



UNIVERSIDAD CENTRAL “MARTA ABREU” DE LAS VILLAS

FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA,

DEPARTAMENTO DE ELECTRONICA Y TELECOMUNICACIONES

*Metodología para el diseño de una red WiMAX
Móvil*

Tesis presentada en opción al Título Académico de Máster en Telemática

Maestría de Telemática

Autor: Ing. Mario Alberto González Cartas

Tutores: Dr. C. Ileana Moreno Campdesuñer

MSc. David Beltrán Casanova

Santa Clara, Cuba, 2014

Agradecimientos

Quisiera expresar mis agradecimientos a todas las personas que me han apoyado en la culminación de la Maestría y la presentación de la Tesis:

A mi esposa, por su dedicación y amor y sobre quien recayó el peso de la educación de mi hijo durante el tiempo dedicado a la Maestría.

A mis padres por darme todo lo que soy en la vida y contar con su apoyo y cariño.

A mi hijo por constituir mi razón de ser.

A mis tutores por su valiosa ayuda y guía.

A mis compañeros de trabajo y amigos por su amistad y apoyo incondicional.

A todos muchas gracias.

RESUMEN

El rápido crecimiento y popularidad de las redes de acceso inalámbricas ha propiciado que exista la necesidad de renovar o modificar periódicamente las redes existentes con el objetivo de aumentar su capacidad e implementar tecnologías que soporten estos nuevos servicios. Sin embargo, lo anteriormente expuesto, lleva a los operadores a realizar enormes inversiones para mejorar su oferta de servicios. Esto hace que sea indispensable la utilización de una metodología completa y precisa en el planteamiento y organización de una red de acceso inalámbrica. En esta investigación se elabora una metodología para el diseño de redes WiMAX Móvil mediante la descripción de una serie de elementos cognoscitivos, métodos teóricos y herramientas de simulación que se integran de manera armónica y eficiente para desarrollar los tres aspectos claves en el diseño de una red de telecomunicaciones: el dimensionamiento de la misma, su optimización y la evaluación de la factibilidad económica. Además, se valida la metodología creada en un escenario real de implementación.

Palabras Clave: Metodología, WiMAX Móvil, diseño, red de acceso inalámbrica.

SUMMARY

The rapid growth and increased popularity of wireless access networks has led to a continuous process of renovation or modification of existing networks in order to increase their capacity and also to implement technologies to support these new services. That is why the operators are now doing huge investments in order to improve their services. At the same time, the use of a comprehensive methodology and an accurate approach are critical requirements to design and organize a wireless access network. In this research, a methodology for the design of Mobile WiMAX networks is made by means of the description of a number of cognitive elements, theoretical methods and simulation tools which are harmoniously and efficiently integrate to guarantee the three key aspects to design a telecommunications network: the sizing, the optimization and the evaluation of its economic feasibility. In addition, the methodology that has been developed in a real deployment scenario has been validated.

Keywords: Methodology, Mobile WiMAX, design, wireless access network.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO 1. Introducción a la Tecnología WiMAX.....	6
1.1 Introducción.....	6
1.2 Tecnología WiMAX.....	7
1.2.1 Estándares de la tecnología WiMAX.....	8
1.2.2 Interfaces Aéreas.....	9
1.2.3 Modelo de referencia IEEE 802.16.....	10
1.2.4 Topologías.....	10
1.2.5 Arquitectura de una red WiMAX.....	11
1.2.6 Tecnologías del estándar IEEE 802.16.....	12
1.3 WiMAX Móvil.....	17
1.4 Enmienda IEEE 802.16e.....	18
1.4.1 OFDMA en IEEE 802.16e.....	18
1.4.2 Modos de duplexación.....	19
1.4.3 Estructura de la Trama.....	20
1.4.4 Tipos de subcanalización.....	21
1.4.5 Múltiples antenas.....	21
1.4.6 Calidad del Servicio (QoS).....	22
1.4.7 Manejo de Potencia.....	25
1.4.8 Handoff.....	25
1.4.9 Seguridad.....	26
1.5 IEEE 802.16-2009.....	27
1.6 Concepto y estructura de la metodología.....	28
1.7 Metodologías para el diseño de redes WiMAX.....	29
1.8 Conclusiones Parciales.....	31
CAPÍTULO 2. Metodología para el diseño de una red WiMAX Móvil.....	33
2.1 Introducción.....	33
2.2 Aparato Teórico o Cognoscitivo.....	33

2.2.1 Cuerpo Categorical.....	33
2.2.2 Cuerpo Legal	33
2.3 Aparato instrumental	37
2.3.1 Bandas de frecuencias licenciadas VS no licenciadas	37
2.3.2 Modelos de propagación.....	38
2.3.3 Cálculo de cobertura.....	39
2.3.4 Área de la celda.....	42
2.3.5 Cálculo de capacidad.....	42
2.3.6 Planificación de frecuencia	46
2.3.7 Ubicación de las estaciones bases	48
2.3.8 Red troncal	48
2.3.9 Medios	49
2.3.10 Análisis económico	51
2.4 Aparato Procesal.....	53
2.4.1 Fase 1: Dimensionamiento	54
2.4.2 Fase 2: Evaluación y Optimización	56
2.4.3 Fase 3: Factibilidad.....	57
2.5 Conclusiones Parciales	57
CAPÍTULO 3. Validación de la metodología propuesta mediante el diseño de una red WiMAX Móvil para la UCLV	59
3.1 Introducción.....	59
3.2 Caracterización de la Red UCLV	59
3.2.1 Infraestructura.....	60
3.2.2 Servicios	61
3.3 Dimensionamiento.....	61
3.3.1 Análisis Inicial	62
3.3.2 Análisis de Cobertura.....	64
3.3.3 Análisis de Capacidad	65
3.3.4 Planificación de Frecuencias.....	66
3.4 Evaluación y Optimización	67
3.4.1 Software Atoll.....	67
3.4.2 Evaluación de la red	68

3.4.3 Optimización de la red	72
3.5 Factibilidad	75
3.6 Conclusiones parciales.....	75
CONCLUSIONES	77
RECOMENDACIONES	78
BIBLIOGRAFÍA.....	79
ANEXOS.....	83

INTRODUCCIÓN

El gran desarrollo alcanzado, en un corto intervalo de tiempo, por las redes de acceso inalámbricas ha sido un fenómeno único en el desarrollo tecnológico de la sociedad. Incluso, las predicciones más optimistas sobre la penetración de estos sistemas en el mercado y sus prestaciones ya han sido superadas por la realidad [1]. Mirando hacia atrás, las tecnologías de acceso inalámbricas han seguido múltiples caminos convergentes en un solo objetivo: altos valores de eficiencia y desempeño en entornos de alta movilidad [2].

Así, en las últimas dos décadas, las tecnologías de acceso inalámbricas han transitado desde los sistemas de primera generación analógicos, basado en su totalidad en conmutación de circuitos, con capacidad limitada de voz y limitada movilidad, hasta los sistemas de tercera generación digitales, basado en conmutación de paquetes, con un significativo aumento de capacidad y movilidad e implementaciones todo IP (*Internet Protocol*) que ofrecen una gran variedad de servicios multimedia [3]. Es con esta tercera generación que se han abierto las puertas a las redes móviles de banda ancha, siendo la evolución natural de la convergencia de las potencialidades de la telefonía celular y el desarrollo que ha tenido Internet desde su aparición.

El advenimiento de los sistemas de tercera generación o Internet Móvil, han hecho posible muchos nuevos servicios y aplicaciones que han impactado tanto en el sector público como en el sector privado. Con la evolución de las redes móviles a la tercera generación, los usuarios pueden interactuar en vivo, a través de voz y video, con sus familiares y amigos. Al mismo tiempo, los servicios de intercambio y las redes sociales han dado como resultado una multitud de texto, audio, video, que están siendo constantemente subidos a Internet. Los usuarios también pueden acceder a sus documentos de trabajo y finanzas en el camino, y conectarse a sus estaciones de trabajo localizadas en su oficina o en las “nubes” de Internet. Mientras tanto, en esferas como la salud, se puede monitorizar el estado de los pacientes remotamente o realizar operaciones conjuntas usando el servicio de videoconferencia. La tercera generación también permite a otros sectores disponer de servicios de localización en tiempo real para el seguimiento de vehículos y camiones de carga [4].

Aún con estas posibilidades, la creciente demanda y popularidad de las aplicaciones y servicios móviles, a la cual se adiciona la creciente dependencia con aplicaciones y servicios de Internet en varios sectores, ha llamado a la comunidad científica al desarrollo de una

conexión de banda ancha con mejores prestaciones, donde la conectividad pueda darse a cualquier hora en cualquier lugar [4]. Esto ha hecho que se comiencen a desarrollar propuestas tecnológicas para ser parte de esta nueva visión, o lo que es lo mismo, entrar en la cuarta generación. En esta carrera y como parte de la propuesta *IMT-Advanced* (*International Telecommunication Union*) de la ITU (*International Telecommunication Union*) sobresalen dos tecnologías, LTE - Advanced (*Long Term Evolution - Advanced*) y WiMAX (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*).

Desde el punto de vista de los operadores de telecomunicaciones, el rápido crecimiento y popularidad de las redes de acceso inalámbricas ha propiciado que exista la necesidad de renovar o modificar periódicamente las redes existentes con el objetivo de aumentar su capacidad e implementar tecnologías que soporten estos nuevos servicios. Sin embargo, lo anteriormente expuesto, lleva a los operadores a realizar enormes inversiones para mejorar su oferta de servicios, por lo que a la hora del diseño de redes de acceso inalámbricas, hay que proponer tamaño, capacidad, topología, tecnologías y ubicación de sus BS (*Base Stations*); de manera que se adapten de la mejor forma a la situación de demanda actual y futura, para así invertir lo justo y necesario. Esto hace que sea indispensable la utilización de una metodología completa y precisa en el planteamiento y organización de una red de acceso inalámbrica, cuyo diseño es tremendamente complicado [5].

Teniendo en cuenta que las comunicaciones inalámbricas comprenden un amplio rango de tecnologías, servicios y aplicaciones que existen para satisfacer necesidades particulares de los usuarios en diferentes escenarios [3], el primer paso para un operador de telecomunicaciones es elegir la tecnología o las tecnologías que más se adecuen a sus intereses. En este trabajo se seleccionó la tecnología WiMAX, primeramente porque es una de las tecnologías que compite por alcanzar la cuarta generación, lo cual la hace una tecnología del futuro, en segundo lugar, esta es una tecnología versátil que soporta un amplio rango de aplicaciones ya sea para escenarios fijos, nómadas, portátiles y móviles [6], y por último, porque a través del *WiMAX Forum*, esta tecnología ha recibido el respaldo de importantes compañías en la industria de las telecomunicaciones logrando que actualmente haya más de 582 implementaciones WiMAX distribuidas en 150 países, haciéndola una tecnología en ascenso [4].

El hecho de ser WiMAX una tecnología incorporada en el año 2005 al mercado de las comunicaciones móviles ha hecho que para hacerse competitiva se tenga la necesidad de implementaciones que permitan hacer solvente a esta tecnología para los operadores. Para esto no solo es suficiente un proceso de dimensionamiento de la red que considere las

particularidades del estándar en el cual se basa esta tecnología, sino que se hacen necesarios una serie de complementos teóricos y empíricos, más la incorporación de herramientas virtuales. Aun así lo esencial es organizar correctamente estos aspectos de forma que conformen una metodología que permita optimizar el diseño y brindar una red fiable, robusta y económica.

Con la tecnología WiMAX como objeto de estudio, es entonces la metodología para el diseño de este tipo de redes, en su variante móvil, el campo de acción de esta investigación. Tomando esto en consideración, se realizó una amplia revisión bibliográfica, detectándose que en algunos casos la metodología de diseño se resume a un mero dimensionamiento de este tipo de redes, con deficiencias en el análisis económico y en la estimación del número de usuarios a los que se pueda dar servicios.

Por ejemplo, Jadue [5] y Valdebenito [7] presentan metodologías para el diseño de redes de telecomunicaciones, el primero, y redes de acceso inalámbricas, el segundo, que se enfocan en el dimensionamiento de redes WiMAX dejando poco espacio a otros aspectos que inciden en el diseño de una red de este tipo. Así mismo ocurre en Valdivia [8], Estopiñan [9], Bermejo [10], Chen y Marca [11], y García [12] donde el diseño de la red es presentado de diversas formas pero con deficiencias en los estudios de capacidad y en el análisis de la interferencia presente en esta tecnología. Además carecen de una forma de evaluar el impacto económico que representa ese diseño para un operador.

Lo anteriormente expuesto lleva a que el problema científico de esta investigación sea: ¿Cómo diseñar una red WiMAX Móvil de forma eficiente mediante la utilización ordenada de conceptos, métodos, procedimientos y técnicas asociados a esta tecnología?

El objetivo general de este trabajo que dará respuesta a la interrogante científica es: Elaborar una metodología que permita diseñar eficientemente una red WiMAX Móvil.

Para cumplir dicho objetivo se hace imprescindible alcanzar los siguientes objetivos específicos:

- 1- Describir las principales características de la tecnología WiMAX, haciendo énfasis en su variante móvil.
- 2- Definir y articular las categorías que conformarán la metodología de diseño de una red WiMAX Móvil.
- 3- Validar la metodología elaborada utilizando como base una propuesta de red WiMAX Móvil para la Universidad Central “Marta Abreu” de las Villas.

Los métodos científicos sobre los cuales se desarrolla la investigación son:

- El histórico-lógico mediante el cual se contextualiza el problema de investigación, sus antecedentes y desarrollo.
- El analítico-sintético ya que es necesario analizar todos los componentes del sistema a emplear y determinar los elementos a utilizar, así como la interrelación de sus partes.
- El inductivo-deductivo que logra establecer generalidades en cuanto al diseño de la red a partir de las experiencias particulares de los técnicos y especialistas que participan en la misma.
- La modelación, mediante la cual se crean abstracciones con vistas a explicar la realidad. El modelo constituye un sustituto del objeto de investigación. Se opera en forma práctica o teórica con un objeto, no en forma directa, sino utilizando cierto sistema intermedio, auxiliar, natural o artificial, en este caso, la simulación.

El principal aporte de esta investigación es integrar de manera armónica y eficiente los tres aspectos claves en el diseño de una red de telecomunicaciones, el dimensionamiento de la misma, su optimización y la evaluación de la factibilidad económica. Con respecto al dimensionamiento, la metodología creada aporta un mejor acercamiento al estudio de capacidad que permite resolver las deficiencias de trabajos anteriores. En cuanto a la optimización, el software profesional empleado permite un acercamiento real a las condiciones de operación de una red WiMAX Móvil. Por último, esta investigación aporta una descripción de las diferentes variables a tener en cuenta con el propósito de valorar la factibilidad del diseño.

El trabajo está estructurado en introducción, tres capítulos, conclusiones, recomendaciones y la sección de anexos.

En el primer capítulo se describen las principales características y tecnologías que definen el funcionamiento y operación de la tecnología WiMAX. Además se enfatiza en los aspectos distintivos de WiMAX Móvil.

En el segundo capítulo se definen e interrelacionan las categorías que conforman una metodología y se dan las bases para la realización de los tres procesos fundamentales para el diseño de una red WiMAX Móvil, el dimensionamiento, la simulación y el análisis económico.

En el tercer capítulo se validará la metodología creada, utilizando una propuesta de red WiMAX Móvil en la UCLV (*Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas*). Todo lo cual se

realiza empleando datos de la red de la institución, equipamiento real y un software profesional.

En las conclusiones del trabajo se abordan los resultados obtenidos en la investigación y posteriormente se realizan recomendaciones derivadas del resultado obtenido.

En los anexos del trabajo se podrá consultar información complementaria y adicional a la mostrada en el cuerpo del trabajo.

CAPÍTULO 1. Introducción a la Tecnología WiMAX

1.1 Introducción

La última década del siglo pasado marca el surgimiento y auge de las redes de banda ancha, redes capaces de soportar servicios en tiempo real y de brindar altas velocidades de transferencia de datos al usuario, utilizando la red cableada existente [13]. Sin embargo, el costo y complejidad asociado a la infraestructura telefónica y el cableado tradicional para brindar acceso de banda ancha en áreas alejadas, creó un vacío significativo en la cobertura alrededor del mundo; limitando el acceso de banda ancha a las grandes ciudades y a sectores con los recursos económicos para implementar redes cableadas de este tipo [14].

Estas limitaciones en las redes cableadas dieron paso a la introducción de soluciones inalámbricas al problema. Las redes de acceso inalámbricas no eran del todo desconocidas, el problema estaba en crear una red capaz de soportar las exigencias de los servicios de banda ancha [15]. Con vista a lograr este objetivo la IEEE (*Institute of Electrical and Electronic Engineers*) creó desde el comienzo de los años 90' grupos de trabajo para la creación de estándares capaces de determinar las características y el funcionamiento de las redes de acceso inalámbricas de banda ancha [16].

Una red de acceso inalámbrica de banda ancha presenta una serie de ventajas sobre las redes cableadas, entre las que se destacan, movilidad, rapidez y flexibilidad en la instalación, costos de propiedad reducidos y escalabilidad. Por otro lado, la seguridad y las insuficientes razones de datos han resultado ser las principales limitaciones frente a las redes cableadas [15].

En el ámbito de las redes de acceso inalámbricas de banda ancha, hay disponibles una extensa variedad de tecnologías que, operando en disímiles bandas de frecuencias y para diversos propósitos, brindan una gran variedad de posibilidades de cobertura y servicios. A continuación se ofrece la clasificación de estas de acuerdo a sus rangos de cobertura [3]:

1. *WPAN (Wireless Personal Area Network)*: Red de datos inalámbrica usada para la comunicación entre dispositivos de datos y periféricos en los alrededores del usuario. Ejemplos de esta tecnología son Bluetooth y UWB (*Ultra Wideband*).

