretende ser una guía cualitativa que ayude al operador en el complejo proceso del despliegue de una red, mediante un conjunto de pasos bien definidos.

3.3.1 Mercado. Se considera el punto de partida el inicio del proyecto. A continuación se sugieren algunos aspectos de estudio, el planeador es libre de, de acuerdo a las circunstancias, determinar cuáles de éstos son los más convenientes para su estudio.

- Información del país, región y áreas. Esta sub fase describe aspectos antropológicos que incluyen: Economía, población, PIB, etc., factores culturales, sociológicos, familia, educación, idioma, religión, actitudes hacia el trabajo y los productos. Geografía y política. Esto nos permite hacer la clasificación del mercado dentro de los parámetros que en la sección anterior se definieron.
- Información para los tipos de servicio. Nos permite adaptar los servicios a las necesidades del entorno, e incluye:
 - Información de mercado: estadísticas comerciales, perfiles de consumidor, producción interna y regulaciones.
 - Información de servicio: Consumo, precio, ubicación.
 - Publicidad, medios de prensa, costos.
 - Situación competitiva, servicios sustitutos y complementarios.
 - Estructura del mercado.
 - Competencia: fuerza de ventas, tamaño, método de ventas.
- Pronósticos: Donde se analizan las tendencias sociales, de crecimiento demográfico, de comportamiento, antropológicas, económicas, etc.

Las fuentes de información de los datos antes enumerados pueden obtenerse por fuentes primarias o secundarias:

- Primarias: DANE, MINTIC, CRC, CINTEL, gobierno nacional, etc.
- Secundarias: Empresas de consultoría, información propia de la empresa.

El resultado de la actividad debe ser la obtención de un informe y mapas que describan:

- Perfiles de usuario: Ubicación, servicios demandados, tipo de usuario.
- Competencia: Operadores clasificados por tipo de red, por servicios, cobertura.
- Segmentos: Comercial y/o industrial, PYMES, residencial, gobierno.
- Estructura: Urbana, suburbana, rural.
- Escenarios: Densidad demográfica, topografía, etc.

Con el fin de conocer a fondo el mercado donde se plantea el despliegue.

Modelos de negocios. El hecho de integrar accesos móviles a redes fijas WiMAX implementadas, define un conjunto de modelos de negocio que rompen los esquemas actuales y que son la base fundamental de FMC. Es necesario entonces cambiar el modelo actual y que se guíe por los datos de nuevos modelos que sean incluyentes y permitan una amplia gama de posibilidades para la red. Cada perfil de usuario a atender, requiere de un nuevo modelo de negocio, con características y servicios especialmente diseñados a la medida de sus necesidades. Aunque no son definitivos, los modelos que se plantean a continuación pueden servir de ejemplos. Cada operador es libre de escoger el modelo que mejor se ajuste a sus perspectivas, pero se considera de vital importancia

el desarrollo de éstos, pues define todas las acciones a seguir para todos los departamentos de la empresa. Los modelos son:

- Modelo “*Me-centric*”: Modelo Nokia Siemens; basado en el punto de vista personal; para soporte de aplicaciones, definido para usuarios profesionales que requieren movilidad y altos requerimientos de ancho de banda. Orientado al usuario individual: con *mi* lista de contactos, *mi* información de contacto, *mi* agenda, *mis* perfiles⁶⁹, *mis* mensajes, *mi* método de comunicación preferido, *mi* Internet, *mis* fotografías y video clips recibidos y compartidos, *mi* fondo de pantalla, *mi* música, etc [69].
- Modelo “*User-centric*” o centrado en el usuario: Modelo Alcatel Lucent, basado en el punto de vista del operador; plantea la posibilidad de soporte cuádruple play para el ofrecimiento de portafolios a nivel de servicio, y no a nivel de infraestructura de red, con los siguientes beneficios: Paquete de servicios a la medida del cliente, integración en la atención al cliente, unificación y servicios enriquecidos [70].
- Modelo “*Office-based*”: Modelo CISCO, basado en el punto de vista de la empresa; define una separación entre las opciones del dispositivo de usuario y las aplicaciones, es decir, mediante una arquitectura *all-IP*, el usuario podrá obtener comunicación de cualquier tipo sin importar el dispositivo que esté usando. Plantea además la posibilidad de uso de otro tipo de redes cuando no esté dentro del área de cobertura, mediante convergencia a nivel de servicios [71].

Los modelos están acompañados de tablas donde se especifican características tales como: modalidades de acuerdo de nivel de servicio, precios y requerimientos de ancho de banda, etc.

Servicios y aplicaciones. La posibilidad de FMC en WiMAX a nivel de arquitectura de red posibilita la convergencia de servicios. Los servicios a ofrecer son:

- Voz fija y móvil.
- Datos fijos y móviles.
- Video fijo y móvil.

En algunas empresas se usa el término cuádruple play, para definir la integración de voz, datos, video, y móvil, sin embargo hoy por hoy la movilidad debe ser tenida en cuenta como elemento que diversifica, junto con la modalidad fija, el portafolio del operador.

Los resultados finales de esta fase para nuestro diseño son entre otros: los requerimientos de capacidad de TB por mes, los proveedores de servicio a contratar, la configuración interna del *core* de la red, proyecciones de ingresos mensuales, distribuciones de los distintos tipos de usuario en el escenario, densidad demográfica, segmentos de mercado, mapas de cobertura requerida, y escenario de implementación.

⁶⁹ Facebook, hi5, badoo, etc.

3.3.2 Cobertura. El análisis de cobertura de la red actual, realizado en la sección anterior, permite determinar las zonas de cobertura de acuerdo al tipo de modulación y densidad de usuarios. A su vez se cuenta ya con un mapa de cobertura requerida, por lo cual, el proceso siguiente es comparar los dos mapas y determinar las zonas en intersección. En el evento que la zona de cobertura requerida esté por fuera del área de cobertura fija, deberá pensarse en la extensión de la red fija con el fin de alcanzar los requerimientos; esto debido a que la base que soporta toda la solución es la red fija y debe tener un cubrimiento total en el área de acción. La cobertura es afectada por factores internos y externos que afectan el enlace, así como la velocidad de movimiento o ubicación del usuario. El punto final de los requerimientos de cobertura es un mapa detallado donde se muestran los distintos *bin*, debidamente clasificados de acuerdo al modelo de negocio, con áreas identificadas que se relacionen específicamente a los modelos de negocio a establecer.

3.3.3 Capacidad. Para la determinación de la capacidad es útil el cálculo de la densidad de datos, expresada en Mbps por Km², determinando la densidad de datos requerida para los distintos segmentos de cobertura. Otras clasificaciones que se deben tener en cuenta son [72]:

- Nivel de consumo de los distintos usuarios, para lo cual se definen tres tipos: Usuario profesional, intermedio y casual.
- Edad, que reduce el universo poblacional al rango de posibles consumidores.
- Madurez del mercado, que implica el nivel de requerimiento de los distintos usuarios.
- Efectos de la movilidad, las horas pico, la ubicación y el *roaming*.

De los anteriormente mencionados, la hora pico es la que más desafíos representa al operador debido a que es un valor fluctuante y debe ser obtenido de diversas observaciones; para este estudio se menciona el factor pero no se tendrá en cuenta debido a que es en el transcurso de la operación y el mantenimiento cuando se logra hacer este tipo de ajustes. El resultado es determinar el porcentaje de movilidad de los usuarios entre zonas.

3.4 PLAN DE LA SOLUCIÓN

3.4.1 Arquitectura. Este constituye el resultado del estudio y plantea distintas soluciones para los requerimientos enunciados anteriormente. El esquema actual de arquitectura se describe en la figura 3.5.

La escogencia de equipos es el paso inicial a la hora de diseñar una red, para lo cual se hace necesario tener a la mano el informe final sobre el análisis de la arquitectura de red existente. Los equipos pertenecientes al *core* son comunes a todas las redes y no tienen diferencia alguna entre las versiones, sin embargo, no ocurre así con la red de acceso y usuarios terminales, por lo tanto, se definen un conjunto de posibles opciones de implementación, dependiendo de las características de los equipos en funcionamiento, con las premisas de ahorro en los costos y continuidad en el servicio a los suscriptores:

Caso 1. Las estaciones base y los dispositivos de usuario están en modo WiMAX fijo y no permiten su actualización: Acá se debe pensar en la opción red coexistente WiMAX fija móvil, de esta manera, la red fija operará en paralelo con la red WiMAX móvil. Esto permite al operador ofrecer tanto accesos fijos como móviles en la misma área, pero requerirá que los suscriptores tengan los dos tipos de dispositivos de usuario, si desean tener acceso a ambas redes.