2. *WLAN (Wireless Local Area Network)*: Red inalámbrica usada para la comunicación entre dispositivos de datos o voz dando cobertura a áreas pequeñas tales como los entornos residenciales y de oficina. Ejemplo de esta son las redes Wi-Fi (Wireless Fidelity).
3. *WMAN (Wireless Metropolitan Area Network)*: Red de datos inalámbrica que conectan un grupo de redes LAN (*Local Area Network*) o grupos de usuarios fijos o móviles distribuidos en un área relativamente grande. Como ejemplo se encuentran las redes WiMAX.
4. *WWAN (Wide Area Network)*: Red de datos inalámbrica que conecta usuarios geográficamente dispersos mediante una infraestructura de red, y brinda cobertura a áreas extensas. Redes celulares tales como UMTS (*Universal Mobile Telecommunications System*), LTE y WiMAX Móvil.

A pesar del nivel alcanzado, el desarrollo de estas tecnologías no se detiene, por lo que actualmente comienzan a aparecer nuevas modificaciones a las ya existentes o emergen otras nuevas, en busca de alcanzar un nuevo nivel de prestaciones y ser parte de las redes de cuarta generación. Una tecnología que compite por incluirse en este nuevo tipo de redes es WiMAX, en la cual se enfoca esta investigación.

1.2 Tecnología WiMAX

WiMAX, nombre comercial de la tecnología, está basada en los estándares desarrollados por el grupo de trabajo IEEE 802.16 para redes metropolitanas inalámbricas de banda ancha. Esta tecnología puede proporcionar un servicio, con parámetros de calidad adecuados, altas tasas de transferencia de datos, telefonía con movilidad y cobertura a grandes distancias, además garantiza la interoperabilidad entre equipos de diferentes proveedores y posibilita la inversión en infraestructuras de red y equipamiento de usuario, así como trabajar en bandas de frecuencia licenciadas o no licenciadas [8].

El origen de esta tecnología se puede ubicar en el año 1998 cuando el IEEE crea el grupo de trabajo 802.16 con el objetivo de desarrollar un estándar que otorgara acceso inalámbrico de banda ancha para redes MAN (*Metropolitan Area Network*) y que fuera capaz de brindar una alternativa a las redes de acceso cableadas existentes. La atención principal de este grupo se centró inicialmente en la implementación de un sistema inalámbrico de banda ancha punto a multipunto utilizando enlaces con línea de vista en la banda de 10 a 66 GHz [13].

Paralelamente a la creación de este grupo de trabajo en el IEEE, también se crea el *WiMAX Forum*, consorcio de empresas dedicadas a diseñar los perfiles del sistema de esta

tecnología, cuyo principal objetivo es acelerar la introducción de estos sistemas en el mercado, generando economía de escala mediante equipos de bajo costo económico y de alta calidad [8]. Es así como en el año 2002 y después de la publicación del estándar IEEE 802.16, *WiMAX Forum* le otorga el sello WiMAX a esta tecnología.

1.2.1 Estándares de la tecnología WiMAX

Después de la aparición de primer estándar de la tecnología WiMAX, el grupo de trabajo 802.16 ha desarrollado en un relativamente corto espacio de tiempo, una serie de estándares y enmiendas con vistas a estar a la altura de las necesidades tecnológicas de la sociedad actual. A continuación se describen brevemente los estándares y enmiendas que definen la tecnología WiMAX:

- *IEEE 802.16*: Publicado en diciembre de 2001, es la primera versión del estándar. Este se basa en el uso de portadora simple en la capa física y como método de acceso al medio, la multiplexación por división del tiempo, alcanzando razones de datos de hasta 134 Mbps y brindando una cobertura de hasta 50 Km [1]. Opera en la banda de los 10 a 66 GHz por lo que solo es funcional en ambientes con línea de vista y utiliza configuraciones Punto a Punto y Punto a Multipunto [8].
- *IEEE 802.16a*: Enmienda al estándar original publicada en enero del 2003. En ella se introducen nuevas prestaciones como soporte para las bandas de 2 a 11 GHz, haciendo viable su utilización en ambientes sin línea de vista. Además de permitir el uso de portadora simple como interfaz de la capa física, fueron incluidas modificaciones en la capa MAC (*Medium Access Control*) para soportar OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) y OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*) [17].
- *IEEE 802.16-2004*: Revisión al estándar publicada en octubre del 2004 que reemplazó todos los documentos anteriormente elaborados. Conocido también como IEEE 802.16d, esta especificación recoge las interfaces físicas de los estándares anteriores permitiendo una cobertura máxima de 50 Km y razones de datos de hasta 75 Mbps, todo ello para aplicaciones fijas [1].
- *IEEE 802.16e*: Enmienda al estándar culminada en diciembre de 2005 y publicada formalmente como IEEE 802.16-2005 en el 2006. Esta especificación apunta hacia el mercado móvil brindando una razón de datos máximas de 75 Mbps a velocidades de hasta 120 Km/h vehiculares y presenta una cobertura típica de hasta 5 Km. La

deficiencia de esta enmienda radica en su incompatibilidad con el IEEE 802.16-2004 [13].

- *IEEE 802.16-2009*: Revisión al estándar publicada en mayo del 2009 y vigente en la actualidad. En él se incorporan los estándares precedentes y se modifican algunos aspectos para eliminar la incompatibilidad entre IEEE 802.16-2004 y IEEE 802.16-2005 [18].
- *IEEE 802.16m*: Enmienda al estándar aprobada en el año 2011. Brinda la posibilidad de transferir datos inalámbricos a tasas de alrededor de 1 Gbps para enlaces fijos y hasta 100 Mbps para enlaces móviles. Además soporta un extenso rango de aplicaciones y servicios de gran calidad y capacidad sobre IP. A su vez, mantiene una total compatibilidad con antiguas versiones de WiMAX para asegurar las inversiones económicas realizadas [17].

1.2.2 Interfaces Aéreas

El estándar IEEE 802.16 describe diferentes interfaces aéreas de acuerdo con los diferentes escenarios de implementación de la red. Por ejemplo la interfaz *WirelessMAN-SC* (*Wireless Metropolitan Area Network-Single Carrier*) permite la creación de *backhaul* entre estaciones dedicadas que dependen de una conexión con línea de vista. Mientras que *WirelessMAN-OFDMA* (*Wireless Metropolitan Area Network- OFDMA*) es la indicada para la implementación de redes móviles celulares [4].

Las siguientes interfaces aéreas son las definidas en el estándar IEEE 802.16-2009 [3]:

- *WirelessMAN-SC*: Opera entre los 10 y 66 GHz empleando esquemas tanto TDD (*Time Division Duplex*) como FDD (*Frequency Division Duplex*). Soporta conexiones PMP (*Point to Multi-Point*) con estaciones subscriptoras fijas.
- *WirelessMAN-OFDM*: Opera en las bandas licenciadas inferiores a los 11 GHz empleando TDD o FDD. Soporta conexiones con o sin línea de vista con estaciones subscriptoras fijas.
- *WirelessMAN-OFDMA*: Opera en las bandas licenciadas inferiores a los 11 GHz empleando TDD o FDD. Soporta operaciones en topologías PMP y MR (*Multihop Relay*). También puede brindar conexiones con o sin línea de vista con estaciones subscriptoras fijas y móviles.
- *WirelessHUMAN*: Opera en bandas exentas de licencias inferiores a los 11 GHz empleando TDD. Se ajusta tanto a la descripción OFDM como OFDMA.

1.2.3 Modelo de referencia IEEE 802.16

La figura 1.1 muestra el modelo de referencia genérico de la familia de estándares IEEE 802.16. El alcance de estos estándares comprende dos planos: el plano de datos y el plano de control de administración.

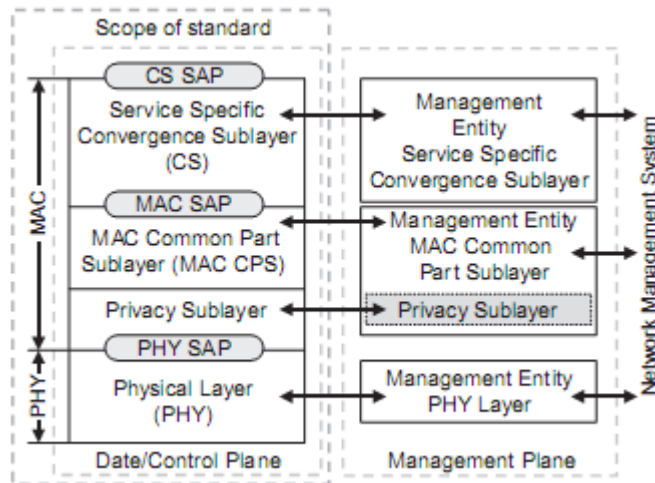


Figura 1.1: Modelo de referencia IEEE 802.16 [11]

En el plano de datos, el estándar provee una descripción de la capa física y la capa MAC (*Médium Access Control*) mientras que en el otro plano se incluyen abstracciones a ser usadas por los sistemas de control y administración [11].

Como se puede apreciar la capa MAC está dividida en tres subcapas: CS (Service Specific Convergence Sublayer), CPS (Common Part Sublayer) y la subcapa de seguridad. La subcapa CS provee diferentes SAP (Service Access Point) a las capas superiores y además clasifica y procesa los PDU (Protocol Data Units) antes de admitirlos en la infraestructura de red IEEE 802.16. La siguiente subcapa, las CPS provee el núcleo de las funcionalidades de la capa MAC, y es donde se maneja la clasificación y los parámetros de calidad de servicio. La subcapa de seguridad es la encargada de la privacidad e integridad de la comunicación, mientras que la capa física, es la encargada de llevar a cabo la comunicación mediante la adopción de una de sus interfaces de aire [4].

1.2.4 Topologías

Para una red WiMAX existen tres topologías básicas [19]:

- Punto a Multipunto.
- Punto a Punto
- Mallada

Estas topologías están caracterizadas por el uso de dos tipos de estaciones: las BS (*Base Station*) y las SS (*Subscriber Station*), donde en el caso de implementaciones móviles la SS se renombra como MS (*Mobile Station*). Las primeras se encargan de controlar y dirigir la comunicación mientras que las segundas son aquellas terminales que se comunican con las BS [20].

Las redes punto a multipunto permiten la conexión de una estación base a múltiples estaciones subscriptoras. Esta topología permite al operador de la red alcanzar el mayor número de subscriptores a bajos costos, basado en enlaces sin línea de vista utilizando bandas de frecuencias de 2 a 11 GHz [1].

La siguiente topología, punto a punto, basa su funcionamiento en enlaces con línea de vista dedicados en la banda de 11 a 66 GHz utilizando antenas altamente directivas. Esta topología ofrece un área de cobertura de 50 Km y conexiones potentes y estables. La principal utilización de esta topología radica en hacer de *backhaul* entre redes punto a multipunto y la red de transporte cableada [19].

La última topología de redes WiMAX, la mallada, está diseñada para permitir las conexiones entre estaciones subscriptoras haciendo que el tráfico pueda encaminarse desde la estación base al destino a través de las estaciones subscriptoras. Esta topología aparece como la más robusta debido a que cada nodo o SS tiene múltiples rutas para encaminar el tráfico de información pero resulta extremadamente compleja y costosa ya que en la búsqueda de coordinación cada nodo requeriría un *router* [19].

1.2.5 Arquitectura de una red WiMAX

Teniendo en cuenta que la familia de estándares IEEE 802.16 solo está enfocada a las capas físicas y MAC, el *WiMAX Forum* ha creado otros grupos de trabajo además del propio IEEE 802.16 con vistas a la implementación de interfaces en las capas superiores que les permitan a múltiples suministradores de esta tecnología ofertarla como un estándar típico de comunicaciones móviles. La arquitectura WiMAX está basada en una plataforma *ALL-IP*, o sea, la conmutación de paquetes está presente en toda la arquitectura de extremo a extremo de la red, con esto se deja de lado la conmutación de circuitos como era tradicional en las redes de telefonía [11].

La figura 1.3 detalla la arquitectura de red WiMAX, que consiste en tres partes esenciales:

1. Terminales de Usuarios: Incluye terminales tanto para usuarios móviles, nómadas como fijos.

2. ASN (Access Service Network): En este bloque se encuentran las BS de WiMAX y por los *gateway* del sistema. Estos últimos pueden estar conectados a varias BS, su función es hacer el papel de traductor entre las BS y el CSN.
3. CSN (Connectivity Service Network): En este bloque se encuentran los servidores AAA (*Authentication Authorization and Accounting*), la plataforma de servicio, la red IMS (*IP Multimedia Subsystem*) y los sistemas de cobros.

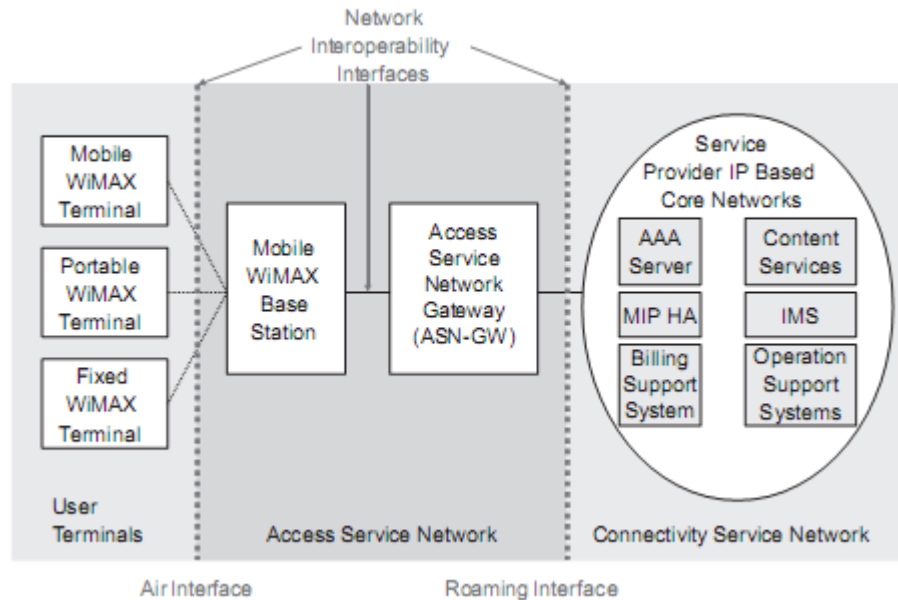


Figura 1.2: Arquitectura de red WiMAX [11]

1.2.6 Tecnologías del estándar IEEE 802.16

El continuo y rápido desarrollo que ha experimentado la tecnología WiMAX para estar acorde a las necesidades de la sociedad y para abrirse paso en el mercado de las comunicaciones inalámbricas de banda ancha, se debe a la implementación de las más modernas tecnologías. Esto ha hecho que mejore todas sus prestaciones permitiéndole así poner la mira en las redes de cuarta generación.

Las tecnologías que conforman la piedra angular de las aspiraciones de WiMAX son:

- OFDM.
- OFDMA.
- Modulación y codificación adaptativa.
- MIMO (*Multiple Input Multiple Output*).

1.2.6.1 Características de OFDM

OFDM es una técnica de modulación que utiliza múltiples portadoras ortogonales, cada una modulada en amplitud y fase para la transmisión de datos. Esta tecnología permite lograr altas razones de datos e incrementa la robustez de las comunicaciones inalámbricas frente al desvanecimiento causado por el multitrayecto [13].

La tecnología OFDM hace uso de dos herramientas esenciales, la primera es la técnica de modulación de múltiples portadoras y la segunda, el principio de ortogonalidad [1]. La técnica de modulación de múltiples portadoras divide un flujo de alta tasa de transferencia de datos en varios flujos paralelos de tasas de transferencia menores para después modular cada uno en una subportadora. Un sistema de datos paralelos clásico divide la banda de frecuencia de la señal en N subportadoras no solapadas, donde cada subportadora es modulada y multiplexada en frecuencia. El uso de subportadoras no solapadas logra evitar la interferencia entre estas pero conlleva a un uso ineficiente del espectro. Para eliminar esta ineficiencia OFDM propuso el uso del criterio de ortogonalidad entre las subportadoras. La ortogonalidad, posibilita que el espaciamiento entre portadoras sea óptimo, evitando la interferencia entre sí. Este espaciamiento consiste, en que la separación espectral entre portadoras consecutivas, sea siempre la misma e igual al inverso del período de símbolo [21].

En cuanto a la modulación de las subportadoras en un múltiplex OFDM, cada una de ellas se modula con una información diferente, aunque por facilidad de implementación, el sistema de modulación suele ser el mismo para todas ellas, como QPSK (Quadrature - Phase Shift Keying) o QAM (Quadrature Amplitude Modulation). Además se suelen reservar algunas portadoras para transmitir información de sincronismo y ecualización espectral o bien para establecer canales de servicios [21].

1.2.6.2 Descripción de OFDMA

Una extensión a la tecnología OFDM, introducida como método de modulación y múltiple acceso en tecnologías inalámbricas como WiMAX, es conocida como OFDMA. En esta tecnología a cada usuario se le asigna una o más subportadoras, compartiendo así, un mismo ancho de banda en un intervalo de tiempo dado [1].

La asignación de las subportadoras puede realizarse de dos formas, distribuida o localizada. En la asignación localizada un conjunto de subportadoras contiguas son asignadas a un solo usuario, mientras que en la asignación distribuida se asigna subportadoras equidistantes a diferentes usuarios [4], tal como se muestra en la figura 1.4.

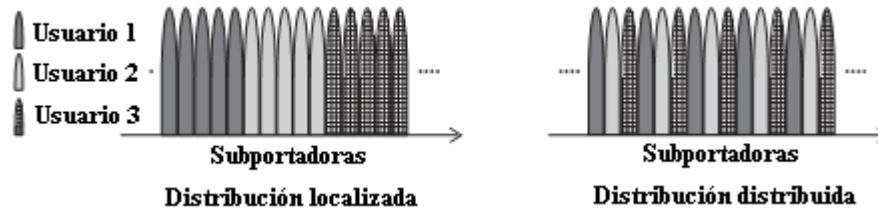


Figura 1.3: Asignación de subportadoras en OFDMA [11]

Probablemente la principal ventaja de OFDMA sea la explotación de la diversidad de frecuencia y multiusuario. La diversidad de frecuencia se logra al distribuir aleatoriamente las subportadoras de un usuario sobre la banda completa, reduciendo la probabilidad de que todas las subportadoras de un usuario sufran desvanecimientos profundos. Este tipo de diversidad se logra empleando una asignación de subportadoras distribuidas. En el caso de la diversidad multiusuario, se puede lograr asignando un conjunto de subportadoras contiguas a usuarios que experimenten unas buenas condiciones del canal [4].

Otra importante ventaja de OFDMA es la posibilidad de implementar asignaciones adaptativas de ancho de banda. Teniendo en cuenta que el ancho de banda de transmisión consiste en un gran número de subportadoras ortogonales que pueden de forma independiente activarse o no, se pueden implementar anchos de bandas tan grandes como 100 MHz [11].

La estructura de símbolo de OFDMA consiste en 3 tipos de sub portadoras como se muestra en la figura 1.5 [22].

- Sub portadoras de datos para la transmisión de datos.
- Sub portadoras piloto para efectos de estimación y sincronización.
- Sub portadoras nulas no utilizadas para la transmisión, usadas para las bandas guarda y portadoras DC.

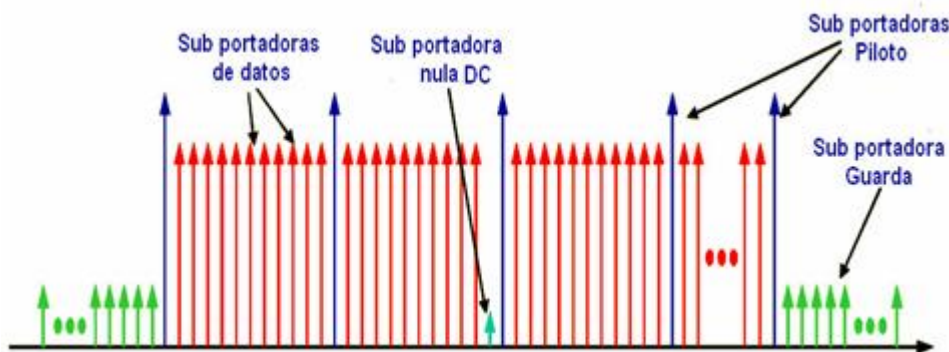


Figura 1.4 Estructura de sub portadoras OFDMA [22]

1.2.6.3 Modulación y codificación adaptativa

La modulación adaptativa permite ajustar el sistema de modulación dependiendo de la condición de la relación señal a ruido del enlace de radio. Cuando el enlace de radio tiene buenas características de señal es usado en esquema de modulación más alto, dando al sistema mayor capacidad. Sin embargo, cuando el enlace sufre los efectos del desvanecimiento el sistema cambia a un esquema de modulación inferior para mantener la calidad del enlace aunque se sufra una reducción de la capacidad de transmisión/recepción de datos.

Así, para un usuario cercano a la antena de la estación base con una buena señal probablemente se tendrá una modulación 64QAM, pero para un usuario que esté en los límites de la celda WiMAX probablemente se use la modulación BPSK (Binary Phase Shift Keying). La capacidad de cada subportadora dependerá de la modulación que se utilice, logrando un máximo de 6 bit por subportadora con la modulación 64QAM [23]. La Tabla 1 muestra las diferentes distribuciones definidas en la capa física de la tecnología WiMAX.

Tabla 1: Tipos de modulación y codificación soportados por WiMAX

Modulación	Capacidad (bits por subportadoras)	Tasa de código	SINR (dB)
BPSK	1	1/2	6.4
QPSK	2	1/2	9.4
		3/4	11.2
16-QAM	4	1/2	16.4
		3/4	18.2
64-QAM	6	2/3	22.7
		3/4	24.4

1.2.6.4 Sistema de antenas MIMO

En un sistema MIMO cada equipo transmisor tiene asociado un número de antenas N , y cada receptor otro, igual o diferente al del transmisor, denotado como M . Desde el punto de vista de la propagación, el canal de radio no es único ya que existe un canal entre cada antena transmisora y cada antena receptora, lo que obliga a representar la propagación mediante una matriz \mathbf{H} ($N \cdot M$). En esta matriz el elemento h_{ij} representa la función de transferencia compleja entre la antena transmisora j y la antena receptora i . [24]. La figura 1.7 muestra un ejemplo de sistema MIMO con dos antenas en cada extremo de la comunicación.

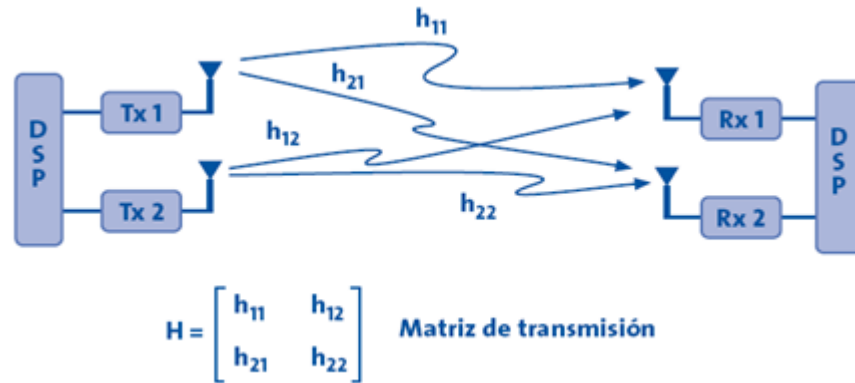


Figura 1.5: Esquema MIMO de 2x2 antenas [24].

Desde el punto de vista matemático un sistema de antenas MIMO se representa según la ecuación 1.1 donde \mathbf{Y} representa el vector de las señales recibidas, \mathbf{x} el vector de señales transmitidas y \mathbf{n} es el vector de ruido Gaussiano introducido por el medio [25].

$$Y_{(M)} = H \cdot x_{(N)} + n \quad (1.1)$$

Esta es una tecnología que ofrece la posibilidad de resolver la información proveniente de señales multitrayecto, de forma coherente, mediante antenas receptoras separadas espacialmente. Generalmente la señal multitrayecto es considerada como interferencia, sin embargo MIMO utiliza en su beneficio este fenómeno para mejorar la calidad y capacidad del enlace [26].

En general hay dos categorías importantes en los sistemas MIMO [27]:

1. De lazo abierto: Donde el transmisor no tiene la información del estado del canal y envía los datos directamente hacia el receptor sin recibir ningún tipo de información por parte de este.
2. De lazo cerrado: El transmisor conoce de forma completa o parcial la información del estado del canal. Esta categoría mejora la eficiencia de los recursos del enlace, pero hace más complejos los circuitos necesarios para su implementación.

El uso de múltiples antenas permite la implementación de tres técnicas fundamentales [26]:

1. *Beamforming*: Esta técnica permite la creación de un patrón bien definido y direccional. Sus principales ventajas consisten en otorgar una mayor ganancia de señal y una menor atenuación con la distancia. En los sistemas de múltiples antenas la utilización de *beamforming* está condicionada por el conocimiento previo de la información del estado del canal.
2. *Diversidad espacial*: Es la técnica utilizada en las comunicaciones para contrarrestar el fenómeno de interferencia multitrayecto, mejorando la calidad de la señal recibida.

Esta técnica se basa en la transmisión de una misma señal sobre canales múltiples que sean independientes del desvanecimiento.

3. *Multiplexación espacial*: Si las diferentes trayectorias multitrayecto están suficientemente decorrelacionadas, con N antenas en el transmisor y N en el receptor se pueden establecer N canales de comunicación independientes. La aplicación del mismo solo requiere que exista un adecuado espaciamiento entre las antenas tanto transmisoras como receptoras.

Tomando en cuenta todo lo anterior, en la actualidad se presentan tres tipos de sistemas MIMO: SU-MIMO (Single User MIMO), MU-MIMO (Multi User MIMO) y Co-MIMO (Collaborative MIMO).

SU-MIMO se refiere a escenarios de comunicación entre la BS y la SS donde se mejora la capacidad del canal y la fiabilidad a través de la utilización de códigos de espacio-tiempo/espacio-frecuencia (diversidad de transmisión/recepción) en conjunción con la transmisión de multiplexación espacial. Mientras, MU-MIMO se enmarca a escenarios donde dispositivos de múltiples antenas se están comunicando en un mismo intervalo de tiempo y a la misma frecuencia simultáneamente. Específicamente si diferentes subscriptores están ubicados a una distancia suficientemente grande entre ellos, sus correspondientes canales son representados por matrices diferentes, lo que permite que sus señales puedan ser separadas eficientemente en el receptor [17].

Por otro lado Co-MIMO es una extensión de las técnicas MIMO convencionales basadas en una sola BS. En ella, múltiples BS dan servicio a una o varias estaciones móviles de forma simultánea en el mismo recurso de radio a través de la coordinación entre las estaciones de base que participan. Co-MIMO tiene las ventajas de la reducción de interferencias entre células y la mejora de la eficiencia espectral [3].

1.3 WiMAX Móvil

En el estándar IEEE 802.16, las estaciones móviles fueron introducidas por primera vez bajo la enmienda IEEE 802.16e, apareciendo por primera vez el término WiMAX Móvil asociado a implementaciones desarrolladas por el *WiMAX Forum* basadas en esa enmienda. A partir del 2009 comenzó a estar vigente el estándar IEEE 802.16-2009, una revisión del estándar completo que integra todas las versiones precedentes del estándar en un mismo documento [18]. Actualmente entran en el término WiMAX Móvil, además del estándar IEEE 802.16-2009, la enmienda IEEE 802.16m. Sin embargo, debido a que el equipamiento y las implementaciones existentes en la actualidad de la tecnología WiMAX Móvil están basados

en IEEE 802.16-2009, a continuación solo se abordaran aspectos esenciales de este estándar.

1.4 Enmienda IEEE 802.16e

A pesar de ser una terminología en desuso para referirse a la tecnología WiMAX, es importante describir las características distintivas de la enmienda IEEE 802.16e. Esto se debe a que el aspecto de movilidad que aporta el actual estándar IEEE 802.16-2009, es esencialmente el de IEEE 802.16e salvo en algunos aspectos que serán abordados más adelante.

Esta enmienda, tiene su base, a nivel físico, en la utilización de las interfaces aéreas *WirelessMAN OFDMA* o *WirelessHUMAN* para redes PMP, donde es posible el uso de múltiples antenas en la comunicación; mientras en el nivel de la capa MAC se emplean mecanismos de control de potencia y *handoff* para otorgarle la movilidad. Es de destacar que aunque se aborden las características distintivas de la enmienda no se deja de lado la implementación de estas como tecnología WiMAX Móvil.

1.4.1 OFDMA en IEEE 802.16e

Como parte de la interfaz aérea *WirelessMAN OFDMA*, en la enmienda IEEE 802.16e se definen tamaños de la FFT (*Fast Fourier Transform*) de 2048, 1024, 512 y 128. Además de este parámetro, en la enmienda se definen como parámetros básicos [28]:

- *BW*: Ancho de banda del canal
- N_{used} : Número de subportadoras usadas. Incluye la subportadoras pilotos.
- n : Factor de muestreo. Adquiere valores de 8/7 para un ancho de banda del canal múltiplo de 1.25 MHz y 28 MHz para un ancho de banda del canal múltiplo de 1.25, 1.5, 2 o 5.75.
- G : esta es la razón entre el tiempo del prefijo cíclico y el tiempo que se usa para transmitir datos. Adquiere valores de 1/32, 1/16, 1/8, 1/8.

Basado en esto, la tecnología WiMAX Móvil presenta una arquitectura escalable en su capa física que le otorga la flexibilidad necesaria para todo tipo de despliegues y servicios, permitiendo a los operadores desplegar redes con capacidades de acuerdo a su plan de negocios. Esto se logra gracias a que el número de subportadoras, tamaño de la FFT, depende del ancho de banda que se utilice [29].

En la Tabla 2 se muestra la relación entre el ancho de banda y el tamaño de la FFT, además de otros parámetros. Como la separación entre subportadoras y el tiempo de duración del

símbolo es el mismo, el impacto en las capas superiores cuando se escala el ancho de banda es mínimo [22].

Tabla 2: Parámetros SOFDMA.

Parámetros	Valores			
Ancho de Banda (MHz)	1.25	5	10	20
Frecuencia de Muestreo	1.4	5.6	11.2	22.4
Tamaño de la FFT	128	512	1024	2048
Número de subcanales	2	8	16	32
Espaciamiento entre subportadoras	10.94 KHz			
Tiempo útil del símbolo	91.4 μ s			
Intervalo de guarda	11.4 μ s			
Duración del símbolo OFDMA	102.9 μ s			
Número de símbolos OFDM	48			

El espaciamiento entre subportadoras fijado en 10.94 KHz fue seleccionado para lograr un buen balance entre los requerimientos referidos a la dispersión del retardo multirrayecto y la dispersión Doppler [29].

1.4.2 Modos de duplexación

Para su transmisión, la trama OFDMA puede utilizar TDD o FDD. En el caso de FDD las subtramas DL (*Downlink*) y UL (*Uplink*) son transmitidas simultáneamente en canales de diferentes frecuencias mientras que con TDD, tanto la subtrama DL como UL son transmitidas por un mismo canal de frecuencia en diferentes intervalos de tiempo. Además de FDD y TDD, existe el modo H-FDD (*Half-Duplex FDD*). Este es similar al esquema FDD solo que no puede transmitir y recibir simultáneamente, lo que lo hace más barato y menos complejo que FDD. Sin embargo, sus razones de datos son menores [3]. En la figura 1.7 se ilustra el funcionamiento de los diferentes modos de duplexación:

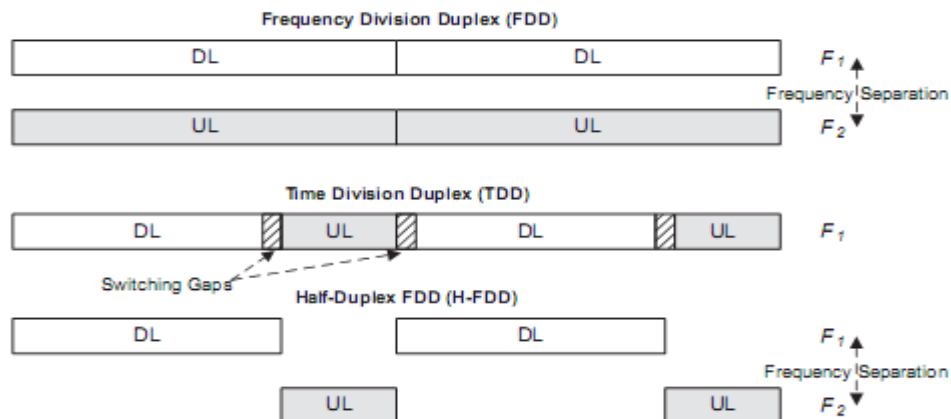


Figura 1.6: Modos de Duplexación [3]

En general, TDD es el modo de duplexación definido por defecto para WiMAX Móvil ya que permite ajustes en la razón de datos en DL/UL para soportar tráficos asimétricos, hace un mejor uso del espectro y su implementación es menos compleja y costosa que la de FDD [22].

1.4.3 Estructura de la Trama

En la figura 1.8 se muestra una trama OFDMA duplexada en el tiempo. Cada trama está dividida en subtramas DL y UL separadas mediante TTG (*Transmit/Receiver Transition Gaps*) o RTG (*Receiver/Transmit Transition Gaps*), con vistas a prevenir colisiones entre las transmisiones DL y UL [32]. En el estándar se definen varios intervalos de tiempo para la duración de la trama, tales como 2, 2.5, 4, 5, 8, 10, 12 y 20 ms [3].

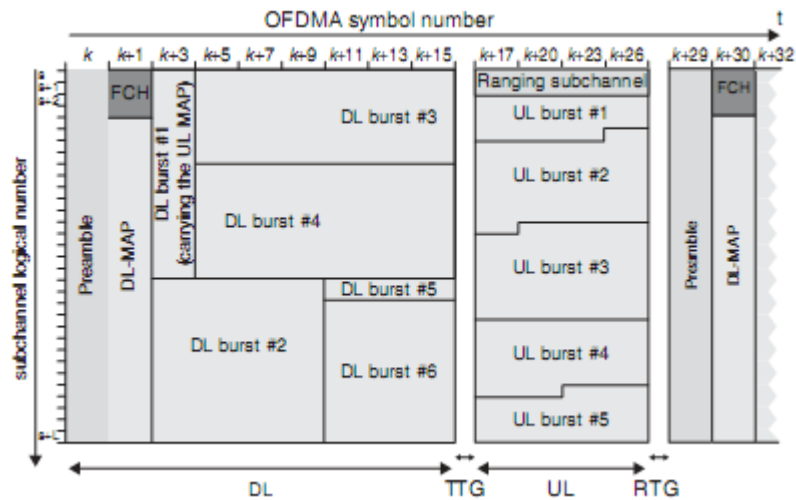


Figura 1.7: Estructura TDD de la trama OFDMA [4]

El primer símbolo OFDM de la trama OFDMA se utiliza para transmitir el preámbulo de la subtrama DL. Este se utiliza para una variedad de procedimientos de la capa física, tales como la sincronización de tiempo y de frecuencia, la estimación inicial del canal y la estimación de ruido e interferencia [13].

El símbolo que sigue al preámbulo emplea los primeros subcanales para ubicar el FCH (Frame Control Head). Su función es llevar mensajes de configuración de la trama como el tamaño de los mensajes MAP, la modulación y el esquema de codificación utilizado y las subportadoras utilizables. En FCH se utiliza BPSK con razón de código $\frac{1}{2}$ para alcanzar un desempeño robusto y seguro [4].