Caso 2. Las estaciones base pueden actualizar su software y los CPE son duales y/o actualizables. En estos casos la opción es red actualizada WiMAX. De esta forma se actualizan las estaciones base y CPE donde se requiera ofrecer accesos móviles.

Caso 3. Las estaciones base son duales y los CPE son solo WiMAX fijo. Este es el caso red dual WiMAX fija móvil, donde la estación base divide el canal disponible entre los dos modos, o soporta ambos modos en el mismo canal, alternando tramas IEEE 802.16d-2004 e IEEE 802.16e.

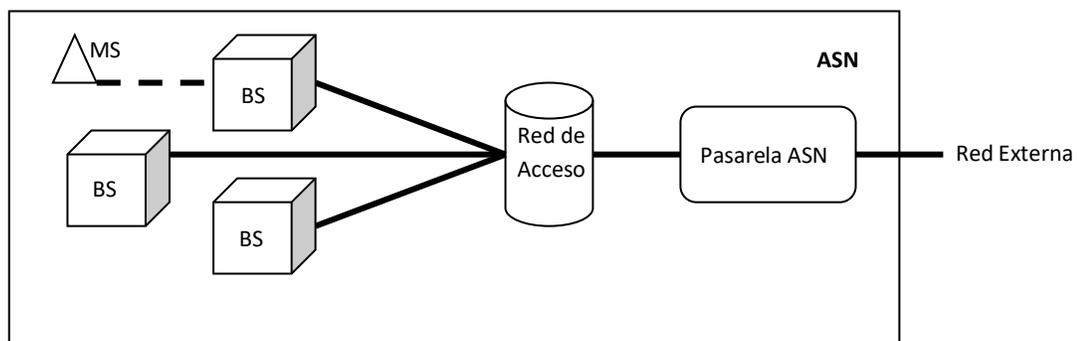


Figura 3.5. Red de servicio de acceso – ASN, diagrama en bloques de red WiMAX

3.4.2 Core de la Red. Debido a que es necesario soportar movilidad y diversos tipos de servicios, se debe ampliar las funciones, tanto en ASN como CSN, con el fin de permitir movilidad y nuevos servicios. En los NAP se debe realizar los cambios que permitan tolerar movilidad con el fin de permitir a las estaciones base soportar accesos móviles, esto se tratará con mayor profundidad más adelante. En los NSP se deben incluir todas las funcionalidades necesarias con el fin de proporcionar todos los servicios que han sido definidos en los modelos de negocio de la empresa.

Adaptaciones en NSP. Los cambios que se deben realizar en el NSP, son los siguientes:

Establecimiento de conexiones ASP. En este paso, el NSP es suscrito a diversas redes externas o ASP que proveerán a la red de los servicios que se quieren distribuir y comercializar, tales como: redes de televisión, redes PSTN, redes 3G, Internet, etc. La estructura se muestra en la figura 3.6.

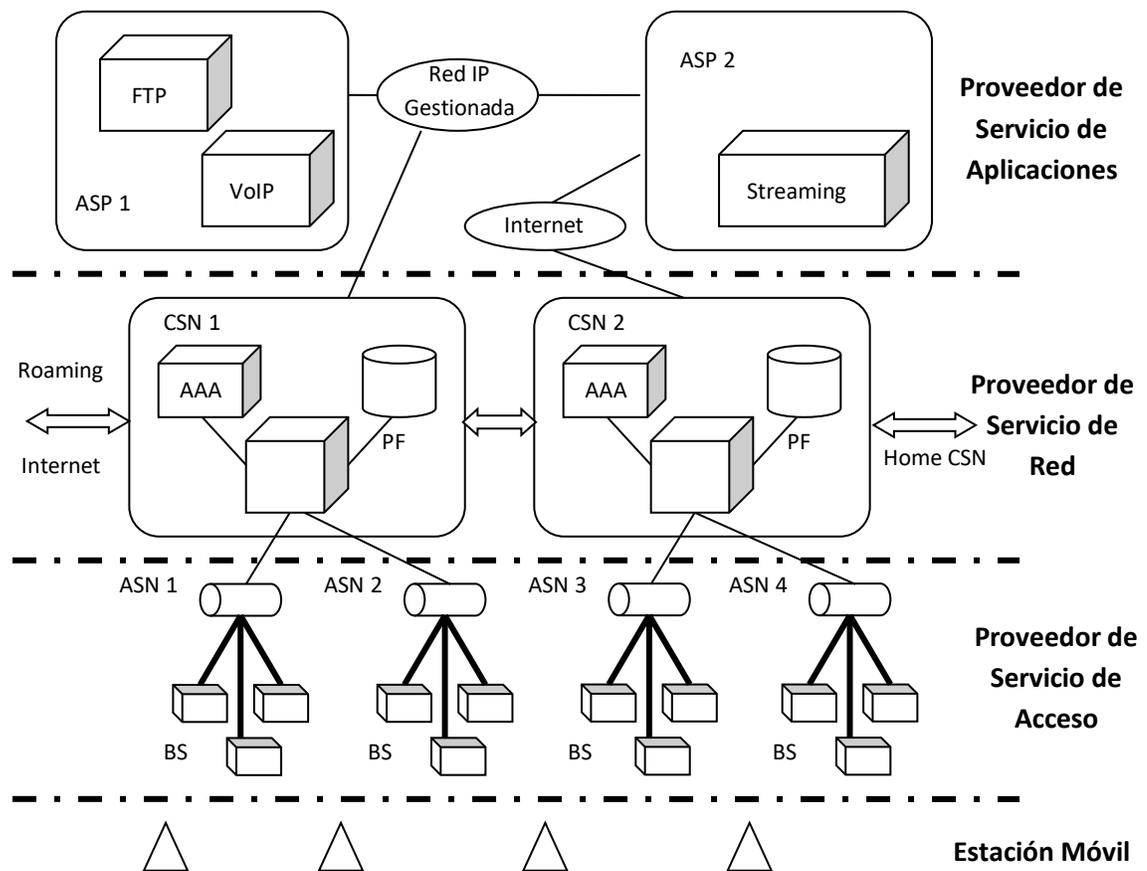


Figura 3.6. Arquitectura de red de WiMAX móvil

Establecimiento de servicios complementarios y movilidad: El NSP debe desarrollar y soportar, movilidad y servicios específicos, mediante las configuraciones establecidas del NMR y el uso de servidores dedicados a estas tareas, tal es el caso de *multicast* o *broadcast*.

IMS. WiMAX móvil tiene en la actualidad muchos de los mecanismos de IMS tales como, control de sesión, DHCP, etc.; tiene sus propios servidores AAA y soporta información de locación de hogar. Sin embargo, en la vida real, WiMAX necesita interactuar con la red 3G, por lo tanto IMS por ser una arquitectura lista para operar, que se integra perfectamente con WiMAX, permitirá una integración eficiente con el mundo externo, a su vez que permite que ofrecer mejoras substanciales en la calidad de servicio a los usuarios. Aunque se podría decir que no es necesaria la presencia de IMS, la verdad es IMS podría ser un factor determinante que ayude en la evolución de la red y en el desempeño del sistema.

Adaptaciones en NAP. El NAP, integrado por uno o más ASN, debe adaptarse con el fin de soportar las siguientes funciones:

- Conexión con la estación móvil incluyendo establecimiento conectividad de las capas PHY y MAC.

- Proveer *handover* y *roaming*.
- Proveer AAA para el usuario en conjunto con la red de hogar del usuario; el ASN soporta *proxy* AAA.
- Proveer conmutación entre ASN y redes externas.

3.4.3 Equipos. Teniendo en cuenta los requerimientos a nivel de arquitectura de red, se debe buscar el hardware necesario. Se lista el conjunto de posibles elementos para el desarrollo de esta adecuación:

- Estaciones base⁷⁰
- ASN-GW
- CPE⁷¹
- Servidores
- Routers
- Antenas
- Software

Es necesario hacer un estudio de los equipos a que se encuentren en el mercado, sus características técnicas, precio, etc. Estos datos son necesarios para cálculos posteriores y presupuesto para el estudio técnico-económico.

3.4.4 Ancho de Banda. Para el caso 1 se recomienda la división proporcional del ancho disponible de acuerdo a la comparación cuantitativa de la capacidad y cobertura requeridos, con la suma de estos factores en la red WiMAX fija y los requerimientos del backhaul de la red superpuesta móvil, y de esta forma se distribuye el espectro disponible en las zonas donde las dos redes poseen intersecciones.