A continuación del FCH están los mensajes DL-MAP y UL-MAP, en los que se especifica la región de datos de los usuarios en las subtramas DL y UL para cada trama OFDMA.

Mediante la obtención de estos mensajes, cada SS puede identificar los recursos ubicados en las subtramas DL y UL para su uso [13].

Otro aspecto importante en la subtrama DL es la transmisión periódica del DCD (Downlink Channel Descriptor) y el UCD (Uplink Channel Descriptor) después del mensaje UL-MAP [34]. Estos mecanismos contienen información adicional pertinente a la descripción de la estructura del canal y las diversas combinaciones entre modulación y codificación permitidas en la BS. Con vistas a hacer un buen uso de los recursos, los DCD y UCD no son transmitidos en todas las tramas [13].

En la subtrama UL los subcanales de *ranging* son utilizados por las MS para hacer pedidos de ancho de banda a la BS o ajustes de potencia, frecuencia y tiempo con la misma [22]. Por último las ráfagas DL y UL son aquellas porciones de la trama donde un SS puede encausar su tráfico de datos, previa gestión con la BS.

1.4.4 Tipos de subcanalización

En el estándar se definen cuatro tipos de subcanalización [4]:

- DL FUSC (*DL Full Usage of Subcarriers*): Cada *slot* está formado por un subcanal por símbolo OFDM. Un solo subcanal está compuesto por 48 subportadoras que no son necesariamente contiguas.
- DL PUSC (*DL Partial Usage of Subcarriers*): Cada *slot* está formado por un subcanal por dos símbolos OFDM. Un subcanal consiste en 24 subportadoras agrupadas en dos *clusters*.
- UL PUSC y TUSC (*Tile Usage of Subcarriers*): Cada *slot* constituye 16 subportadoras por tres símbolos OFDM.
- AMC (*Advanced Modulation and Coding*): Cada *slot* consiste en 8, 16 o 24 subportadoras por 6, 3 y dos símbolos OFDM respectivamente.

Donde el *slot* es la mínima unidad de recursos que puede ser asignado a un usuario bajo el estándar IEEE 802.16.

1.4.5 Múltiples antenas

Parte integral en el diseño de redes de acceso inalámbricas de banda ancha, basadas en el estándar 802.16, es la utilización de configuraciones multiantenas SIMO (Single In Multiple Out) y MIMO [30]. Estas permiten alcanzar una mejora significativa en la capacidad del sistema y una mayor eficiencia espectral en la red, teniendo solo como limitantes la complejidad y precio de su implementación [31].

En el caso de la enmienda IEEE 802.16e, se hace uso de dos configuraciones MIMO de lazo abierto, Matriz A para diversidad y Matriz B para multiplexación espacial. Además, se incluyen esquemas de lazo cerrado para realizar el proceso de *beamforming* solo para el modo de duplexación TDD. Esta enmienda permite sistemas MIMO, de dos y cuatro antenas, sin embargo su aplicación se enfoca principalmente en sistemas de hasta 2x2 antenas [4, 13, 22].

1.4.6 Calidad del Servicio (QoS)

QoS (*Quality of Service*) es un concepto en el que los requisitos de servicio de algunas aplicaciones de usuarios son más críticas que otras, lo que requiere un manejo preferencial del correspondiente tráfico. El objetivo de la calidad de servicio es proporcionar prestaciones de servicios preferencial a las aplicaciones que lo necesiten, garantizando suficiente ancho de banda, el control de la latencia y la reducción de la pérdida de datos. Mediante el uso de los mecanismos de QoS de red, administradores u operadores pueden utilizar los recursos existentes de manera eficiente y garantizar el nivel requerido de un servicio sin sobredimensionar sus redes. Debido a que los requerimientos QoS para diferentes servicios de datos que atraviesan una red IEEE 802.16 pueden variar grandemente, se han implementados mecanismos de manejo y transporte para satisfacer esa variedad [17].

1.4.6.1 Scheduler y servicios de scheduling

Bajo el estándar IEEE 802.16, una red opera con servicios de *scheduling* centralizados en la BS, donde el *scheduler* de la misma es el responsable los parámetros físicos de transmisión para una conexión mediante el reporte de calidad del canal enviado por la MS. Es entonces cuando tomando en cuenta los parámetros de QoS de los flujos de servicios y los reportes de calidad, el *scheduler* ajusta la razón de datos y la latencia para el enlace DL y UL de una determinada MS [3].

Aunque hay implementaciones propietarias, en la literatura se reportan tres *schedulers* bien definidos, que son [8]:

- *Round Robin*: que garantiza un tiempo igual de transmisión a todos los usuarios, independiente de la condición de radio. No es muy eficiente porque si el usuario no tiene la mejor condición de radio se le asignan recursos de todas formas. Este tipo de *scheduler* es apropiado para sistemas rurales con zonas despejadas.
- *Proportional Fair*: asigna un tiempo proporcional a la condición de radio instantánea, generando un valor de prioridad sobre los usuarios. Es apropiado para ambientes

urbanos de alta densidad de población porque mantiene un número alto de usuarios con la menor razón de transmisión.

- *Max CINR (Max Carrier- Interference and Noise Ratio)*: se le sirve al usuario la mejor condición de radio instantánea, siendo injusto porque los SS más cercanos a la BS tendrán mayor tiempo de transmisión y mayor razón de datos.

1.4.6.2 Flujos de Servicio

El principal mecanismo para proveer QoS es asociar paquetes de datos transportados a través de la interfaz MAC a flujos de servicios. Estos tipos de flujos son unidireccionales, están asociados con un conjunto único de parámetros de QoS y presentan los siguientes componentes [17]:

- *SFID (Service Flow ID)*: Identificador de 32 bits asignado a cada flujo de servicio.
- *CID (Connection ID)*: Identificador de 16 bits de la conexión lógica a ser usada para transportar un flujo de servicio.
- *Conjunto de parámetros QoS previstos*: Parámetros QoS recomendados para el uso de flujos de servicios, usualmente provistos por las entidades de las capas superiores.
- *Conjunto de parámetros QoS admitidos*: Parámetros otorgados a los flujos de servicio para los cuales la BS y la MS reservan los recursos de la capa física y la capa MAC. Los parámetros QoS admitidos pueden ser un subconjunto de los parámetros QoS previstos cuando la BS no puede admitir servicios con los parámetros QoS previstos.
- *Conjuntos de parámetros QoS activos*: Parámetros QoS otorgados a un flujo de servicio en un tiempo dado.
- *Módulo de autorización*: Función lógica de la BS que aprueba o rechaza cada cambio en los parámetros QoS y en las clasificaciones asociadas con un flujo de servicio.

1.4.6.3 Clases de Servicio

La enmienda IEEE 802.16e define para la capa MAC el uso de cuatro clases de servicios previamente utilizadas por el estándar e introduce una nueva, ertPS (*extended real-time Polling Service*) [1]:

- *UGS (Unsolicited Grant Service)*: Diseñado para soportar flujos de servicio en tiempo real que generen paquetes de datos de tamaño fijo en intervalos de tiempo constantes. Mediante este tipo de servicios la BS asigna periódicamente espacio

disponible por lo que la MS no tiene la necesidad de realizar una petición por ancho de banda.

- *rtPS (real-time Polling Service)*: Diseñado para soportar servicios en tiempo real que generen paquetes de datos de tamaño variable. Esta clase de servicio, permite a la BS otorgar oportunidades de sondeo *unicast* para peticiones de ancho de banda realizadas por las MS.
- *nrtPS (non-real-time Polling Service)*: Similar a *rtPS* solo que la petición por ancho de banda se realiza empleando sondeo en intervalos de contención.
- *BE (Best-Effort service)*: Diseñado para proveer muy poco soporte de QoS y es aplicable solo para servicios que no tienen estrictos requerimientos de QoS. Utiliza sondeo en intervalos de contención para realizar el sondeo de peticiones de ancho de banda.
- *ertPS (extended real-time Polling Service)*: Nuevo servicio de *scheduling* donde se utilizan los puntos fuertes de *UGS* y *rtPS*. En este caso, el mensaje UL provisto por la MS puede ser utilizado para la transmisión de datos o para requerir ancho de banda adicional. Esto permite que *ertPS* acomode servicios de datos donde los requerimientos de ancho de banda cambien con el tiempo.

1.4.6.4 Parámetros Globales de las clases de servicio

Los parámetros globales que caracterizan una clase de servicio en IEEE 802.16e son los siguientes [3]:

- *Indicador UL/DL*: Indica la dirección del flujo de servicio.
- *Máxima razón sostenida de tráfico*: Define la razón pico de información del servicio.
- *Máxima ráfaga de tráfico*: Parámetro que define el tamaño máximo de la ráfaga que es procesada para un servicio.
- *Mínima razón de tráfico reservada*: Parámetro que define la razón mínima, en bits por segundo, reservada para un servicio.
- *Latencia mínima*: Parámetro cuyo valor especifica el intervalo máximo entre la recepción del dato en la cama MAC de convergencia y la transmisión de la correspondiente PDU sobre la interfaz aérea.
- *Indicador SDU*: Especifica si el SDU (Service Data Unit) es fijo o variable.
- *Preferencia de paging*: Es un solo bit que indica la preferencia de la MS para la recepción de mensajes de aviso de *paging* en el modo Idle.

- *Tipo de scheduling concedido en UL*: Parámetro que especifica qué tipo de servicio *scheduling* es asociado en flujo de datos de subida.
- *Tolerancia al jitter*: Parámetro que especifica el máximo *jitter* soportado para la conexión.
- *Prioridad de tráfico*: Parámetro cuyo valor da la prioridad de un flujo de servicio.
- *Intervalo no solicitado de concesión*: Parámetro que define el intervalo entre oportunidades consecutivas de concesión para flujos de servicios DL.
- *Intervalo no solicitado de encuesta*: Parámetro que define el intervalo entre oportunidades consecutivas de encuesta para flujos de servicio UL.

1.4.7 Manejo de Potencia

Para sistemas móviles un aspecto importante a tener en cuenta es el manejo eficiente de potencia ya que permite un mayor tiempo de vida a las baterías de las MS y un mejor uso de los recursos de la BS. Este aspecto es tratado en IEEE 802.16e de dos formas: el modo *Sleep* y el modo *Idle* [13].

El modo *Sleep* es un estado de operación en el cual la MS conduce períodos de ausencia pre-negociados con la BS. Estos períodos son caracterizados por la ausencia, vista desde la BS, de tráfico desde y hacia la MS. Este método minimiza la potencia utilizada por la MS y la utilización de los recursos de la BS, además otorga flexibilidad en la MS a la hora de realizar el proceso de *handoff* [22].

El modo *Idle* presenta un mecanismo que permite a la MS estar disponible para recibir tráfico de radiodifusión sin estar registrada a una BS específica. De este modo se beneficia la MS y se mejora la interfaz aérea de la red y la BS al no resultar necesario el tráfico dedicado a *handoff* [22]. Para la operación del modo *Idle* a las BS se le asigna un *paging group*. Por lo que en este estado la MS monitoriza los mensajes de radiodifusión de la red para determinar en que *paging group* se encuentra, si detecta que se ha movido a uno nuevo, entonces realiza una actualización [13].

1.4.8 Handoff

En el caso de la enmienda IEEE 802.16e, *hard handoff* es el método de traspaso implementado aunque se incorporan dos métodos *soft handoff* opcionales [22]:

- FBSS (Fast Base Station Switching)
- MDHO (Macro Diversity Handover)

Con *hard handoff* la decisión del traspaso de la conexión entre una BS y otra se puede realizar por parte de la BS actual, la MS, o cualquier otra entidad de la red, de acuerdo con resultados cualitativos de la conexión. El suscriptor realiza periódicamente un escaneo de la señal, midiendo su calidad con respecto a otras BS y comparándolas con la BS actual. Una vez que se toma la decisión del traspaso, se termina la conexión con la BS previa y la MS inicia la sincronización con la transmisión del enlace de bajada de la BS elegida, realizando el proceso de asociación si no se había iniciado durante el escaneo previo de las BS [13].

En FBSS, la MS cuenta con una lista de BS visibles, denominada lista activa. Continuamente se actualiza dicha lista, iniciando procedimientos de asociación, y manteniendo una identificación válida de conexión con cada una de ellas. La MS, sin embargo, se comunica únicamente con una BS simultáneamente, a la que se denomina BS principal o central. Cuando es necesario un cambio de BS principal, la conexión se intercambia de una a otra BS sin realizar explícitamente el proceso de señalización de traspaso [30].

MDHO es un método similar a FBSS, excepto por el hecho de que la MS se comunica simultáneamente en DL y UL con todas las BS de su lista activa. En DL, se utiliza técnicas de diversidad de recepción, para combinar las múltiples copias recibidas en la MS. En UL, la MS realiza envíos hacia múltiples BS, utilizándose la diversidad de selección para elegir el mejor UL [30].

1.4.9 Seguridad

Con vistas a resolver el siempre presente problema de la seguridad, la enmienda IEEE 802.16e adoptó las principales tecnologías existentes. La capa MAC es la encargada de manejar este aspecto de la comunicación mediante la autenticación del usuario y el dispositivo, una fuerte encriptación del tráfico de datos, protocolos flexibles para el manejo de llaves, protección para los mensajes de control y optimización del protocolo de seguridad para realizar rápidos *handoffs* [13].

Para un manejo flexible de llaves se utiliza el protocolo PKMv2 (Privacy Key Management version 2) con el cual se transmite material sensible desde la BS a una MS que periódicamente reautoriza o actualiza las llaves. La autenticación está basada en el uso de EAP (Extensible Authentication Protocol), que soporta una variedad de credenciales, como usuario/contraseña, o certificados digitales [32].

Respecto a la encriptación de datos del usuario se utilizan esquemas robustos como AES (Advanced Encryption Standard) y 3DES (Triple Data Encryption Standard), de los cuales se usa principalmente AES debido a su fácil implementación. La llave de encriptación, de al

menos 64 bits, usada para el cifrado es generada en el proceso de autenticación y es periódicamente actualizada para aumentar protección. Por otro lado, para dar protección a los mensajes de control proveniente de la BS se emplea esquemas como CMAC (cipher-based message authentication code) y HMAC (hash-based message authentication code) [22].

Debido a que el estándar 802.16e ofrece mecanismos de *handoff* se hace necesario, para mantener un entorno seguro, el uso de esquemas que permitan mecanismos óptimos de re-autenticación. Para esto se permite a la MS una pre-autenticación con la BS a utilizar y el uso de esquemas *three-way handshake* [22].

1.5 IEEE 802.16-2009

El estándar IEEE 802.16-2009 comprende dos modos de operación o topologías: uno obligatorio, PMP y uno opcional, MR. Mientras los dos modos describen comunicaciones regulares entre la BS y las SS, en el modo opcional se incluye el RS (*Relay Station*) como intermediario entre la BS y el SS. La figura 1.8 da una muestra de una red WiMAX basada en el modo MR [4].

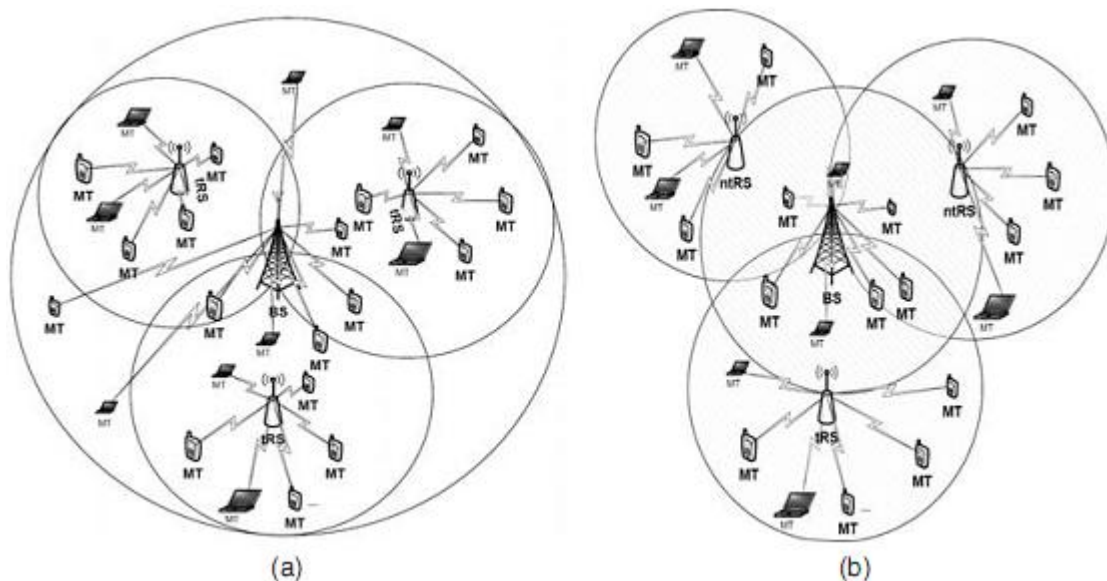


Figura 1.8: Ejemplos de red WiMAX empleando MR [4]

El modo de operación MR tiene dos finalidades apreciables. En la figura 1.8a se emplea para aumentar la razón de datos, mientras en la figura 1.8b su objetivo es aumentar la zona de cobertura de la célula.

Con vistas a lograr la movilidad, este estándar recoge en su interior a la enmienda IEEE 802.16e, por lo que en este aspecto es idéntico a su predecesor, salvo que en el estándar IEEE 802.16-2009 para alcanzar un nuevo techo en las razones de datos, se implementó

configuraciones MIMO con un número incrementado de antenas en los terminales de comunicación. Otro aspecto nuevo en este estándar es la aplicación de *seamless handoff*. *Seamless handoff* es una variante de *hard handoff* que reduce el retardo del proceso de traspaso. Esta solución provee una continuidad en la conexión *end-to-end* donde no hay pérdidas en la actividad del enlace de bajada al realizarse el proceso de *handover*. Esto significa que una MS utilizando una aplicación mediante su conexión a una BS puede hacer el traspaso de BS sin comprometer a la aplicación activa [17].

1.6 Concepto y estructura de la metodología

El concepto de metodología ha tenido múltiples definiciones, de acuerdo al entorno cognoscitivo en el cual se emplee. Para este trabajo se empleara como concepto de metodología, el definido en [33]:

“Aquel proceso donde un conjunto de métodos, procedimientos y técnicas, regulados por determinados requerimientos, permiten ordenar mejor el pensamiento y modo de actuación para obtener, descubrir nuevos conocimientos en el estudio de los problemas de la teoría o en la solución de problemas de la práctica.”

Analizada en un sentido más concreto, se pueden distinguir dos acepciones de la metodología: como aporte teórico y como aporte práctico. Se considera un aporte teórico cuando va dirigida al incremento del saber científico sobre la esencia del objeto y se trata de un aporte de significación práctica cuando incide en la transformación del objeto.

La diferencia esencial entre ambos, no radica en los elementos que la constituyen (métodos, procedimientos, técnicas, medios) sino en la función que desempeña con relación al objeto de estudio.

En el estudio y elaboración de una metodología se debe tener en cuenta sus componentes (estructura) y el modo de proceder (proceso).

En cuanto a la estructura de la metodología, según [34] esta se compone de dos aparatos estructurales: el aparato teórico o cognitivo y el metodológico o instrumental.

El aparato teórico o cognitivo está conformado por el cuerpo categorial que a su vez incluye las categorías y conceptos y el cuerpo legal que se compone de leyes, principios o requerimientos. Los conceptos y categorías que forman parte del aparato teórico cognitivo de la metodología son aquellos que definen aspectos esenciales del objeto de estudio, mientras el cuerpo legal está formado por los principios o requerimientos que regulan el proceso de aplicación de los métodos, procedimientos, técnicas y medios.

El aparato metodológico o instrumental, está conformado por los métodos teóricos y empíricos, las técnicas, procedimientos y medios que se utilizan para obtener los conocimientos o para intervenir en la práctica y transformar el objeto de estudio.

En su condición de proceso, la metodología requiere de la explicación de cómo funciona la misma en la práctica, cómo se combinan los métodos, procedimientos, medios y técnicas, cómo se tienen en cuenta los requerimientos en el desarrollo del proceso y los pasos que se siguen para alcanzar los objetivos propuestos.

En esta investigación se modela la metodología asumiendo la necesidad de sistematizar lo estructural (aparato teórico o cognitivo y metodológico o instrumental) con lo procesal para revelar cómo funciona la metodología en sus fases y pasos condicionantes, tal como se muestra en la figura 1.9.

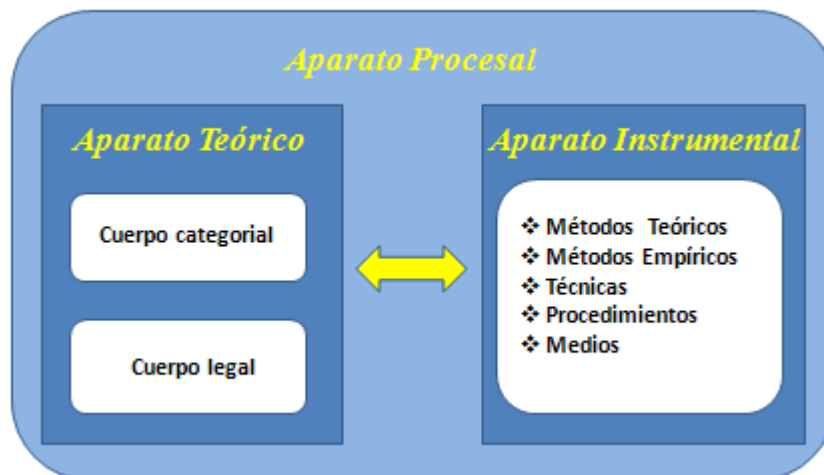


Figura 1.9: Modelación de la Metodología

1.7 Metodologías para el diseño de redes WiMAX

Después de realizar una amplia revisión bibliográfica se pudo constatar la escasez de estudios o trabajos investigativos que definan una metodología para el diseño de redes WiMAX o una red inalámbrica genérica. Sobre el tema hay un número limitado de estudios donde no siempre se tiene en cuenta las complejidades de la tecnología WiMAX o simplemente se aborda el problema tratando por separado aspectos esenciales del diseño de una red inalámbrica que podrían formar parte del aparato procesal de la una posible metodología de diseño. En muchos casos los estudios se enfocan en el dimensionamiento de la red o en su optimización, en otros casos los estudios se centran más en la factibilidad económica del diseño propuesto.

En Valdebenito [7], trabajo que se enmarca más allá de solo la tecnología WiMAX, se define un adecuado esquema de planificación general para las redes de inalámbricas, se describen aspectos básicos de la capa física y la capa MAC de la tecnología WiMAX y se brinda elementos claves del aparato instrumental de la tecnología. Sin embargo, aunque menciona que se han de tener en cuenta las regulaciones tanto nacionales como internacionales respecto a la tecnología no se especifican las mismas, no se tuvo en cuenta ninguna consideración respecto al fenómeno de la interferencia y además su estudio de capacidad de la red es superficial pues no se abordó la QoS y su impacto en el mismo. Por último, no se tuvo en cuenta un análisis comparativo entre el estudio de capacidad y el estudio de cobertura que permitiera dimensionar adecuadamente la red, ni tampoco se tuvo en cuenta el impacto económico de una posible implementación.

Jadue [5] define un esquema de entradas y salidas como metodología para el diseño de redes de telecomunicaciones. En el caso de las redes inalámbricas se tiene en cuenta los parámetros iniciales de la red, las características técnicas, de cobertura y capacidad de la tecnología a implementar, así como las restricciones que se tendrán que tener presentes durante el diseño y el proceso de optimización de la red. Para ello se divide el mapa de trabajo en pequeñas cuadrículas las cuales quedan definidas con información clave desde el punto de vista del operador, permitiéndole tomar las medidas pertinentes para su despliegue de red. A pesar de esto, el trabajo adolece de un estudio profundo respecto al tema de la cantidad de usuarios a los que se puede dar servicios en un sector teniendo en cuenta los parámetros de QoS, no hace un análisis comparativo entre el estudio de capacidad y el de cobertura para dimensionar adecuadamente la red y además no toma en cuenta la interferencia que puede estar presente en los sistemas de comunicaciones inalámbricos. En este trabajo también se obvian los métodos para determinar la factibilidad económica del diseño de red.

Los dos trabajos anteriores son una muestra de los principales problemas que se tienen a la hora del diseño de una red WiMAX y que están presentes, en mayor o menor grado, no solo en ellos sino en Valdivia [8], Estopiñan [9], Bermejo [10], Chen y Marca [11], y García [12]. En Valdivia [8] aunque se hace una comparación entre el estudio de capacidad y de cobertura para determinar el número de BS presentes en el diseño de red, el estudio de cobertura es insuficiente así como el análisis de interferencia, además la factibilidad económica del diseño solo tiene en cuenta las inversiones iniciales. Algo similar ocurre en Estopiñan [9], donde solo se tiene en cuenta enlaces punto a punto y la capacidad de los mismos se da por satisfecha, aquí también el análisis económico solo abarca las inversiones

iniciales. En el caso de Bermejo [10] y Chen y Marca [11], se realizan interesantes análisis económicos sobre la viabilidad del diseño de una red WiMAX Móvil, sin embargo, el estudio de capacidad solo se limita a determinar la velocidad de transmisión de un sector, siendo así incompleto. Por último en García [12], el diseño de una red WiMAX solo se realiza desde el punto de vista del análisis de cobertura, simplificando demasiado el diseño y haciéndolo inviable ante una carga de tráfico que sobrepase los requisitos del equipamiento.

Para solucionar el problema de dimensionar la capacidad de una red WiMAX Móvil se tienen varios enfoques. En Zhang [35] se propone la asignación rígida de los recursos de ancho de banda del canal teniendo en cuenta los tipos de servicios que se ofrezcan, esta opción no es la más viable pues es ineficiente. So-In, Jain y Tamimi [36] definen un método para determinar la cantidad de usuarios por sector tomando en cuenta la trama OFDMA de la tecnología WiMAX, aunque es un método muy exacto, el mismo es descrito solamente para un servicio a la vez, lo que lo hace poco utilizable en la práctica donde hay simultaneidad de servicios. En el caso de Admadzaded [37] se tiene en cuenta la simultaneidad de servicios presentes en la tecnología WiMAX Móvil, sin embargo, la distribución del tráfico de cada servicio respecto al tráfico total se toma de las redes móviles de tercera generación pues no existen análisis de tráfico precedentes en las redes WiMAX Móvil.

Por último en Rawi, Sharif y Tsimenides [38], se propone un método de planificación para redes inalámbricas que se basan en la tecnología OFDMA. Los autores consideran un patrón de tráfico heterogéneo, con una amplia variedad de demandas de servicio en términos de velocidad de datos y la calidad de servicio. El objetivo del trabajo es proporcionar igualdad de la carga de todas las células. El método propuesto provee una óptima solución para el posicionamiento de la BS y la asignación de recursos. Sin embargo, su principal limitación es el número relativamente pequeño de usuarios que se utiliza en el experimento y el hecho de que se encuentren distribuidos al azar. Además el modelo del costo es simplista, ya que sólo considera la minimización de los costos de la red, a través de la reducción al mínimo del número de BS.

1.8 Conclusiones Parciales

Una vez finalizado este primer capítulo se pueden llegar a las siguientes conclusiones:

1. La descripción de los aspectos más significativos de la tecnología WiMAX revela las múltiples opciones de implementación de la misma, tanto en escenarios como en servicios. Teniendo en cuenta lo anterior, el diseño de una red de este tipo se adecua

a múltiples variantes tecnológicas, haciendo que la búsqueda de la mejor solución a implementar sea un proceso complejo.

2. El diseño de una red WiMAX Móvil cuenta con un número limitado de trabajos enfocados principalmente en el dimensionamiento, optimización y valoración de la factibilidad de red propuesta, sin tener una metodología definida para el diseño y donde no siempre se tienen en cuenta las complejidades de la tecnología. Esto hace que exista la necesidad de crear una metodología capaz de integrar armónicamente todos los aspectos relacionados con el diseño de una red WiMAX Móvil.
3. El aporte teórico realizado en este capítulo respecto a la tecnología WiMAX y en especial WiMAX Móvil constituyen una base sólida para elaborar una metodología de diseño para este tipo de redes.

CAPÍTULO 2. Metodología para el diseño de una red WiMAX Móvil

2.1 Introducción

Teniendo en cuenta la importancia que reviste una adecuada metodología para el diseño de cualquier red de telecomunicaciones, en este capítulo se presenta el diseño de una metodología para redes WiMAX Móvil. Para ello se sigue la estructura propuesta en la sección 1.7 que se ha representado según se muestra en el Anexo A.

2.2 Aparato Teórico o Cognoscitivo

Para el desarrollo de este elemento de la estructura de la metodología, se dividirá este acápite en dos partes, donde una desarrollará los elementos fundamentales del cuerpo categorial referido a la tecnología WiMAX Móvil y la otra brindará los aspectos legales y normativos de dicha tecnología.

2.2.1 Cuerpo Categorial

El cuerpo categorial engloba conceptos y categorías referidas a los estándares, la arquitectura de la red, además de las topologías y tecnologías empleadas en la tecnología WiMAX Móvil. Teniendo en cuenta que lo anteriormente mencionado ya ha sido tratado de forma amplia a lo largo del capítulo 1, se obviará el desarrollo del cuerpo categorial.

2.2.2 Cuerpo Legal

Al ser WiMAX Móvil una tecnología global, las normativas generales de la misma están definidas por la acción de tres entidades internacionales de las telecomunicaciones: ITU-R, IEEE y el *WiMAX Forum*. Sin embargo, para la implementación de esta tecnología, corresponde a los diferentes estados nacionales regular su uso. La figura 2.1 presenta la estructura del cuerpo legal de la tecnología WiMAX Móvil.

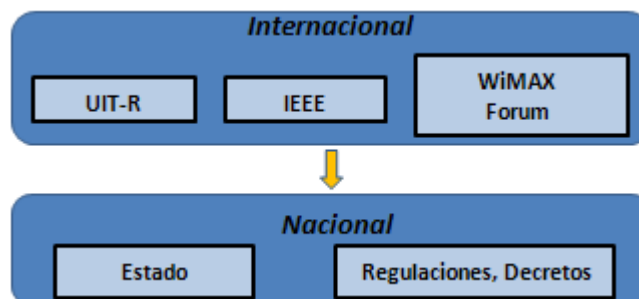


Figura 2.1: Cuerpo legal para WiMAX Móvil.

2.2.2.1 ITU-R

La ITU, fundada en 1865 como unión postal, es la organización más vieja y relevante en el campo de la regulación de las telecomunicaciones. Su membresía está restringida a agencia gubernamentales de telecomunicaciones, o sea, los operadores de telecomunicaciones, los proveedores de la tecnología y los usuarios están representados por sus respectivos gobiernos.

La ITU está dividida en tres secciones, de las cuales la ITU-R es la encargada de regular las radiocomunicaciones. Cada regulación de la ITU-R está asociada a una serie que define la categoría, dentro de las radiocomunicaciones, en la cual esta se enmarca. Para el caso de las comunicaciones móviles, las regulaciones se encuentran en la serie M.

La misión fundamental de la ITU-R es concertar la regulación internacional del uso del espectro para limitar o eliminar totalmente las posibles e indeseables interferencias, tratar que las recomendaciones y regulaciones de carácter internacional sean acatadas por todos sus miembros, pero la ITU-R no tiene poder legal para regular el uso del espectro radioeléctrico de ningún país.

Referido a la interfaz de radio de WiMAX Móvil la ITU-R ha presentado las siguientes recomendaciones:

- *ITU-R M.1801 “Radio interface standards for broadband wireless access systems, including mobile and nomadic applications, in the mobile service operating below 6 GHz”.* En ella se recomienda el uso de la interfaz IEEE 802.16 en servicios móviles, además se brindan las características fundamentales de la misma.
- *ITU-R M.1457 “Detailed specifications of the terrestrial radio interfaces of International Mobile Telecommunication-2000. (IMT-2000)”.* La interfaz IEEE 802.16 *WirelessMAN- OFDMA* fue introducida dentro del estándar *IMT-2000* de la ITU.
- *ITU-R M.2012 “Detailed specifications of the terrestrial radio interfaces of International Mobile Telecommunication-Advanced. (IMT-Advanced)”.* La interfaz IEEE 802.16 *WirelessMAN-Advanced* queda aprobada como una tecnología *IMT Advanced*.
- *ITU-R M.2039 “Characteristics of terrestrial IMT 2000 systems for frequency sharing/ interference analyses”.* Define la información técnica de los sistemas WiMAX Móvil.

2.2.2.2 IEEE

La IEEE surge en 1963 luego de la fusión del AIEE (*American Institute of Electrical Engineers*) y el IRE (*Institute of Radio Engineers*) y actualmente es una autoridad para la estandarización, investigación e intercambio científico en las esferas aeroespacial, computacional, de las telecomunicaciones, de la ingeniería biomédica, etc. Esta es una institución con una amplia membresía distribuida por todo el mundo y juega un papel muy importante no solo en la industria sino también en el ámbito académico. En el sector de las telecomunicaciones, actualmente la IEEE presenta 22 grupos de trabajo bajo el proyecto IEEE 802, donde se estudia principalmente las dos capas más bajas del modelo de referencias OSI (*Open Systems Interconnection*) [16].

En lo referente a WiMAX Móvil, esta tecnología se basa en un grupo de estándares publicados por el grupo de trabajo 16, donde se definen las especificidades de la capa física y MAC para redes WMAN. Para el caso de WiMAX Móvil 1.0, este tiene su base en la enmienda al estándar IEEE 802.16e, para la evolución de esta tecnología a su versión 1.5 se tomó como base la revisión del estándar IEEE 802.16-2009, mientras que su versión futura, la 2.0, se fundamentará en la enmienda IEEE 802.16m.

2.2.2.3 WiMAX Forum

El *WiMAX Forum* se encarga de controlar con la ayuda de los prestadores de servicio y reguladores, que los productos y sistemas certificados satisfagan las necesidades de los clientes, adaptando y ampliando los estándares [8].

Para el caso de la tecnología WiMAX Móvil, los perfiles del sistema diseñado por el *WiMAX Forum*, están definidos por características opcionales y obligatorias de los estándares emitidos por el grupo de trabajo 16 de la IEEE. En el caso de la primera versión de WiMAX Móvil, los diferentes perfiles presentan una estructura general como la que se muestra en la figura 2.2.

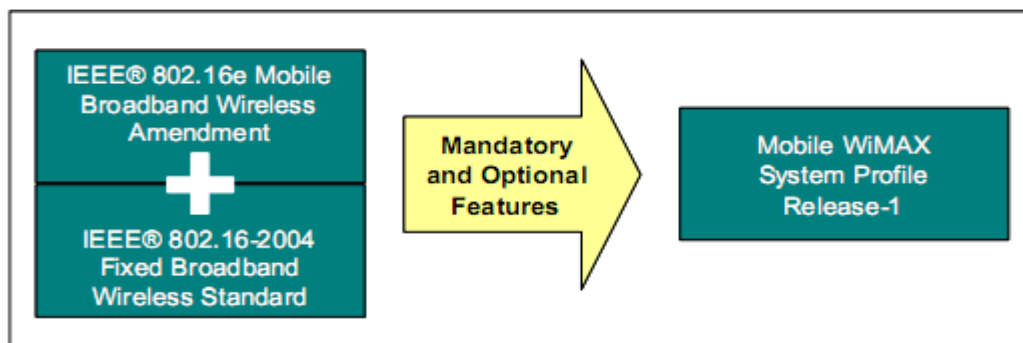


Figura 2.2: Perfil genérico de los sistemas de WiMAX Móvil 1.0 [22]

Los perfiles aprobados por el *WiMAX Fórum* para WiMAX Móvil 1.0 se muestran en la tabla 2.1. Como se puede apreciar, cada uno de dichos perfiles está definido para una banda de frecuencia y para un ancho de banda de transmisión específico.