Para caso 2 y 3 se usa el arreglo en la trama. En estos casos la estación base maneja ambas versiones, por tal razón, la BS debe de forma autónoma generar la distribución del recurso de forma proporcional a los requerimientos. La explicación técnica se encuentra en el Anexo H.

3.4.5 Antenas inteligentes y SDMA. Después de la distribución de ancho de banda se deben realizar acciones para aumentar la capacidad. El uso de antenas inteligentes y SDMA, ambas mejoras soportadas por WiMAX, son una mejora substancial para el sistema pues en determinadas condiciones puede duplicar la capacidad del sistema. Este es un procedimiento que se debe tener en cuenta debido principalmente a la reducción en el ancho de banda del canal. Información complementaria sobre el tema se encuentra en el Anexo F.

Mediante antenas inteligentes, para usuarios fijos se logra duplicar el sistema. Para usuarios móviles se logra disminuir considerablemente la probabilidad de bloqueo, a medida en que el porcentaje de usuarios móviles incrementa, así mismo la caída de llamadas se reduce debido a la reducción del SINR de los usuarios. Es importante que el planeador de la red determine los puntos donde usará antenas inteligentes y mediante el

⁷⁰ Macroceldas, microceldas, picoceldas, femtoceldas, repetidoras.

⁷¹ Fijos, PCIMA, USB, PDA, etc.

uso de la información dada por el fabricante determine las mejoras específicas brindadas por SDMA con antenas inteligentes. Esta solución es aplicable para todos los casos estudiados.

3.4.6 Red Multisalto. Las redes multisalto han sido propuestas como una solución para extender la cobertura de una estación base. En algunos casos la implementación de redes multisalto ocasiona una degradación en la capacidad del sistema WiMAX, pues al incrementarse el número de saltos la capacidad de acceso que el usuario puede alcanzar decrece dramáticamente. Sin embargo, si esta solución se combina con esquemas de modulación de alto nivel y codificación turbo, puede mejorarse la capacidad alcanzable del sistema. Para lo cual se recomienda que el procesamiento de las estaciones repetidoras debe ampliarse para soportar 64QAM-3/4 en el enlace de salto y que el número debe ser como máximo tres con el fin de no deteriorar la capacidad en los saltos.

La red multisalto es ideal para el caso 1, debido a que puede establecer nodos WiMAX móvil cuyo *backhaul* sea soportado mediante WiMAX fijo.

Para los casos 2 y 3, permite el uso de estaciones repetidoras en puntos donde la red no llega, o donde el mercado exija movilidad de alto nivel.

El objetivo del presente capítulo fue la descripción teórico práctica de un conjunto de estrategias y procedimientos para la adaptación de las redes WiMAX fijas, debido principalmente a que en Colombia, debido a razones de diferente índole se ha desaprovechado la tecnología, relegándola solamente a ser simple competidor de DSL o cable. Estos pasos son una ayuda al planeador de red, que tiene la misión de, usando todas las herramientas de tipo software, realizar todos los cálculos pertinentes pero no encuentra la manera adecuada de realizar estos procedimientos. Con este tercer capítulo se da por cumplido el segundo objetivo de enunciado en el anteproyecto: "Proponer estrategias y procedimientos técnicos de arquitectura de red para la coexistencia de redes WiMAX fijas y WiMAX móviles en Colombia."

4. CASO DE APLICACIÓN

En este capítulo se lleva a cabo la proposición de los criterios necesarios para la coexistencia de redes WiMAX fijas y móviles, tomando como referencia el despliegue WiMAX fijo existente en la ciudad de Neiva en el Departamento del Huila. Se evalúa el escenario actual del mercado y la tecnología, se crea el modelo de negocios, y se determinan los procedimientos a seguir para el soporte del portafolio del modelo.

4.1 SELECCIÓN DEL ENTORNO

Para dar inicio a la propuesta de una red convergente WiMAX fija y móvil, se seguirán los pasos mencionados en el tercer capítulo a partir de la Determinación del Escenario Actual.

Los factores que influenciaron la selección de Neiva para la propuesta de aplicación de criterios para la coexistencia de redes WiMAX, son:

- La ciudad de Neiva cuenta con despliegues WiMAX fija
- Esta ciudad cuenta con buenas expectativas de mercado a mediano y largo plazo
- Neiva posee un porcentaje de conectividad por habitantes bajo
- La ciudad cuenta con variadas zonas de ubicación de la población: urbana, suburbana y rural
- El escenario de implementación es un terreno con ondulación leve, de lluvias moderadas, escasez de vegetación y densidad de área metropolitana media y baja.

4.1.1 Descripción del escenario. Neiva, capital del Departamento del Huila, es uno de los 23 municipios en Colombia que cuentan con despliegues WiMAX fijo para dar solución a accesos banda ancha. Cuenta con 354.385 habitantes, con una densidad de población de 230 habitantes por kilómetro cuadrado y una extensión de 46 kilómetros cuadrados en zona urbana, de los 1.553 kilómetros cuadrados totales del municipio que incluye zonas rurales.

El municipio se clasifica dentro de los mercados en desarrollo. Posee un único proveedor de servicios de banda ancha a través de WiMAX que es UNE EPM Telecomunicaciones, al igual que la mayoría de municipios del país.

Este municipio cuenta actualmente con 23.496 suscriptores de Internet, de los cuales 17.364 acceden mediante banda ancha y 6.132 mediante banda angosta. El principal operador es Colombia Telecomunicaciones S.A. E.S.P con 16.714 suscriptores accediendo a Internet mediante xDSL, así que la tendencia del mercado dominante es el acceso a Internet a través de dicha tecnología.

Neiva, por ser capital de Departamento, sirve como punto de convergencia para el comercio entre los municipios del resto del Departamento y sirve como plataforma de comercio para los Departamentos de Caquetá y Putumayo con el resto del país.

Neiva cuenta con una pequeña zona industrial ubicada en la periferia sur de la ciudad, posee pequeños, medianos y grandes establecimientos comerciales ubicados en el centro de la ciudad, además, la ciudad cuenta con un cubrimiento educacional que comprende varios establecimientos educativos en las 10 comunas compuestas por los 316 barrios; posee extensas zonas residenciales en la zona nororiental y varios complejos de edificios de apartamentos u oficinas ubicados en sectores específicos, como la Avenida la Toma o el centro de la ciudad. Por lo cual, en su estructura de mercado, se considera especialmente la zona urbana.

Esta ciudad, como el resto de ciudades del país, cuenta con un modelo de negocios centrado en la prestación de servicios de datos a través de las diferentes tecnologías de acceso a Internet.

4.1.2 Parámetros del sistema. Como se mencionó en el capítulo dos, los despliegues WiMAX realizados por UNE EPM Telecomunicaciones, en el territorio Colombiano y en particular en Neiva, utilizan dispositivos de la marca *Nokia Siemens Networks*, siendo estos: Estación Base *WayMAX@vantage* y Estación Suscriptora *Gigaset SE 471 y SE 461*, que cuentan con las características técnicas mencionadas en el Anexo B. Las características seleccionadas son:

- Banda de frecuencia: 3.5 GHz
- Banda A = 3400 MHz – 3421 MHz, Banda A' = 3500 MHz – 3521 MHz
- Frecuencia disponible de operación: 42 MHz
- Ancho de banda por estación base: 7 MHz
- División del canal dos bandas de 3.5 MHz
- Duplexación TDD
- Topología punto a punto y punto a multipunto
- *Backhaul* fibra óptica
- Ganancia de la antena en recepción 7 dBi
- Ganancia de la antena de transmisión 18 dBi
- Máxima potencia en la estación base hasta 35 dBm por elemento
- Potencia máxima de salida a la antena en la estación suscritora 27 dBm
- Modelo de propagación COST 231 suburbano
- La ganancia en todo el sistema de recepción es de 164 dB
- La ganancia de los CPE *indoor* es de 158 dB⁷²
- Perdidas en el trayecto de las CPEs *indoor* es de 15 dB
- Condiciones de propagación ideales: urbanas, suburbanas y rurales, con el 100% de usuarios NLOS
- Despliegue de rango limitado
- Soporte de todas las modulaciones y todos los niveles de QoS.

4.1.3 Parámetros de mercado. En Neiva, de los 613 usuarios que cuentan con acceso a Internet mediante WiMAX fija, 583 pertenecen al sector residencial, mientras que los restantes 30, pertenecen al sector corporativo de la ciudad. Por lo tanto, se establece que la mayor demanda de servicios de banda ancha a través de WiMAX se lleva a cabo por

⁷² Es inferior a la *outdoor* debido a la ganancia de la antena

usuarios residenciales. WiMAX representa el 2.6% del universo total de usuarios con acceso a Internet en el municipio.