Tabla 2.1: Perfiles aprobados para WiMAX Móvil 1.0

No	Perfiles
1	Prof1.A_2.3 - 8.75 MHz channel PHY (2.3 - 2.4 GHz)
2	Prof1.B_2.3 - 5 and 10 MHz channel PHY (2.3 - 2.4 GHz)
3	Prof2.A_2.305 - 3.5 MHz channel PHY (2.305 - 2.320, 2.345 - 2.360 GHz)
4	Prof2.B_2.305 - 5 MHz channel PHY (2.305 - 2.320, 2.345 - 2.360 GHz)
5	Prof2.C_2.305 - 10 MHz channel PHY (2.305 - 2.320, 2.345 - 2.360 GHz)
6	Prof3.A_2.496 - 5 and 10 MHz channel PHY (2.496 - 2.69 GHz)
7	Prof4.A_3.3 - 5 MHz channel PHY (3.3 - 3.4 GHz)
8	Prof4.B_3.3 - 7 MHz channel PHY (3.3 - 3.4 GHz)
9	Prof4.C_3.3 - 10 MHz channel PHY (3.3 - 3.4 GHz)
10	Prof5.A_3.4 - 5 MHz channel PHY (3.4 - 3.8 GHz)
	Prof5L.A_3.4 - 5 MHz channel PHY (3.4 - 3.6 GHz)
	Prof5H.A_3.4 - 5 MHz channel PHY (3.6 - 3.8 GHz)
11	Prof5.B_3.4 - 7 MHz channel PHY (3.4 - 3.8 GHz)
	Prof5L.B_3.4 - 7 MHz channel PHY (3.4 - 3.6 GHz)
	Prof5H.B_3.4 - 7 MHz channel PHY (3.6 - 3.8 GHz)
12	Prof5.C_3.4 - 10 MHz channel PHY (3.4 - 3.8 GHz)
	Prof5L.C_3.4 - 10 MHz channel PHY (3.4 - 3.6 GHz)
	Prof5H.C_3.4 - 10 MHz channel PHY (3.6 - 3.8 GHz)

2.2.2.4 MIC

El espectro radioeléctrico es un recurso natural, de carácter limitado, que constituye un bien de dominio público, sobre el cual el estado ejerce su soberanía. Para esto los gobiernos encargan a organizaciones estatales la asignación de frecuencia a entidades y usuarios. Ejemplo de estas organizaciones están a la FCC (*Federal Communications Commission*) en Estados Unidos y la CEPT (*European Conference of Postal and Telecommunications Administrations*) en la Unión Europea.

En el caso de Cuba, el MIC (*Ministerio de Informática y Comunicaciones*) es el órgano regulador de las redes y servicios de informática y comunicaciones y tiene la misión de ordenar la operación e impulsar el desarrollo de las tecnologías de la información y las

comunicaciones, de acuerdo con las políticas fijadas por el estado cubano. Entre sus funciones se incluyen la de elaborar y controlar el cumplimiento de las reglamentaciones correspondientes a los servicios de telecomunicaciones y postales; la gestión del espectro de frecuencias radioeléctricas, las industrias del software y de la electrónica [39].

Referente a la tecnología WiMAX el MIC emitió en el año 2008 la Resolución N° 123, donde se autoriza el empleo y aplicación de la misma, en su versión fija, como elemento de la red pública de telecomunicaciones del país, siempre que la importación de equipos sea a través de los proveedores reconocidos por el MIC y que la instalación y operación de la tecnología WiMAX la realice ETECSA (*Empresa de Telecomunicaciones de Cuba S.A.*).

Como se puede apreciar dicha resolución solo abarca la implementación de la tecnología WiMAX en su versión fija, sin embargo deja un pequeño espacio para casos excepcionales donde se pueda aplicar la versión móvil de la misma.

Además, en el año 2011 emitió la Resolución N° 33 donde se aprueba la utilización de la banda de 2.555 a 2.625 GHz para el desarrollo de aplicaciones de acceso inalámbrico de banda ancha en las redes públicas, donde el ancho banda máximo permitido sería de 10 MHz y el modo de duplexación sea TDD. La distribución de la banda se muestra en la figura 2.3.

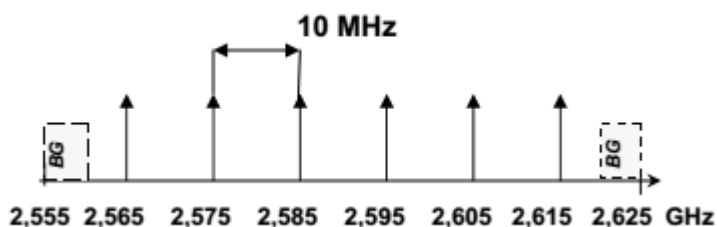


Figura 2.3: Canalización en la banda de 2.555 a 2.625 GHz [39]

2.3 Aparato instrumental

Una vez definido el aparato conceptual, en esta sección se desglosan los métodos teóricos y empíricos, las técnicas, procedimientos y medios que se utilizan para el diseño de una red WiMAX Móvil y que constituyen el cuerpo instrumental de la metodología propuesta.

2.3.1 Bandas de frecuencias licenciadas VS no licenciadas

La eficiente utilización del espectro radioeléctrico es un aspecto fundamental a tener en cuenta en las etapas iniciales del diseño de una red de radiocomunicaciones, cualquiera sea la tecnología que se emplee. En la práctica esto se traduce en que si los requisitos de espectro radioeléctrico no se satisfacen, entonces el diseño no puede seguir adelante.

Teniendo en cuenta esto, el operador tiene dos opciones para la implementación de su sistema, la primera empleando bandas licenciadas y la segunda utilizando bandas no licenciadas.

Las bandas licenciadas son aquellas donde el operador tiene que pagar para la utilización exclusiva de una banda de frecuencia. Esta exclusividad permite una protección contra la interferencia, en otras palabras, previene a los usuarios comerciales de una tecnología de interferir a otros restringiéndolos a una banda de frecuencia específica [19].

En el caso de las bandas no licenciadas, estas no necesitan de un pago para su utilización. Sin embargo, la regla general para la operación en las bandas no licenciadas indica que los usuarios han de estar preparados para soportar interferencia y que no se debe generar un nivel de interferencia capaz de afectar el uso de la banda por otros usuarios. O sea, los usuarios coexisten bajo la idea de “vive y deja vivir”, y lo que garantiza esto son severas limitaciones en potencia de transmisión [19].

En el caso de la implementación de la tecnología WiMAX Móvil, el *WIMAX Forum* ha identificado la bandas de 2.3 GHz, 2,5 GHz, 3.5 GHz y 5.7 GHz para sus certificaciones iniciales, siendo solo la banda de 5.7 GHz no licenciada [13].

2.3.2 Modelos de propagación

Uno de los mayores desafíos en el modelado de un sistema de radiocomunicaciones, para un entorno dado, es la elección de un modelo de propagación que acertadamente represente las condiciones de transmisión que afectan el rendimiento del sistema [40]. En estos modelos el objetivo es hallar la media de las pérdidas de propagación, lo cual se puede realizar usando métodos analíticos aplicando la física fundamental que existe detrás de la radiopropagación o empleando métodos empíricos basados en curvas estadísticas que toman en cuenta mediciones en el terreno [13].

En el caso de implementaciones prácticas de la tecnología WiMAX Móvil, los modelos de propagación que se recomiendan están definidos esencialmente para escenarios sin línea de vista y están basados en la recolección de datos empíricos. Estos modelos se asocian a dos tipos de clasificaciones, el primero toma en cuenta el entorno donde se implementará el sistema, clasificándose como urbano, suburbano o rural; y el segundo toma en cuenta las dimensiones de las celda, clasificándose como macrocelda, microcelda y picoceldas de interiores [41].

La tabla 2.2 muestra los diferentes tipos de modelos de propagación recomendados teniendo en cuenta las dos clasificaciones anteriormente enunciadas.

Tabla 2.2 Modelos de propagación para diferentes escenarios.

Tipo de entorno	Modelo de propagación
Rural - Densidad alta de obstáculos	Erceg – Terreno A
Rural - Densidad media de obstáculos	Erceg – Terreno B
Rural - Densidad baja de obstáculos	Erceg – Terreno C
Suburbano - Macrocela	COST 231 Hata
Suburbano - Microcela	COST 231 Walfish - Ikegami
Urbano - Macrocela	COST 231 Hata
Urbano -Microcela	COST 231 Walfish - Ikegami

En el Anexo B se describe de forma exhaustiva el procedimiento para el cálculo de la media de las pérdidas de propagación para cada uno de los modelos de propagación recomendados para WiMAX Móvil.

Aunque *WiMAX Forum* recomienda la utilización de estos modelos para cada uno de esos escenarios, esto no constituye una restricción para su aplicación en el diseño pues en diferentes escenarios, ya sean urbanos, suburbanos o rurales, se pueden dar casos donde uno de los modelos anteriores se acerque más que los otros a las mediciones reales de una red WiMAX Móvil. Una muestra de esto se encuentra en [42], donde el autor hace un recuento de trabajos realizados para validar modelos de propagaciones en escenarios específicos (Rio de Janeiro, Brasil; Omán, Arabia Saudita; Saarbrucken, Alemania, Mumbai, India; etc.) mediante mediciones reales y no existe uniformidad en la selección del modelo adecuado para cada entorno.

2.3.3 Cálculo de cobertura

El procedimiento para determinar la cobertura que tendría una estación base WiMAX Móvil se basa en la realización del balance de potencia del enlace. El objetivo del mismo es determinar el valor máximo de las pérdidas de propagación que se puedan presentar tanto en el sentido ascendente del enlace como en el descendente, tal y como se muestra en la ecuación 2.1, teniendo en cuenta parámetros del transmisor y el receptor ya previamente definidos. Aunque el proceso de cálculo se hace en ambos sentidos de comunicación, algunos autores como [5, 7, 8] simplemente simplifican el proceso calculando las pérdidas de propagación solo para el enlace ascendente, teniendo en cuenta las inferiores características de potencia de transmisión y ganancias de las SS en comparación con las de la BS.

$$\overline{PL} = \left\{ \begin{array}{l} \left(\begin{array}{l} \text{Potencia} \\ Tx \end{array} \right) + \left(\begin{array}{l} \text{Ganacia} \\ \text{Antena Tx} \end{array} \right) + \left(\begin{array}{l} \text{Otras} \\ \text{Ganancias Tx} \end{array} \right) + \left(\begin{array}{l} \text{Ganancia} \\ \text{antena Rx} \end{array} \right) \\ + \left(\begin{array}{l} \text{Otras} \\ \text{Ganancias Rx} \end{array} \right) - \left(\begin{array}{l} \text{Umbral de} \\ \text{Ruido del Rx} \end{array} \right) - \left(\begin{array}{l} \text{Ruido} \\ \text{t\u00e9rmico} \end{array} \right) - (SNR) \\ - \left(\begin{array}{l} \text{P\u00e9rdidas} \\ \text{interiores} \end{array} \right) - (\text{Margen}) + \left(\begin{array}{l} \text{Correcci\u00f3n del} \\ \text{tipo de terreno} \end{array} \right) \end{array} \right\} \quad (2.1)$$

De la expresi\u00f3n, el ruido t\u00e9rmico depende de la banda del canal y se puede calcular como:

$$\left(\begin{array}{l} \text{Ruido} \\ \text{t\u00e9rmico} \end{array} \right) = -174 + 10 \log_{10} \left(BW \times \frac{28}{25} \times \frac{\text{subportadoras}}{\text{de datos}} \right) \quad (2.2)$$

OFDM

Donde BW es el ancho de banda en Hz sobre el que se mide el ruido. Este ancho de banda puede ser elegido entre 1.25 MHz, 5 MHz, 10 MHz y 20 MHz, siendo el m\u00e1s com\u00fan actualmente 10 MHz. Para el c\u00e1lculo del ruido t\u00e9rmico BW debe ser reducido al ancho de banda efectivo, por lo que el valor de ancho de banda tendr\u00e1 que multiplicarse por el n\u00famero de subportadoras utilizadas para datos, dividido entre el total y multiplicado por el factor de muestreo. Para cada ancho de banda el modelo est\u00e1 compuesto del n\u00famero de subportadoras y la cantidad de ellas utilizadas para datos, tal como se muestra en la tabla 2.3. El factor de muestreo determina el espacio entre subportadoras y el tiempo de s\u00edmbolo \u00fatil. Este valor se toma 28/25 para canales con ancho de banda m\u00faltiplo de 1.25, 1.5, 2 \u00f3 2.75 MHz.

Tabla 2.3: Relaci\u00f3n ancho de banda con n\u00famero de subportadoras.

Ancho de banda	N\u00famero total de subportadoras	N\u00famero de subportadoras de datos
1.25 MHz	128	72
5 MHz	512	360
10 MHz	1024	720
20 MHz	2048	1440

El esquema de modulaci\u00f3n utilizado tambi\u00e9n tiene influencia en el balance de potencia del enlace. Sus valores correspondientes para determinadas SNR (*Signal to Noise Ratio*) en el receptor se pueden ver en la Tabla 2.4.

Tabla 2.4: Relación señal a ruido para diferentes esquemas de modulación.

Esquema de modulación	SNR
BPSK 1/2	6.4 dBm
QPSK 1/2	9.4 dBm
QPSK 3/4	11.2 dBm
QPSK 3/4	16.4 dBm
16-QAM 3/4	18.2 dBm
64-QAM 2/3	22.7 dBm

Ya que la expresión incluye cobertura en interiores, hay que tener en cuenta las pérdidas ocasionadas en este tipo de entornos. En diferentes estudios se toman valores comprendidos entre 10 y 20 dB [10].

Para la determinación del Margen, este se considera la suma de margen por *Fading* y el margen de interferencia. El primero toma un valor fijo de 5 dB, mientras que el segundo toma valores de acuerdo al modelo de reutilización de frecuencia empleado (2 dB para 1x3x1 y 0.2 dB para 1x3x3).

El último término de la expresión está dado por la utilización del modelo de propagación Erceg para cualquier tipo de entorno (aunque no sea lo recomendado), o sea, si se emplea otro modelo de propagación este término se obvia. Esto se debe a que el modelo de propagación Erceg no tiene en cuenta que los edificios existentes en un entorno obstruyen la transmisión. Los valores para cada tipo de entorno se pueden ver en la Tabla 2.5 [11].

Tabla 2.5: Corrección por entorno.

Tipo de entorno	Corrección
Rural	+5 dB
Suburbano	0 dB
Urbano	-3 dB
Urbano denso	-4 dB

2.3.4 Área de la celda

WiMAX Móvil utiliza una estructura de red celular, por lo que se considera que la celda tiene forma hexagonal y su área está dada por la siguiente expresión:

$$A = 3 \times d^2 \times \sin(\pi/3) \quad (2.3)$$

Donde d es el radio de cobertura de la BS.

2.3.5 Cálculo de capacidad

Este análisis tiene como fin determinar la cantidad máxima de usuarios por sector en una BS. El mismo tiene el objetivo de satisfacer la demanda de tráfico teniendo en cuenta el factor de actividad, la razón de contención y la razón entre DL y UL en el modo TDD, con vista a asegurar suficiente capacidad en la interfaz aérea para un amplio rango de servicios [43].

Con vistas a alcanzar resultados fiables en este análisis, se tienen en cuenta tres opciones:

- Método analítico.
- Recomendación del fabricante.
- Simulaciones y procesamiento estadístico.

En el método analítico, se determina la cantidad máxima de usuarios mediante la expresión 2.4, donde N es la cantidad de usuarios, BW_D la razón de datos que ofrece el sector, BW_U razón de datos por usuario y CR la razón de contención. Es un método relativamente sencillo y fácil de implementar. El mayor problema de este método es la falta de exactitud, pues sus cálculos están basados en valores promedios del funcionamiento del sector y los efectos nocivos, como la interferencia, no se tienen en cuenta. Con la segunda opción, el número máximo de usuarios lo brinda el fabricante de la BS. Aun así ese número varía significativamente en dependencia del escenario donde se implemente la red y tampoco es exacto. Por último, la tercera opción es la que más exactitud otorga al cálculo del número de usuarios por sector, aun así esa exactitud corre a cargo de un aumento de la complejidad en los procesos de cálculo [43].

$$N = \frac{BW_D}{BW_U / CR} \quad (2.4)$$

2.3.5.1 Consideraciones de QoS y Tráfico

En la sección 1.4.6.3 se dio una breve descripción de los principales parámetros de las clases de servicio. En esta sección se volverán a analizar algunos de esos parámetros desde el punto de vista de la ingeniería de tráfico. En general, las clases de servicio están

relacionadas con cada aplicación mediante dos tipos de razones de datos: *Mínima razón de tráfico reservada* y *Máxima razón sostenida de tráfico*.

Basándose en lo anterior, pueden ser definidos tres tipos de flujos de servicios para soportar las aplicaciones de WiMAX Móvil [37]:

- *CBR (Constant Bit Rate Service)*: Tiene definida una mínima razón de tráfico reservada. Es adecuado para aplicaciones con estrictos requerimientos de latencia como por las aplicaciones de voz y video en tiempo real.
- *VBR (Variable Bit Rate Service)*: Estos servicios presentan una mínima razón de tráfico reservada y una máxima razón sostenida de tráfico. Es adecuado para aplicaciones que generen una carga de tráfico variable.
- *BE (Best Effort)*: Está reservado a flujos de servicios con los requerimientos más bajos de QoS en cuanto a aspectos como la latencia del canal. Es adecuado para aplicaciones como navegación en Internet y transferencia de ficheros.

La figura 2.6 muestra un esquema del cómo se particiona el ancho de banda disponible en estos tres tipos de servicios.

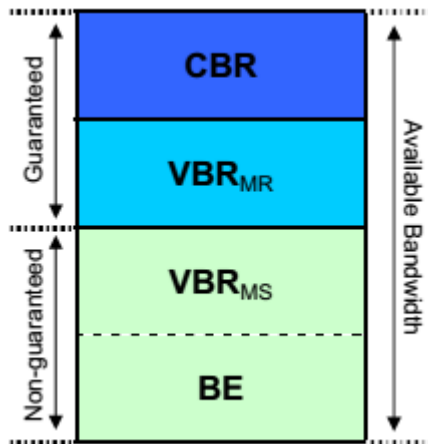


Figura 2.4: Partición del ancho de banda disponible del canal [37]

2.3.5.2 Razón de contención

La razón de contención es comúnmente usada en el diseño básico del acceso a servicios como Internet y se refiere a la relación entre suscriptores activos y pasivos de la red. En áreas residenciales, por ejemplo, aquellos usuarios que emplean un servicio en un tiempo dado son mucho menores que todos los que están registrados como usuarios de ese servicio dentro de la misma zona de cobertura. La razón de contención puede variar desde un rango de 5 para áreas de negocios hasta 30 para áreas residenciales [44].

De acuerdo con la sección anterior, el ancho de banda disponible del canal se puede asignar a los usuarios de modo garantizado y no garantizado sobre la base de las aplicaciones que empleen. La aplicación de un CR (*Contention Ratio*) para el ancho de banda garantizado es una práctica que los operadores deben utilizar con precaución, ya que sus clientes esperan que sus acuerdos de calidad de servicio sean honrados siempre. Sin embargo, la asignación de un CR sobre anchos de banda reservados que correspondan al error o la probabilidad de bloqueo de cada una de las aplicaciones daría lugar a un modelado de tráfico más preciso [37]. Generalmente se aplican CR para el ancho de banda no garantizado de acuerdo a los tipos de subscriptores que presente la red.

2.3.5.3 Estimación de la razón de datos del sector

La expresión 2.5 muestra cómo determinar la capacidad de un sector para la tecnología WiMAX Móvil.

$$BW_S = \frac{FFT_{used} \times \sum_{i=1}^N (\%P_i \times k_i \times cr_i)}{T_S} \quad (2.5)$$

Donde:

- FFT_{used} : número de subportadoras de datos de la trama que depende del ancho de banda del canal y los esquemas de subcanalización empleados.
- $\%P_i$: peso que tiene sobre la cobertura de la BS los diferentes conjuntos de modulación y codificación de la señal.
- k_i : número de bit por símbolo de acuerdo al tipo de modulación empleado.
- cr_i : razón de código correspondiente a cada nivel de señal recibido.
- T_s : Tiempo del símbolo OFDMA.

Ahora bien, como el tráfico en los sistemas WiMAX Móvil está más centrado en datos, con un carácter marcadamente asimétrico, se espera que predomine el tráfico DL. Por esta razón y para simplificar el trabajo, las proyecciones para la capacidad de un sector se realizan en la dirección DL [43]. Esto hace que la expresión 2.5 sea modificada por la razón entre los símbolos para DL y la cantidad de símbolos totales.

Hecho esto, todavía ese valor de la capacidad del sector no define la razón de datos del mismo. Esto se debe a que la trama, además de datos puros, contempla otros tipos de señalizaciones que disminuyen la razón de datos transmitidos o recibidos. Para resolver este problema, cuando se va a dimensionar, se asume que los efectos de señalización en la trama DL varían entre un 4 y un 10% de la razón de datos de la trama [45].

En caso de que se quiera obtener resultados más exactos, al determinar la razón de datos del sector se puede implementar el algoritmo mostrado en la figura 2.7.

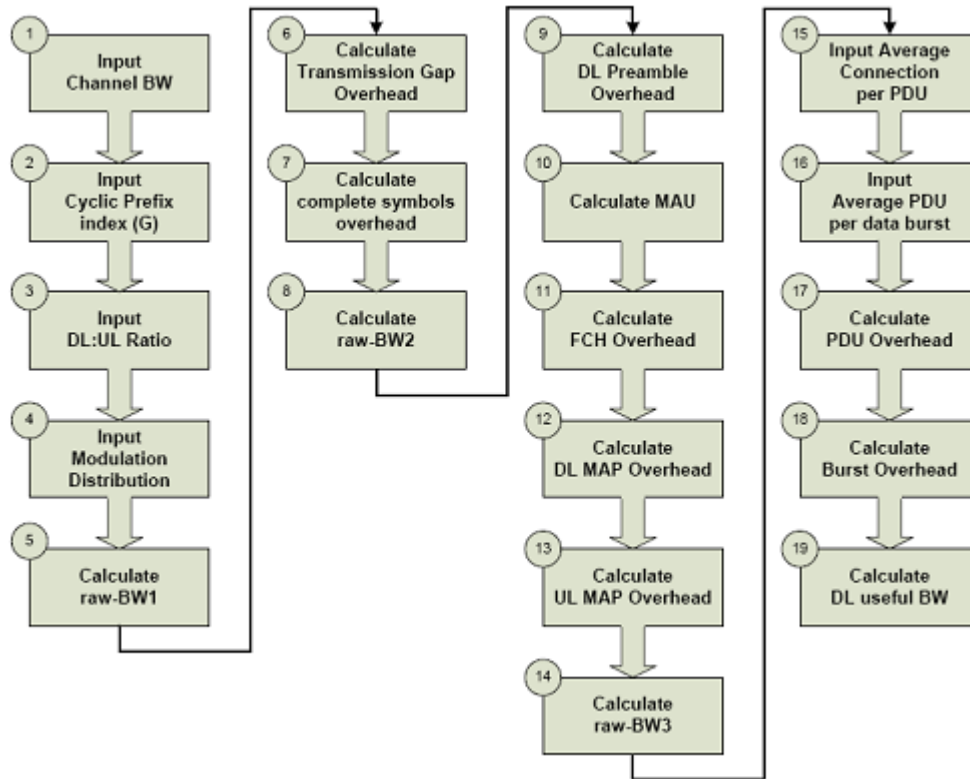


Figura 2.5: Algoritmo para la obtención de la razón de datos del sector [37].

2.3.5.4 Estimación de la razón de datos mínima por sector

En esta sección la estimación de la razón de datos mínima por sector tiene en cuenta la demanda de tráfico que tendrían las diferentes aplicaciones soportadas por la tecnología WiMAX Móvil. Para esto se tendrán que conocer los aspectos que a continuación se listan:

- Distribución del tráfico de cada aplicación respecto al tráfico total ($\% A_i$).
- Los parámetros para cada aplicación empleada. Esto pasa primero por determinar qué tipo de flujo de servicio emplea cada aplicación y de acuerdo a esto definir sus parámetros identificativos. Para su uso matemático solo hace falta la razón mínima razón de tráfico reservada (MRT_i) para aquellos servicios en los cuales sea un parámetro.
- Clases de suscriptores (**class-i**). Depende del operador, generalmente se agrupan en dos grandes grupos suscriptores de negocios y suscriptores residenciales.
- Distribución de las clases de suscriptores respecto al número total de suscriptores ($\%N_{\text{class-i}}$).

- CR para cada clase de subscriptor ($CR_{class-i}$).
- Paquete de negocio de operador. En él se incluyen las velocidades DL y UL del enlace de comunicaciones ($BW_{DL/UL}$).

Así, la razón mínima de datos por sector puede calcularse mediante 2.6

$$BW_D = \sum_{i=1}^N BW_{class-i} \quad (2.6)$$

Donde:

$$BW_{class-i} = N \times \%N_{class-i} \times \left(BW_{r-class-i} + \frac{BW_{c-class-i}}{CR_{class-i}} \right) \quad (2.7)$$

$$BW_{r-class-i} = \sum_{i=1}^N \%A_i \times MRT_i \quad (2.8)$$

$$BW_{c-class-i} = \sum_{i=1}^N \%A_i \times \left(BW_{DL} - \sum_{i=1}^N MRT_i \right) \quad (2.9)$$

Mediante un análisis sencillo se puede concluir que en el caso de hacer iguales la razón de datos mínima por sector a la razón de datos del sector se obtendría la cantidad máxima de usuarios en el sector.

2.3.6 Planificación de frecuencia

La planificación de frecuencia es un procedimiento que se utiliza en las redes inalámbricas para minimizar la interferencia debido a la reutilización de las bandas de frecuencias. En el mismo, seleccionar el factor de reutilización de frecuencia y ubicar los canales para los diferentes sectores de una estación base, son procesos importantes a tener en cuenta para la cobertura y capacidad de una red inalámbrica [35]. En el caso del proceso de reutilización de frecuencia, este se modela bajo la nomenclatura $N \times S \times K$, donde N define el número de celdas con diferentes ubicaciones de frecuencia, S el número de sectores por celda y K el número de portadoras de frecuencia ubicadas por celda [41].

En una red WiMAX Móvil se permite un factor de reutilización de frecuencia igual a 1, siempre que la interferencia entre celdas lo permita. Teniendo en cuenta lo anterior, esta tecnología pone bajo consideración los siguientes dos esquemas principales [35]:

- Reutilización Global $1 \times S \times 1$: donde un solo canal es usado en todos los sectores de una celda
- Reutilización $1 \times S \times K$: donde $K = nS$, con $n = 1, 2, 3$. O sea, que se pueden implementar hasta tres portadoras de frecuencias por sector.

La figura 2.6 muestra algunos de los esquemas de reutilización a utilizar en las redes WiMAX Móvil.

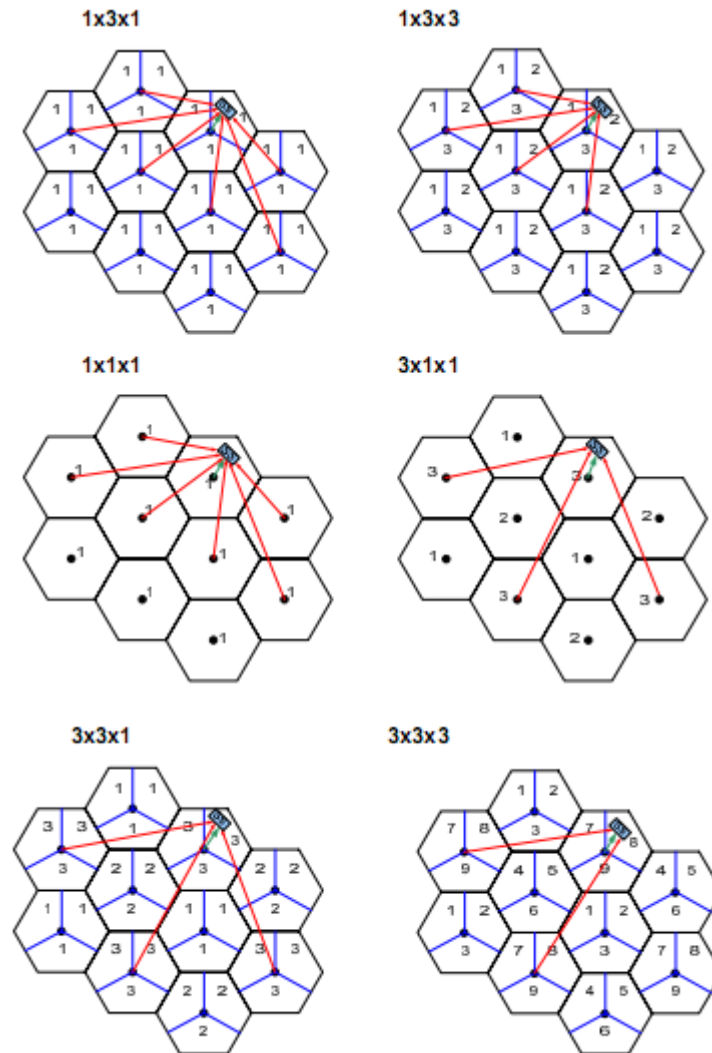


Figura 2.6: Algunos esquemas de reutilización para WiMAX Móvil [41]

En casos donde la interferencia entre celdas sea demasiado alta se puede optar por segmentar los subcanales, o sea, para zonas cercanas a la estación base se utilizan todos los subcanales y en los límites de esta solo algunos de ellos [45]. En la figura 2.7 se muestra el caso anterior, donde los círculos más pequeños utilizan todos los subcanales mientras en el resto solo algunos, para el caso de aquellos lugares donde exista traslape los subcanales empleados por cada estación base son diferentes. La desventaja de emplear este esquema es que disminuye la eficiencia espectral de la red, lo cual se ve reflejado en menos clientes por canal cuando se les está asegurando cierto nivel de QoS [7].

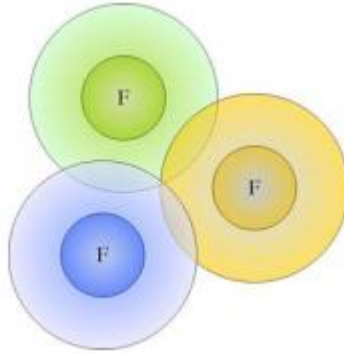


Figura 2.7: Esquema representativo de la segmentación de canales [7]

2.3.7 Ubicación de las estaciones bases

La elección de las ubicaciones para la instalación de las estaciones bases deben cumplir los siguientes requisitos [8]:

- Lograr los objetivos propuestos en materia de cobertura.
- El lugar debe contar con las siguientes condiciones para poder realizar el montaje de una estación: Sitio preferentemente alto, con suelo firme que permita la instalación de mástiles o torres auto-soportadas, área libre de vegetación elevada, clima tranquilo, etc.
- Estar ubicada cerca de una instalación de cables de fibra óptica o con línea de vista a otra estación superior para el transporte de la comunicación.
- Tener una vía de acceso cerca, al menos a una distancia prudencial que permita su instalación y posterior operación técnica.
- Estar ubicada cerca de instalaciones de energía eléctrica para su alimentación.
- No tener cerca fuentes de interferencias radioeléctricas.

Una buena opción en la elección de la ubicación de las estaciones bases de WiMAX Móvil, con vistas a reducir los costos que conlleva la construcción de nuevos emplazamientos, es la utilización de los mismos emplazamientos empleados por la telefonía móvil.

2.3.8 Red troncal

El término de red troncal o *backhaul* se refiere a la conexión desde un punto de acceso o estación base a las instalaciones de las oficinas centrales del operador. En las redes inalámbricas de banda ancha, la red troncal generalmente se diseña para operar sobre conexiones cableadas, aunque los enlaces inalámbricos también pueden ser una opción [19].

Obtener conexiones *backhaul* a razones de datos razonables es esencial si se quiere una red de telecomunicaciones rentable. Por esta razón el operador debe determinar los medios que permitan la implementación de la red troncal para locaciones dadas antes de que cualquiera de los elementos de dichas locaciones sea puesto en su lugar.

La red troncal representa la agregación del tráfico de la red. Por esta razón la capacidad de dicha red debe ser significativamente más grande que las capacidades de los enlaces inalámbricos individuales. Sin embargo, la capacidad no debe ser igual a la requerida si todos los subscriptores de una celda transmiten simultáneamente, porque esta es una eventualidad altamente improbable. Por lo tanto, la capacidad de la red troncal puede ser tan pequeña con la décima parte de capacidad agregada de todos los enlaces inalámbricos individuales, razones que utilicen la sexta parte o la cuarta parte de la capacidad agregada son más prudentes [35].

A continuación se mencionan los diferentes medios físicos de implementación de una red troncal, de los cuales las configuraciones con fibra óptica se presentan como la mejor opción:

1. Fibra Óptica (Redes ópticas pasivas y activas)
2. XDSL (*Digital Subscriber Line*)
3. Enlaces ópticos inalámbricos (rayos infrarrojos)
4. Puentes inalámbricos (Microondas, Wi-Fi, WiMAX)

2.3.9 Medios

En el diseño de una red de acceso inalámbrica no solo basta con aprender el funcionamiento de las distintas tecnologías y tener métodos para el dimensionamiento de la misma pues la única manera de acercarlo lo más posible a la realidad es a través de herramientas computacionales. Estas herramientas siempre han jugado un papel importante en el trabajo diario de los operadores de redes de telecomunicaciones ya que normalmente se necesita una gran cantidad de interacciones para llevar a cabo los métodos de dimensionamiento, por lo que la utilización de las mismas simplifica y agiliza el trabajo [43].

En las aplicaciones modernas, todas las herramientas requeridas están normalmente integradas en un solo paquete que se denomina RPN (*Radio Planning Network*). Si el mismo está formado correctamente, el usuario final, en este caso el diseñador de la red, ignorará que él o ella está usando varias herramientas cuando realiza el diseño de una red [46].

2.3.9.1 Herramientas RPNs

Una herramienta de este tipo presenta las siguientes componentes [46]:

- *Mapa Digital:*

El requisito más importante de una herramienta RNP es el mapa geográfico del área de planificación. El mapa es necesario para las predicciones de cobertura y modelado de tráfico, cuyos datos serán posteriormente usados en la fase de cálculo y en utilidades de análisis. Un mapa de RNP debe incluir al menos datos topográficos (altura del terreno), de forma (tipo de terreno) y situación de los edificios y datos de altura, en forma de mapas *raster*. Además, es importante que incluya datos vectoriales de edificios para la localización digital de estos en el mapa.

- *Proyecto:*

Un proyecto es una combinación de varios objetos que forman un paquete entendible por el planificador de red. Está generalmente definido por los siguientes elementos:

1. Mapa digital
2. Propiedades del mapa.
3. Área a planificar
4. Tecnología de acceso elegida
5. Parámetros de entrada para cálculos
6. Modelos de antenas.

Un proyecto es creado y definido antes de que empiecen las actividades de planificación. Este incluirá todas las configuraciones y parámetros de los elementos de la red. En la práctica contendrá todos los datos de las estaciones bases y celdas que serán finalmente desplegadas en la red real. Una herramienta RNP deberá ser capaz de crear, definir, guardar y recuperar diversos proyectos, de esta forma, distintas versiones de una misma área podrá ser comparada en términos criterios de calidad, capacidad y cobertura.