UNE EPM Telecomunicaciones desea ampliar la cantidad de suscriptores a Internet mediante WiMAX. Posee dos modelos de negocio, uno Internet residencial y el otro Internet empresarial. La compañía además, pretende orientar la prestación de sus servicios exclusivamente a la zona urbana del municipio.

4.1.4 Modelo de propagación. El modelo de propagación utilizado es el COST 231 HATA y las pérdidas debido a la penetración en ambientes *indoor* se estima alrededor de 15 dB.

4.1.5 Cobertura. Neiva actualmente cuenta con tres celdas de 1.8 kilómetros de radio aproximadamente, logrando una cobertura total de 30 kilómetros cuadrados, dando como resultado un 66 % de cobertura en la zona urbana.

4.1.6 Capacidad. El sistema WiMAX está sub utilizado, La estación base tiene una máxima capacidad de 320Mbps en todo el canal, donde la relación de está dado por el factor 3:1 en DL UL, de tal forma que el sistema puede ofrecer una capacidad en el enlace de bajada de 240 Mbps.

La capacidad demandada se muestra en la figura 4.1:

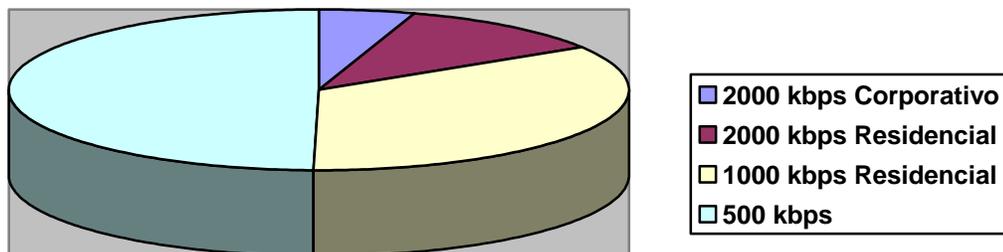


Figura 4.1. Capacidad demandada

La capacidad contratada tiene SLA corporativo con un factor de reuso 1:1 y un SLA residencial con factor de reuso 4:1, como se muestra en la tabla 4.1.

Tabla 4.1. Reuso de acuerdo al perfil y número de suscriptores

Perfil	Ancho de banda contratado	Reuso	Número de suscriptores	Total
Corporativo	2000 Kbps	1:1	30	60 Mbps
Residencial	2000 Kbps	6:1	68	23 Mbps
Residencial	1000 Kbps	6:1	210	35 Mbps
Residencial	500 Kbps	6:1	305	26 Mbps
CAPACIDAD TOTAL CONTRATADA CON USUARIOS				144 Mbps

Frecuencia. Es una macrocelda (1,4+1,1).

4.1.7 Arquitectura de Red. Los equipos que posee actualmente son enumerados a continuación:

Terminal de usuario:

- Estación Suscriptora *Gigaset SE 471*
- Estación Suscriptora *SE 461*
- Antena *outdoor*

NAP:

- Estación Base *WayMAX@ventage*
- Antena de estación base
- Backhaul óptico
- Acceso a Internet
- Repetidor WiMAX

NSP:

- BRAS
- AAA
- Billing
- DHCP/DNS
- HA

En el anexo B se especifican todos los *datasheet* de los equipos mencionados anteriormente.

4.2 DETERMINACIÓN DE LA NECESIDAD

4.2.1 Mercado. En la figura 4.2, se muestra la ubicación de las zonas comerciales e industriales en la ciudad de Neiva. El casco urbano del municipio actualmente cuenta con una gran zona industrial en el sur de la ciudad y un pequeño sector de industrias en la parte norte. Mientras que para el sector comercial, existe una zona predominante ubicada

en el centro de la ciudad y otras pequeñas zonas comerciales ubicadas en la parte norte cerca del aeropuerto.

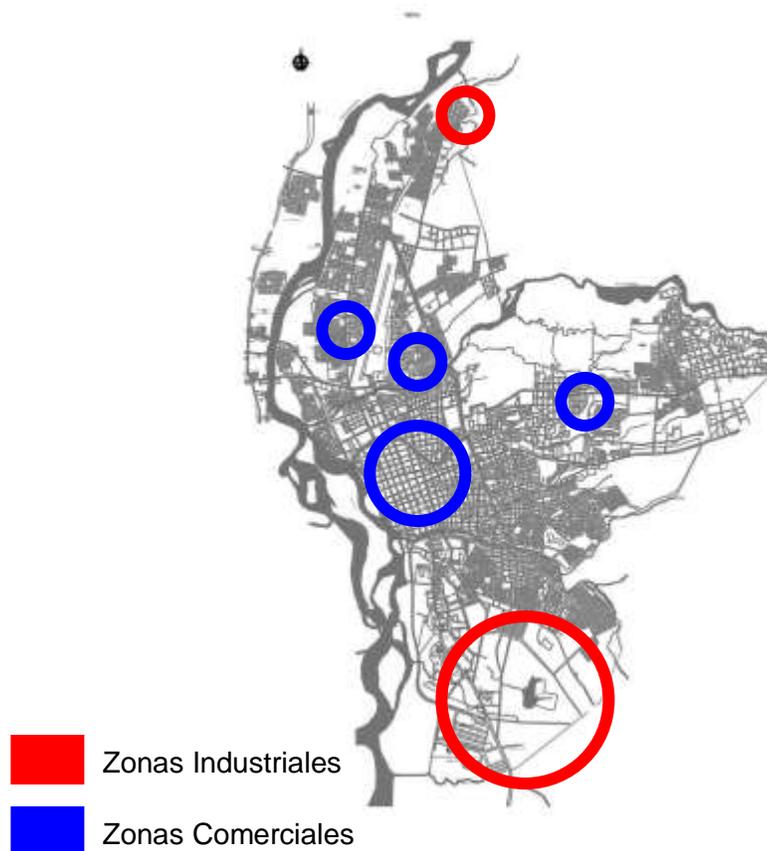


Figura 4.2. Distribución promedio de las zonas industriales y comerciales en Neiva

La estación base WiMAX en el centro de la ciudad, en el sitio correspondiente al edificio de la Caja Agraria y dos estaciones repetidoras, una en el centro y otra al occidente.

Teniendo en cuenta que el número de habitantes con acceso a Internet mediante WiMAX en Neiva es de 613, hace posible una aproximación del tamaño de la celda, como se muestra en la figura 4.3. La topografía de la ciudad y el ambiente idóneo de propagación para la frecuencia de 3.5 GHz, permite a esta estación base cubrir gran parte del casco urbano de la ciudad, incluyendo las zonas más importantes para el comercio y zonas residenciales con potencial de adquisición de accesos a banda ancha mediante tecnologías inalámbricas.

La ciudad presenta una cobertura total por parte de los tres operadores de telefonía móvil. Además, según los informes del SIUST, los perfiles de usuario para los habitantes de la ciudad se orientan a la demanda de servicios de datos, que se refleja en el alto número de suscriptores a Internet mediante xDSL. Por lo cual, el ISP competidor en el área de

Internet dedicado para UNE EPM, resulta ser Colombia Telecomunicaciones S.A. E.S.P con sus 16.714 suscriptores mediante xDSL.

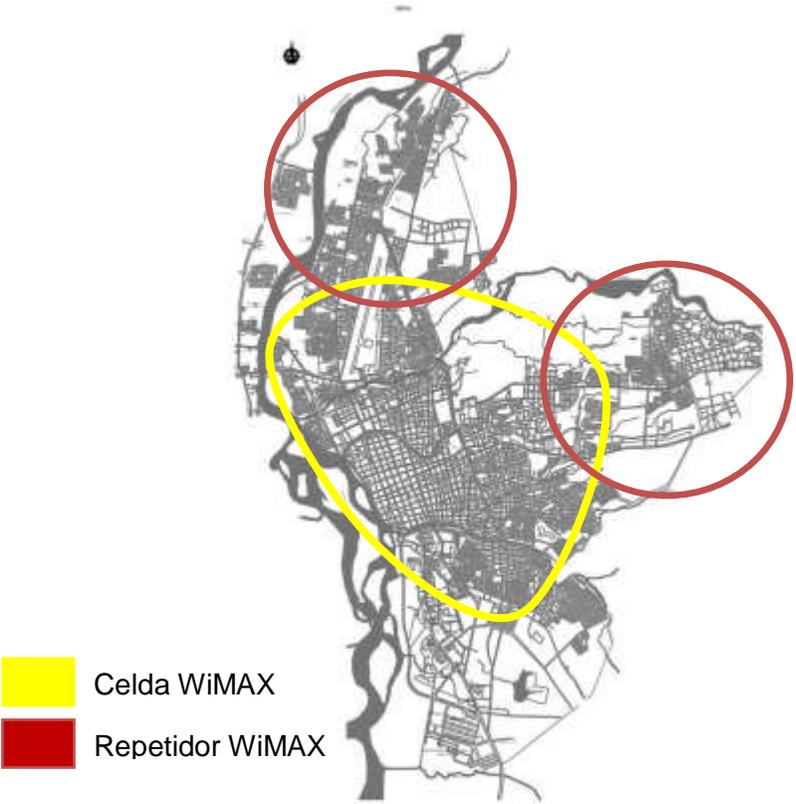


Figura 4.3. Cobertura WiMAX en Neiva

Con respecto a los servicios de voz móvil el mercado arroja los siguientes datos:

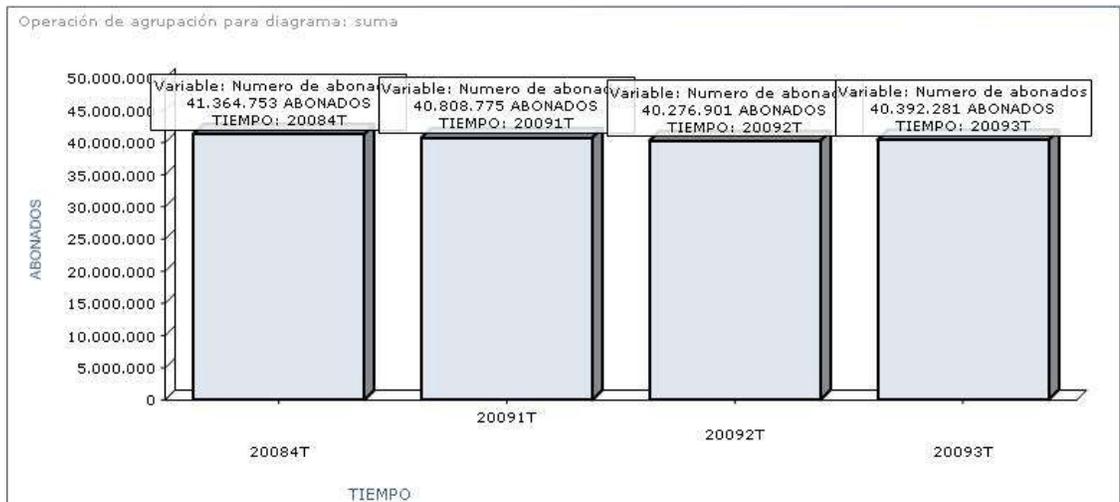


Figura 4.4. Crecimiento telefonía móvil celular

En la figura 4.4, se denota una curva constante en el crecimiento del número de abonados de telefonía móvil celular, es un mercado maduro y estable.

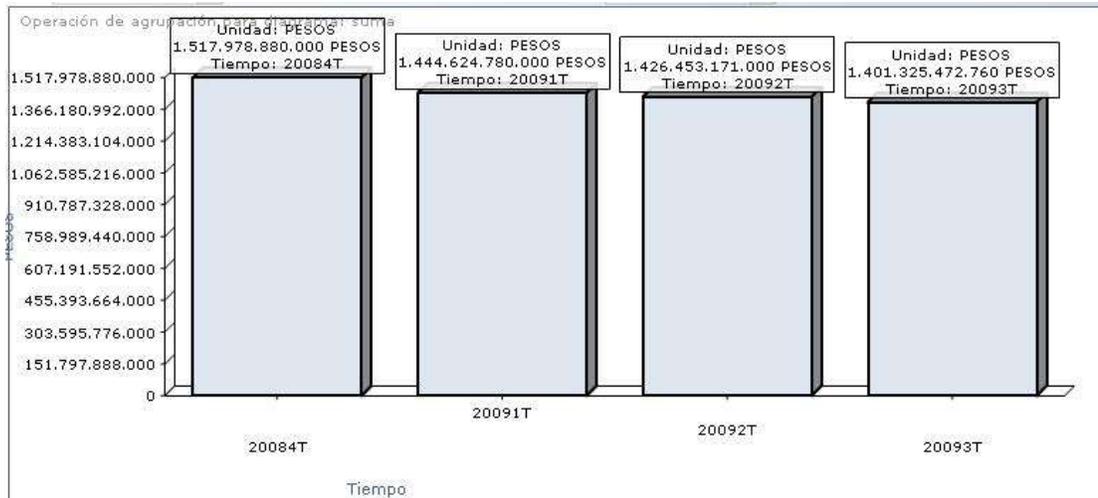


Figura 4.5. Ingresos de las compañías de telefonía móvil celular

Los ingresos totales de las compañías de celular aparecen en la figura 4.5, el ingreso en los últimos cuatro trimestres del año fue de 4.365.355.303.760. Con respecto a Internet móvil las cifras históricas se muestran en la figura 4.6:

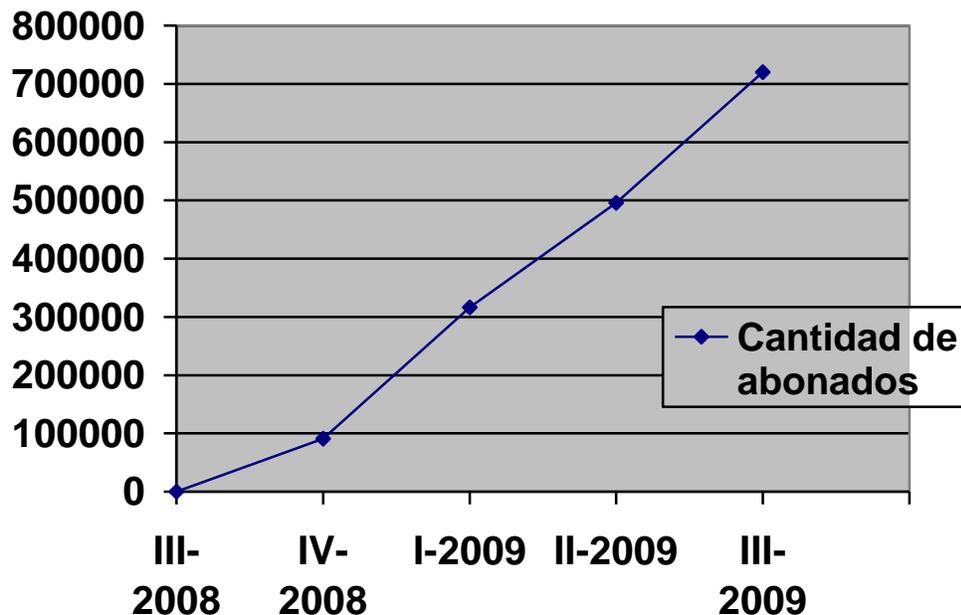


Figura 4.6. Cifras históricas de telefonía móvil celular

La versatilidad de la redes, el reuso que se puede lograr en ellas, el tamaño de los dispositivos, movilidad, llegar donde otros no llegan, etc; son entre otras, las premisas que influyen en el mercado del Internet móvil en Colombia. En menos de un año ha captado 720.000 usuarios en Colombia.

Las observaciones anteriormente resaltadas del mercado en mención, y que re refieren a comportamientos, tanto de índole regional, como nacional, reflejan el desaprovechamiento que se tiene en la tecnología sobre el mercado de la voz en Colombia, bajo estas circunstancias, el estudio de mercado plantea, que es necesario, para la búsqueda de mejores ingresos de la compañía, buscar un modelo de negocios orientado a voz, que ofrezca los siguientes servicios:

- VoIP fija y móvil.
- Internet fijo y móvil.

Debe tenerse en cuenta además que el entorno correspondiente a la ciudad de Neiva, debe estar orientado a ofrecer soluciones personalizadas, centradas en el usuario, más que soluciones de tipo empresarial, comercial u otras, debido a que la ciudad no cuenta con un mediano nivel de desarrollo industrial y comercial, propio de las ciudades intermedias de Colombia. El plan debe ofrecer alternativas al sector gobierno, que representa el más grande eslabón económico, e incluye, el sector salud, educación y gobierno.

4.2.2 Modelo de negocios. Se orientará a la implementación del modelo *me-centric* de Nokia Siemens, mediante la implementación de una red que de soporte a los servicios mencionados en el bloque anterior y que además ofrezca:

Servicios diferenciados a usuarios mediante el diseño de módulos. La posibilidad de ofrecerle al cliente un valor agregado a su dispositivo, mediante la inclusión de servicios cliente servidor, que permitan ofrecer aplicativos.

VoIP personal. Ofrecer la posibilidad de que el usuario contrate su servicio de Voz con la empresa que desee, la red debe ofrecerle las diversas posibilidades de acceso y la información pertinente a las opciones de contratación disponibles.

El modelo de negocios se desarrolla para los siguientes perfiles de usuario:

- **MiMAX.** Usuarios con requerimientos básicos de VoIP con servicios tradicionales. Requiere acceso fijo y/o móvil con funcionalidades compartidas. Acceso a algunas aplicaciones básicas cliente servidor, velocidad de datos estándar.
- **MiMAX plus.** Usuarios con requerimientos intermedios de VoIP con servicios tradicionales. Requiere de acceso fijo y móvil con funcionalidades compartidas. Acceso a todas las aplicaciones básicas cliente servidor, velocidad de datos intermedia.
- **MiMAX premium.** Usuarios con altos requerimientos de VoIP con servicios avanzados. Requiere de acceso fijo y móvil con funcionalidades compartidas. Acceso a todas las aplicaciones cliente servidor, velocidad de datos alta.

Cobertura. Realizando una intersección entre mapas se descubre que hay ciertas zonas de la ciudad que WiMAX no cubre y que sería necesario soportar con el fin de desarrollar el modelo de negocios.

La figura 4.7 muestra la intersección entre zonas de los mapas anteriormente mostrados.

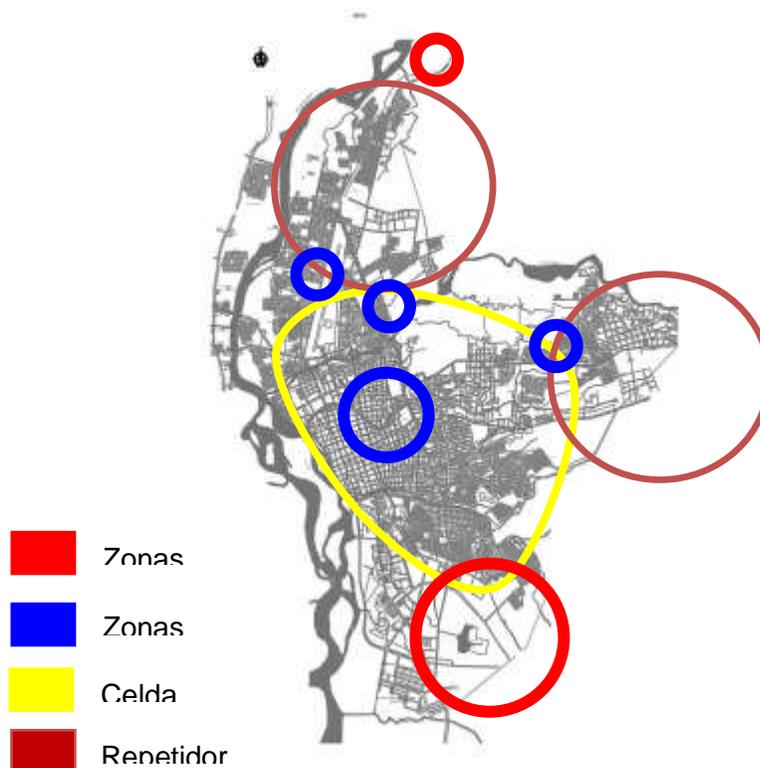


Figura 4.7. Resumen cobertura WiMAX y zonas comerciales e industriales

Por lo tanto es necesario hacer las adecuaciones pertinentes para extender la red fija a las partes donde se han detectado modelos de negocio. Para esto se hace necesario la conexión con un repetidor conectado a la estación base mediante fibra óptica.

4.2.3 Capacidad. Los cálculos de la población esperada a atender son los siguientes:

Tabla 4.2 Cálculos de población a atender esperada

Tipo de Cliente	Porcentaje de cantidad	Actividad en la hora pico: Uno de cada N número de activos	Tiempo de actividad en DL.	Velocidad de transmisión DL mínima en PBH ⁷³
MiMAX	15%	5	25%	240 kbps
MiMAX PLUS	35%	7	25%	480 kbps
MiMAX PREMIUM	50%	20	25%	600 kbps
TOTAL		7.9	25%	504 kbps

⁷³ Hora pico de ocupación de la red

En total, 1 de cada 7.9 personas estarán conectadas en la hora pico y requerirán, cada una 504 kbps mínimo. Los niveles plus y Premium, debido a los SLA soportan QoS, y tienen una velocidad garantizada.

La meta, a partir de una agresiva campaña publicitaria, es obtener el 40% en el mercado de datos. Esto representa aproximadamente 10.000 usuarios. El factor multiplicador debe asumirse con respecto al promedio calculado en la tabla 4.2.

4.3 PLAN DE SOLUCIÓN

4.3.1 Arquitectura y equipos. Caso 2 para lo cual se debe:

- ASN. Se deben realizar las siguientes adecuaciones:
 - Mediante herramientas de cobertura, capacidad y frecuencia, la extensión y ampliación de la cobertura y capacidad.
 - Actualizar el software de la estación base.
 - A menos que el cliente requiera lo contrario, las estaciones base que funcionan como fijas deben permanecer operando en este modo, de forma gradual, se puede hacer la migración total del acceso a 16e.
 - Una vez instaladas las redes se deben llevar a cabo estrategias de evaluación y mejora con el fin de verificar los puntos “muertos”, en estos es factible utilizar repetidores pequeños omnidireccionales con el fin de reforzar la señal.
 - Debido a que el espectro está subutilizado, no es necesario ninguna otra mejora.
 - Ampliación de velocidad contratada con el ASP.

- CSN
 - Se debe completar la estructura mediante la adquisición de los equipos necesarios de acuerdo a las entidades definidas en los perfiles A, B y C del NRM.
 - Se debe adquirir y ampliar la plataforma de servidores de aplicaciones con el fin de soportar el portafolio de aplicaciones ofrecido en el modelo de negocios.
 - Se debe contratar con ASP de PSTN, 3G, etc., e implementar IMS, con el fin de integrar la red a los actuales servicios de voz.
 - El CSN puede ser compartido por los múltiples ASN de la red nacional.

- CPE. Los CPE escogidos se registran en el Anexo B.

Con el fin de brindar al planeador ejemplos del conjunto de estrategias y procedimientos enunciados en el tercer capítulo, se desarrolló un ejemplo, enmarcado en la ciudad de Neiva mediante información obtenida por entrevistas a funcionarios y por las visitas realizadas. Con la información obtenida, algunos análisis de fuentes oficiales y las directrices del capítulo tres, se logró definir un conjunto de procesos que permitirán el desarrollo de accesos móviles a la red WiMAX fija existente en Neiva. Con este tercer

capítulo se da por cumplido el tercer objetivo enunciado en el anteproyecto: “Realizar una propuesta de solución de coexistencia de redes WiMAX fijo y WiMAX móvil en una empresa Colombiana de acuerdo al trabajo realizado”, y se da total cumplimiento al objetivo general de realizar el análisis de la coexistencia de redes Wimax fijas y WiMAX móviles.

CONCLUSIONES

- A través de la recopilación y análisis de informes estadísticos que presentan la Comisión de Regulación de Comunicaciones y el Sistema de Información Unificado del Sector de las Telecomunicaciones periódicamente, se logró reconocer cuáles son los operadores que tienen cobertura banda ancha a través de WiMAX fija en Colombia. De esta manera se destaca a UNE EPM Telecomunicaciones como el pionero en este tipo de soluciones inalámbricas, seguido por EMTEL S.A. E.S.P. que únicamente cuenta con despliegues en la ciudad de Popayán.
- La investigación desarrollada en este trabajo de grado, sobre el marco legal y las políticas que impulsaron el otorgamiento de licencias de operación en la banda de los 3.5 GHz, para permitir despliegues WiMAX en Colombia, da la posibilidad de emitir una propuesta de coexistencia de redes, partiendo de lineamientos ya establecidos por el Gobierno Nacional. Así como también, refleja el interés gubernamental por promocionar y masificar el uso de la banda ancha en Colombia, proporcionando con esto, estímulos para la búsqueda de alternativas de acceso a Internet dedicado, entre ellas, accesos móviles.
- Mediante el estudio y análisis realizado a los posibles Modelos de Negocios, se puso en evidencia uno de los factores más relevantes, que lleva a que una empresa prestadora de servicios de telecomunicaciones ofrezca como alternativa de acceso banda ancha la coexistencia de redes WiMAX fijas y móviles. La versatilidad de la tecnología, provoca una adaptación eficaz a las necesidades de los usuarios residenciales y corporativos, logrando ampliar los nichos de mercado de las ISP, y aumentar su portafolio de servicios.
- En este trabajo de grado se llevó a cabo la elaboración y propuesta de un plan en el cual se logran determinar los procesos y factores relevantes que dan lugar a la coexistencia de redes WiMAX fija y móvil, siendo este un aporte valioso que brinda orientación para la implementación de redes inalámbricas convergentes en diferentes escenarios.
- Mediante el proceso de planeación y su posterior propuesta de implementación, se destaca de WiMAX la diversidad en los posibles tamaños de las celdas. La ventaja de poder desplegar femtoceldas, macroceldas y picoceldas, brinda la posibilidad de optimizar el uso de los recursos de la red y adaptarse efectivamente a los múltiples escenarios posibles de implementación.
- Los criterios fundamentales para lograr la coexistencia de redes WiMAX fijas y móviles son: Evaluación del escenario actual, determinación de la necesidad, planeación y diseño de la solución y finalmente un estudio técnico-económico para verificar la viabilidad del despliegue.

- A partir de las estrategias y procedimientos para la coexistencia y el proceso de planeación de redes, junto con la información expuesta a lo largo del documento, se aplicó en el cuarto capítulo los criterios mediante la propuesta de despliegue en la ciudad de Neiva.

RECOMENDACIONES

- El universo de servicios, aplicaciones y ventajas que puede ofrecer una ISP a través de la coexistencia de las versiones de WiMAX, no ha sido suficientemente explotada en Colombia. Aunque el Gobierno ha demostrado interés en la promoción y masificación de la banda ancha en el país, en la población sigue existiendo una fuerte preferencia por las tecnologías cableadas y la telefonía móvil celular, esto, sumado al carente reconocimiento de la ciudadanía a las aplicaciones y servicios posibles mediante WiMAX, hacen que su desarrollo e implementación no haya tenido una amplia aceptación. Por lo tanto, sería necesario un cambio de paradigma en los usuarios de acceso a Internet banda ancha, empezando por la masificación de dispositivos que den la posibilidad de conectividad móvil y que puedan llevar a cabo un amplio abanico de servicios y aplicaciones.
- Sería prudente realizar en Colombia, varios análisis de acuerdo a los modelos de mercado específicos fundamentados en la tecnología WiMAX, porque las necesidades y demanda de la población varía de acuerdo al lugar de residencia. Además, está visto que en Colombia, la mayoría de la población se ubica en las ciudades, donde la mayoría de ISPs tienen presencia, mientras que en las zonas rurales, de difícil acceso de tecnologías cableadas aún no se cuenta con una total cobertura de accesos banda ancha.
- Resultaría altamente beneficioso el estudio de posibles implementaciones WiMAX en las zonas rurales del territorio Colombiano, haciendo énfasis en la posibilidad que brinda WiMAX de ampliar los rangos de cobertura de las celdas. Para hacer estudios de desempeño de redes en Colombia implementando estaciones base configuradas en macroceldas, microceldas, picoceldas, femtoceldas o repetidoras.

REFERENCIAS

- [1] G. S. V. Radha Krishna Rao, G. Radhamani (2007), **"WiMAX, a wireless technology revolution"**. Auerbach Publications.
- [2] L. Nuaymi (2007), **"WiMAX, Technology for broadband wireless access"**. John Wiley & Sons, Ltd. Publications.
- [3] M. D. Katz, F. H.P. Fitzek (2009), **"WiMAX Evolution, Emerging Technologies and Applications"**. John Wiley & Sons, Ltd. Publications.
- [4] J. G. Andrews, A. Ghosh, R. Muhamed (2007), **"Fundamentals of WiMAX, Understanding Broadband Wireless Networking"**. Prentice Hall, Paerson Education.
- [5] K. Eteman, Intel Corporation (2008), **"Overview of mobile WiMAX technology and evolution"**. Artículo. IEEE Communications Magazine, October 2008, Vol 46, No. 10.
- [6] WiMAX Forum (2006), **"Mobile WiMAX – Part I: A Technical Overview and Performance Evaluation"**. Artículo. Documento PDF disponible en: www.wintegra.com/assets/application_notes%20and%20whitepapers/Mobile_WiMAX-Part_1.pdf (Última consulta febrero 6 de 2010).
- [7] WiMAX Forum (2006), **"Mobile WiMAX – The best personal broadband experience!"**. Artículo. Documento PDF disponible en: www.wimaxforum.org/technology/downloads/MobileWiMAX_PersonalBroadband.pdf (Última consulta febrero 6 de 2010).
- [8] K. H. Teo, Z. Tao, J. Zhang, Mitsubishi Electric Research Lab, (2007), **"The Mobile Broadband WiMAX Standard"**. Artículo.
- [9] WiMAX Forum (2007), **"2nd Mobile Plugfest – Malaga, Spain February 2007, White Paper"**. Artículo. Documento PDF disponible en: www.wimaxforum.org/technology/downloads/2nd_Mobile_WiMAX_PlugFest_White_Paper.pdf (Última consulta febrero 6 de 2010).
- [10] D. Pareek (2006), **"WiMAX, talking wireless to the MAX"**. Auerbach Publications.
- [11] Ahson, Syed (2008), **"WiMAX:applications"**. CRC Press Taylor & Francis Group.
- [12] K. Chen (2008), **"Mobile WiMAX"**. John Wiley & Sons, Ltd. Publications.
- [13] C. Eklun, Nokia Research Center, R. B. Marks, National Institute of Standards and technology, K. L. Sanwood, S. Wang, Ensemble Communications Inc (2002), **"IEEE Standard 802.16: A technical Overview of the WirelessMAN™ Air Interface of Broadband Wireless Access"**. Artículo.
- [14] INTEL (2004), "De qué manera Entender Wi-Fi y WiMAX como Soluciones de Acceso para Áreas Metropolitanas". White Paper. Documento PDF disponible en: http://www.intel.com/espanol/netcomms/wp03_espanhol.pdf (Última consulta febrero 6 de 2010).
- [15] Ahson, Syed (2008), **"WiMAX: Standards and security"**. CRC Press Taylor & Francis Group.
- [16] Estándar IEEE 802.16d-2004
- [17] Ahson, Syed, (2008), **"WiMAX:applications"**. CRC Press Taylor & Francis Group.
- [18] Y. Zhang, H-H. Chen, (2007), **"Mobile WiMAX: toward broadband wireless metropolitan area networks"**. Auerbach Publications.
- [19] M. A. Hasan, Helsinky University of technology, (2007), **"Performance Evaluation of WiMAX/IEEE 802.16 OFDM Physical Layer"**, Trabajo de Grado, Helsinki, Finlandia.
- [20] Estándar IEEE 802.16e

- [21] **Recommendation ITU-R M.1763.**
- [22] WIMAX Forum, (2005), "**Fixed, nomadic, portable and mobile applications for 802.16-2004 and 802.16e WiMAX networks**". White Paper, November 2005, Documento PDF disponible en:
http://www.senza-fili.com/downloads/SenzaFili_WiMAXForum_WhitePaper.pdf
 (Última consulta febrero 6 de 2010).
- [23] F. Ohrtman, (2005) "**WiMAX Handbook, Building 802.16 Wireless Networks**", McGraw Hill.
- [24] H. Labiod, H. Afifi, C. De Santis, (2007), "**Wi-Fi, BlueTooth, ZigBee AND WiMAX**", Springer.
- [25] Directorate for Science, Technology and Industry Committee for information, computer, and communications policy, Ministerial Meeting, Organisation for economic co-operation and development - OECD, (2008), "**Convergence and next generation networks**", Reporte, Junio de 2008.
- [26] A. Kumar, (2008), "**Mobile Broadcasting with WiMAX: Principles, technology, and Applications**", Elsevier INC.
- [27] T. Rokkas, D. Katsianis, D. Varoutas, T. Spicopoulos, Department of Informatics and Telecommunications. University of Athens, (2007), "**Fixed mobile convergence for an integrated operator. a techno-economic study**". Artículo.
- [28] 3GPP TS 43 318 "**Radio Access Network, Generic access to the A/Gb Interface**".
- [29] R. Watson, (2009), "**Fixed/Mobile convergence and beyond, Unbounded Mobile Communications**", Elsevier.
- [30] J. Ghetie, (2009), "**Fixed-Mobile Wireless Networks Convergence, Technologies, Solutions, Services**", Cambridge University Press.
- [31] G.M. Tejada, Departamento de Ingeniería Eléctrica, CINVESTAV-IPN, I.V. Jimenez, I. Zaldivar-Huerta, Departamento de Electrónica, INAOE, (2008), "**Fixed-Mobile Convergence Based on WiMAX using Spatial Access**". Artículo.
- [32] C. Feijoo, Polytechnic University of Madrid, J.L. Gomez, Universidad Nacional de Educacion a Distancia. S. Ramos, Polytechnic University of Madrid. D. Rojo, Polytechnic University of Madrid, (2006), "**An Analysis of Fixed-Mobile Communications Convergence: Development, Social Benefits and Markets**". Artículo.
- [33] K.R. Kumar, R. Renjish, V. Theodoros, K. Dimitris, J.H. Von Dirk, M.H. Timo Smura, (2007), "**Fixed-Mobile Convergence: An Integrated. Operator Case Study. Proc. 6th conference Telecomm Techno-economics**". Artículo.
- [34] M. Vrdoljak, S.I. Vrdoljak, FESB, University of Split, G. Skugor, ERICSSON-Nikola Tesla, (2006), "**Fixed-Mobile Convergence Strategy: Technologies and Market**". Artículo.
- [35] C. Tchepnda, H. Moustafa, France Telecom R&D, H. Labiod, Ecole Nationale Supérieure des Télécommunication (GET – ENST), (2006), "**Hybrid Wireless Networks: Applications, Architectures and New Perspectives**". Artículo.
- [36] G. Shen, R.S. Tucker, C. Chae, University of Melbourne, (2008), "**Fixed Mobile Convergence Architectures for Broadband Access: Integration of EPON and WiMAX**". Artículo.
- [37] Gobierno Nacional, (1990), "**Ley 1900**".
- [38] MINTIC, (1997), "**Resolución 087**".
- [39] MINTIC, (1998), "**Resolución 1833**".
- [40] Gobierno Nacional, (1999), "**Decreto 1130**".
- [41] MINTIC, (2004), "**Resolución 689**".
- [42] MINTIC, (1998), "**Decreto 1418**".

- [43] Gobierno Nacional, (2005), “**Decreto 2925**”.
- [44] Gobierno Nacional, (2006), “**Decreto 1928**”.
- [45] MINTIC, (2005), “**Resolución 2064**”.
- [46] MINTIC, (2005), “**Resolución 2070**”.
- [47] MINTIC, (2006), “**Resolución 1449**”.
- [48] CONPES, República de Colombia, (2005), “**Documento CONPES 3371**”.
- [49] CRC, República de Colombia (2005), “**Definiciones regulatorias para la promoción de la banda ancha en Colombia**”. Documento PDF disponible en: http://www.mincomunicaciones.gov.co/mincom/src/user_docs/Archivos/Sectorial/DefinicionesRegulatoriasBA.pdf (Última consulta febrero 6 de 2010).
- [50] MINTIC, (2005), “**Promoción y masificación de la banda ancha en Colombia**”. Documento PDF disponible en: http://www.mincomunicaciones.gov.co/mincom/src/user_docs/Archivos/Sectorial/LineamientosPoliticaBandaAnchall.pdf (Última consulta febrero 6 de 2010).
- [51] MINTIC, (2005), “**Promoción y masificación de la banda ancha en Colombia, análisis de comentarios**”. Documento PDF disponible en: http://www.mincomunicaciones.gov.co/mincom/src/user_docs/Archivos/Sectorial/AnalisisComBandaAncha.pdf (Última consulta febrero 6 de 2010).
- [52] MINTIC, (2007), “**Proceso de Otorgamiento de permisos para la banda de 3.5 GHz en áreas departamentales**” Documento en PDF disponible en: <http://www.mintic.gov.co/mincom/documents/portal/documents/root/ProcesoOtorgamientoPermisosBanda35Ghz.PDF> (Última consulta febrero 6 de 2010).
- [53] D. Kataria, Agere Systems.Allentown, D. Logothetis,.Ericsson, (2005), “**Fixed Mobile Convergence: Network architecture, Services, Terminals, and Traffic Management**”. Artículo.
- [54] EION Wireless, (2008), “**An Exploration of Advanced WiMAX Backhaul and Access Topologies**”. Documento en PDF disponible en: <http://scialert.net/pdfs/iti/2008/570-579.pdf> (Última consulta febrero 6 de 2010).
- [55] WiMAX.com, (2008). “**Choice in wireless topologies**”. Página web disponible en: <http://www.wimax.com/commentary/blog/blog-2008/choices-in-wireless-topologies> (Última consulta febrero 6 de 2010).
- [56] WiMAX Forum, (2009). “**Monthly industry report**”. Página web disponible en: <http://www.wimaxforum.org/resources/monthly-industry-report> (Última consulta febrero 6 de 2010).
- [57] WiMAX Forum, (2007). “**Waymax@ventage**”. Página web disponible en: <http://www.wimaxforum.org/certification/products/waymaxvantage> (Última consulta febrero 6 de 2010).
- [58] Siemens, (2007). “**Siemens WiMAX solution: wymax@ventage**”. Documento en PDF disponible en: http://optical.usa.siemens.com/pon/downloads/telecomnext_downloads/WayMAX-WiMAX_Brochure.pdf (Última consulta febrero 6 de 2010).
- [59] WiMAXcom, (2007) “**Serie gisaset WiMAX de siemens**”. Página web disponible en: <http://www.wimaxcom.net/2007/11/siemens-wimax-gisaset-series.html> (Última consulta febrero 6 de 2010).
- [60] WiMAX Forum, (207) “**Estaciones Suscriptoras**”. Página web disponible en: <http://www.wimaxforum.org/certification/products/se680se681sx682-subscriber-stations> (Última consulta febrero 6 de 2010).

- [61] Alibaba, (2007) "**Siemens modem WiMAX 2010**". Página web disponible en: http://www.alibaba.com/product-free/245793983/Siemens_2010_WiMAX_Modems.html (Última consulta febrero 6 de 2010).
- [62] Diario de Ciencia y Tecnología, (2006) "**La ciudad de Cali cuenta con la primera red WiMAX de iberoamérica**". Noticia web disponible en: <http://www.laflecha.net/canales/wireless/200607061/> (Última consulta febrero 6 de 2010).
- [63] Comisión de regulación de comunicaciones, (2009). "**Informe Internet septiembre 2009**". Documento en PDF disponible en: http://www.crcm.gov.co/images/stories/crt-documents/BibliotecaVirtual/InformeInternet/Informe_Internet_Septiembre_2009.pdf (Última consulta febrero 6 de 2010).
- [64] Sistema de Información Unificada del Sector de las Telecomunicaciones, (2009). "**Tabla de accesos a Internet dedicado septiembre de 2009**". Página web disponible en: <http://www.siust.gov.co/siust/> (Última consulta febrero 6 de 2010).
- [65] Departamento Administrativo Nacional de Estadística, (2009). "**Censo General 2005**". Página web disponible en: http://www.dane.gov.co/daneweb_V09/index.php?option=com_content&view=article&id=307&Itemid=124 (Última consulta febrero 6 de 2010).
- [66] Instituto Geográfico Agustín Codazzi, (2009). "**Mapas de Colombia**". Página web disponible en: <http://mapascolombia.igac.gov.co/wps/portal/mapasdecolombia/> (Última consulta febrero 6 de 2010).
- [67] S. Fili Consulting a nombre del WiMAX Forum, (2005). "**Fixed, nomadic, portable and mobile applications for 802.16-2004 and 802.16e WiMAX networks**" White paper.
- [68] Unión Internacional de Telecomunicaciones, Comité Consultivo Internacional Telegráfico y Telefónico, (1983). "**Planificación General de la Red**"
- [69] Nokia Siemens Networks, (2007). "**Fixed Mobile Convergence**" White paper.
- [70] Alcatel, (2005). "**User-Centric Broadband: Service Provider Strategies**" White paper.
- [71] Cisco, (2007). "**Fixed Mobile Convergence for the Enterprise: Understanding Technology and deployment Options for voice and unified communications applications**" White paper.
- [72] WiMAX Forum, (2007). "**A comparative analysis of mobile WiMAX deployment alternatives in the access network**" White paper.