- *Editor de Antenas*

En herramientas RNP, Antena es un concepto lógico que incluye modelos de radiación de antena y parámetros como ganancia y banda de frecuencia. Una vez que la antena está definida, puede ser entonces asignada y usada por las celdas y predicciones de cobertura. La definición de una antena comienza importando los modelos de radiación hacia la aplicación RNP. Los vendedores de antenas proporcionan a los operadores los modelos por medio de *datasheets* (hojas de características). Mediante estos datos, se dispone dentro de la herramienta de una base de datos con todas las características de las antenas.

- *Editor del modelo de Propagación*

Una herramienta RNP debe ofrecer la posibilidad de modificar los modelos de propagación con el fin de adecuarse a las condiciones del área en cuestión. Esta personalización del modelo está basada en medidas de campo que provee en datos de la potencia de la señal en cada coordenada. También debe soportar diferentes características del área a planificar y los entornos de propagación, por lo tanto, debe soportar varios modelos de propagación.

- *Tipos Emplazamientos/Celdas*

Una herramienta RNP debe tener la función de definir y manejar la configuración general del hardware y la configuración y parámetros por defecto establecidos en los elementos de la red como son los emplazamientos y las celdas, así como la posibilidad de modificar las BS, ya que los modelos originales se modifican a menudo con las actualizaciones del hardware.

El diagrama de flujo que describe el funcionamiento de cualquier herramienta RNP se muestra en la figura 2.8.

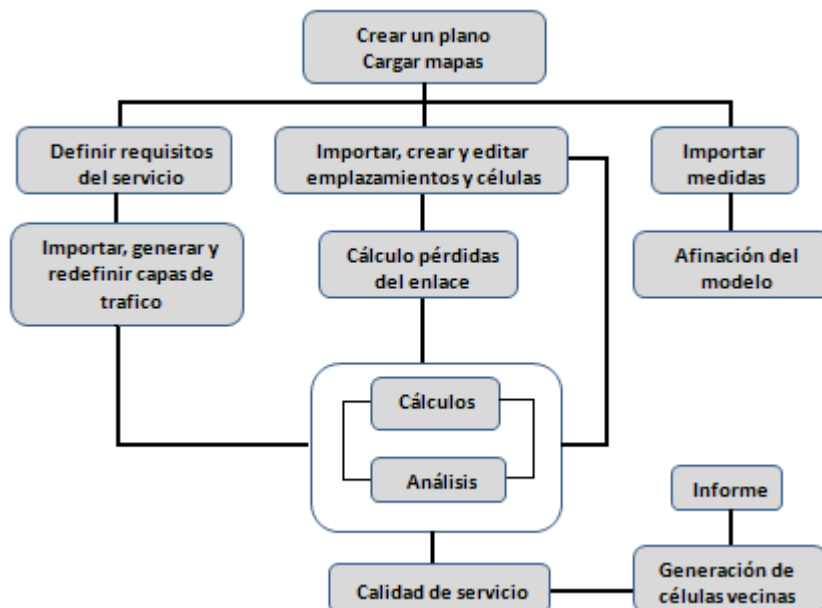


Figura 2.8: Diagrama de flujo de una herramienta RNP

2.3.10 Análisis económico

Realizar un correcto análisis económico por parte de los operadores es tan importante como los procedimientos para determinar la cobertura y capacidad de una red de acceso inalámbrica. Este procedimiento permite apreciar la factibilidad económica de un proyecto antes de su implementación y tiene como base tres ejes fundamentales, los costos de inversión, los ingresos previstos y los criterios de decisión.

2.3.10.1 Costos

El análisis de costos se divide en CapEx (Capital Expenditures) y OpEx (Operational Expenditures).

CapEx son costos de largo plazo que pueden depreciarse con el tiempo, incluyen los costos de instalación del equipamiento y se denota por la variable **C**. De forma específica, CapEx incluye los costos del equipamiento de las BS, de la preparación e instalación de los sitios y el equipamiento de la red troncal o *backbone* [40].

La categoría OpEx (**O**) abarca los costos cíclicos, definidos en uno o varios años. En la misma se incluyen los costos por la adquisición de licencias para operar en determinadas bandas de frecuencias del espectro radioeléctrico, los costos de operación, planificación (depende del crecimiento proyectado de la red), mantenimiento, *marketing*, superación del personal y por el tráfico sobre la red troncal [11].

2.3.10.2 Ingresos

Para la estimación de los ingresos que aportaría un proyecto de red WiMAX Móvil hay que tener en cuenta dos aspectos importantes: la demanda y las tarifas dadas por el operador para los diferentes servicios que oferta.

Para la modelación de la demanda se toma en consideración información sobre el estado del mercado actual, sus previsiones futuras y el crecimiento de la población, ajustado todo al rango de tiempo que considera el proyecto. Con estos datos se puede dar un estimado de la cantidad de usuarios a los cual se les daría servicio.

Obtenida la cantidad estimada de usuarios y tomado en cuenta las tarifas por tipo de servicios y las proyecciones sobre el porcentaje de usuarios que pagarían por determinado servicios de los ofertados, se puede hacer un aproximado de los ingresos de un proyecto [11].

2.3.10.3 Criterios de decisión

Una vez definidos los costos de inversión y los ingresos previstos por beneficios y servicios generados por el proyecto, estos se incluyen en la matriz financiera del mismo. Esta matriz permite encontrar los parámetros de decisión NPV (Net Present Value) e IRR (Internal Rate of Return).

NPV es una fórmula que se usa para determinar el valor presente de una inversión mediante la suma descontada de todos los flujos de caja recibidos desde el proyecto, donde por flujos de caja se entiende la suma de los flujos de salidas, gastos, y los flujos de entrada, ingresos.

Esta fórmula compara el valor del dinero actual con el valor del dinero en el futuro, teniendo en cuenta factores económicos que afectan dichos valores [40].

$$NPV(T) = \sum_{i=1}^T \frac{DCF_i}{(1-r)^i} - C \quad (2.10)$$

Donde:

C : la inversión inicial, en el caso que nos ocupa es el CapEX.

DCF : Flujos de caja discontinuos.

r : razón de descuento

T : tiempo de duración del proyecto, en el caso que se aborda en este trabajo se da en años

Por otro lado IRR define la razón de regreso de la inversión realizada y se determina hallando la razón de descuento, r , para la condición de $NPV(T) = 0$ [40].

Teniendo estos parámetros en consideración, los criterios de decisión que avalan la viabilidad de un proyecto serán:

1. El valor del NPV deberá ser mayor a cero.
2. Que el valor del IRR sea mayor que la tasa de descuento.
3. Que la relación costo / beneficio sea mayor a cero.

Además de estos criterios de decisión, otro aspecto a tener en cuenta es el punto de equilibrio, que es el tiempo mínimo en el cual el operador recuperara la inversión, o sea $NPV(y) > 0$.

2.4 Aparato Procesal

Para el diseño del aparato procesal de la metodología se asume el concepto dado por [47] sobre el término proceso, quienes lo definen como: “un conjunto de actividades mutuamente relacionadas o que interactúan, las cuales transforman elementos de entrada en resultados”, tal y como se ilustra en la figura 2.9, de manera que se parta de un punto inicial y se alcance un punto final como resultado del objetivo logrado.



Figura 2.9: Representación de término proceso

El carácter procesal de la metodología se evidencia en su funcionamiento, expresado en un conjunto de pasos ordenados y flexibles para el logro del objetivo propuesto. Se precisa

considerar las actividades a desarrollar con un enfoque sistémico de modo que cada actividad transforme las condiciones de entrada en una salida, aportando siempre valor, garantizándose un cambio ascendente con respecto a las condiciones de partida [34].

Para el caso del diseño e implementación de una red WiMAX Móvil, el aparato procesal se puede presentar mediante tres fases: Dimensionamiento, Evaluación y Optimización y por último Factibilidad. Es necesario aclarar que las proyecciones de ampliación de la red se tendrán en cuenta a lo largo de todas sus fases.

2.4.1 Fase 1: Dimensionamiento

La fase de dimensionamiento constituye el primer paso para el diseño de una red de radiocomunicaciones. En esta fase se estima el número máximo de BS en concordancia con los procedimientos teóricos de la tecnología, en este caso WiMAX Móvil. La figura 2.10 muestra la secuencia de pasos que describen el dimensionamiento de una red de radiocomunicaciones.

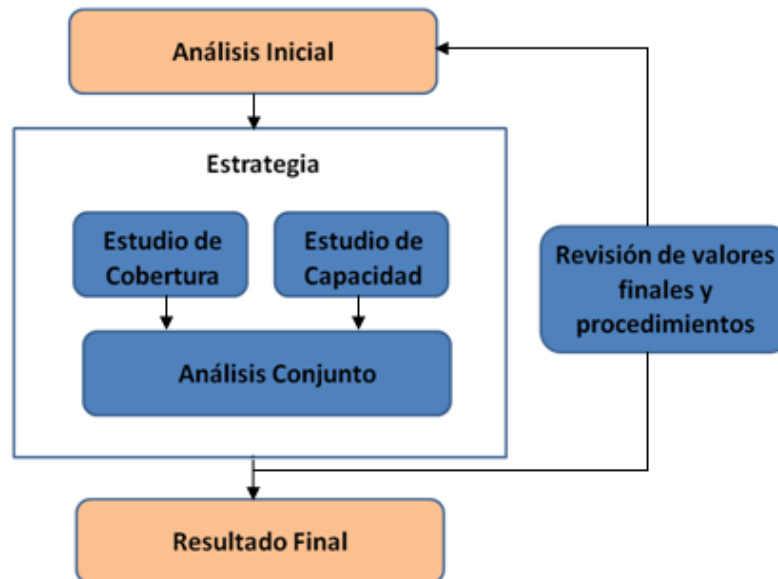


Figura 2.10: Fase de dimensionamiento.

El análisis inicial es definido por el plan de negocios del operador, los parámetros específicos de BS y SS, los parámetros de *marketing* para los diferentes servicios, las regulaciones del espectro radioeléctrico y los modelos de propagación. Durante este análisis, los diseñadores de la red emplean sus conocimientos teóricos y la experiencia tecnológica para definir una estrategia de dimensionamiento.

El plan de negocios del operador, tiene gran importancia pues puede generar incidencias en la fase de dimensionamiento y en fases posteriores del diseño de la red, además de influir

directamente en el análisis económico. A continuación se muestra una lista con la información más común en un plan de negocios:

1. *Área(s) de servicio*: Definida en forma de polígono, incluye el tamaño en Km² y los detalles de los perfiles del terreno (urbano, suburbano, rural, altura promedio de los edificios etc.).
2. *Tipo de cobertura*: Definida teniendo en cuenta la movilidad de los terminales (fijos, nómadas o móviles) y el entorno donde operan (interiores o exteriores).
3. *Perfiles de subscriptores*: Define los diferentes tipos de subscriptores (residenciales, pequeños negocios y empresas).
4. *Distribución de subscriptores*: Número de subscriptores por perfil, por área de servicio y por año de implementación, acorde al plan de escalabilidad de la red.
5. *Perfiles de servicios*: Contienen las características distintivas de un servicio: *codecs* VoIP (*Voice over IP*), razones pico de información, factores de contención, etc.).
6. *Espectro permitido*: Definido por las regulaciones locales, permite proponer esquemas de canalización y duplexación.
7. *Infraestructura existente*: Definida por los sitios, el equipamiento y la red troncal que puedan reusarse.
8. *Datos cartográficos*: Mapas de alta resolución del terreno.
9. *Indicadores fundamentales de funcionamiento*: Definida principalmente por los objetivos de cobertura y servicio en términos de porcentajes del área de servicio.

Una vez definida una estrategia de dimensionamiento se pasa a determinar el número máximo aproximado de BS que garantizarían el cumplimiento de los indicadores fundamentales de funcionamiento de la red. Esto se hace realizando por separado un estudio en cuanto a cobertura y otro en cuanto a capacidad.

En el caso del estudio en cuanto a cobertura se estimará empleando el procedimiento descrito en 2.3.3 para determinar la distancia de cobertura, lo que permite calcular el área de una celda usando la expresión 2.3. Con estos datos y con la dimensión del área de servicio dada en el plan de negocios, una simple división dará el número de BS que darán cobertura a dicha área.

Por otra parte, en el estudio de capacidad, se estima, mediante el procedimiento descrito en 2.3.4, el número máximo de usuarios por sector. El valor anteriormente calculado unido a las proyecciones de a cuántos subscriptores se les brindará servicio en un área de servicio, definirá la cantidad de sectores a emplear y por tanto, la cantidad de BS.

Los resultados de cada uno de estos estudios, se comparan seguidamente en el paso de análisis conjunto, eligiéndose como propuesta el estudio que más BS dé como resultado. Una vez realizado esto, se pasa a la revisión de los procedimientos empleados en la estrategia para evitar cualquier error. Así, en el caso de que se definan más de una estrategia, se puede dar como resultado final la más adecuada, mediante una revisión de sus valores finales.

2.4.2 Fase 2: Evaluación y Optimización

Una vez finalizado en dimensionamiento, se pasa a la fase de evaluación y optimización del diseño donde el elemento fundamental es la herramienta RPN. El esquema de esta fase se muestra en la figura 2.11.

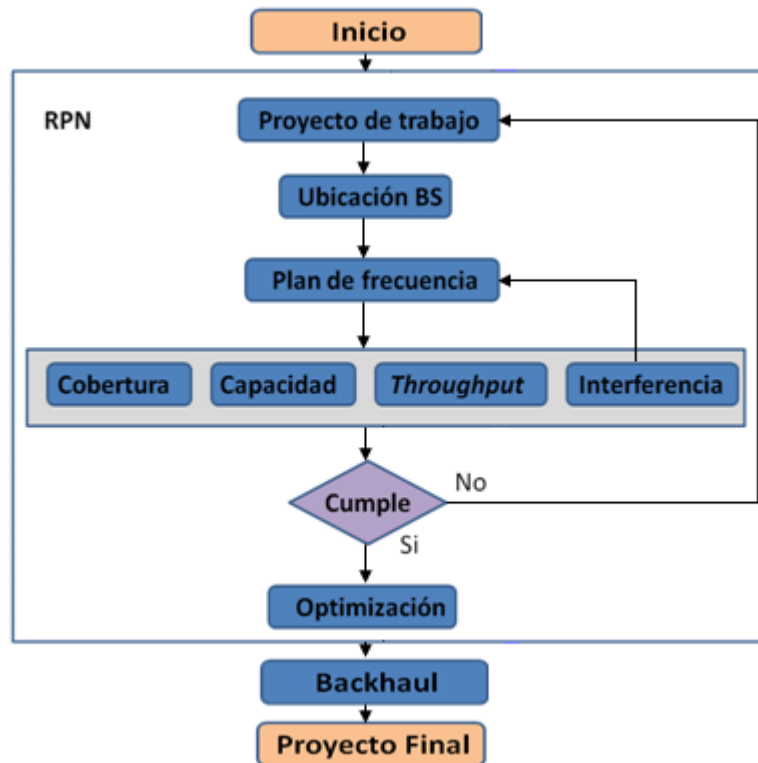


Figura 2.11: Fase de evaluación y optimización.

En el inicio del proceso se procede a organizar la información para configurar, dentro de la herramienta RPN, los elementos de un proyecto de trabajo (antenas, BS, SS, servicios, etc.).

La información de esta etapa inicial está compuesta por:

- Los valores finales obtenidos en la fase de dimensionamiento.
- Los elementos del análisis inicial de la fase de dimensionamiento.
- Los mapas de trabajo obtenidos para la zona donde se implementará la red.

Con vistas a una mejor visualización y exactitud de los cálculos se considera adecuada la superposición de diferentes tipos de mapas, principalmente mapas *clutter*, mapas digitales del terreno a los que se pueden unir fotos satelitales del lugar.

Definidos los elementos de un proyecto de trabajo se pasa a la ubicación de las BS, teniendo en cuenta los criterios de selección de epígrafe 2.3.6. Es importante destacar que el diseñador puede hacerlo manualmente, dado su conocimiento previo de la zona donde se desea implementar a la red o mediante las facilidades que tenga la herramienta RNP para elegir los mejores lugares. A continuación se establece un plan de frecuencia, que puede ser el previsto en el plan de negocios o alguno de los más comunes utilizados en la tecnología WiMAX Móvil.

El próximo paso corresponde a la evaluación de la red a implementar mediante la simulación de aspectos importantes como la cobertura, la capacidad, el *throughput* y la interferencia. En el caso del estudio de interferencia, sus resultados pueden influir en la elección de un nuevo plan de frecuencias. Los resultados de estas simulaciones se comparan seguidamente con los indicadores de funcionamiento del plan de negocios del operador. En el caso de no cumplirlos habría que reconfigurar el proyecto de trabajo. De cumplirse entonces se pasaría a la optimización de la red, siempre teniendo en cuenta los indicadores de funcionamiento.

El resultado del paso de optimización es prácticamente el diseño final de la red, solo le restaría sumarle los requerimientos necesarios de la red troncal o *backhaul*.

2.4.3 Fase 3: Factibilidad

Obtenido el diseño final de la red, solo restaría la fase de factibilidad donde se realiza un análisis económico para evaluar las potencialidades del proyecto de red o elegir entre varias propuestas la más adecuada desde el punto de vista del operador.

2.5 Conclusiones Parciales

Al finalizar este capítulo se pueden establecer las siguientes conclusiones:

1. La metodología elaborada integró de manera armónica un conjunto de aspectos teóricos de la tecnología WiMAX Móvil que, junto a los medios y herramientas disponibles en el mercado, permiten a un diseñador de red elegir una adecuada estrategia de implementación de una red de este tipo. Además, la metodología propuesta brinda elementos para que un operador de telecomunicaciones pueda elegir aquel proyecto de red que más se adecue a sus intereses.

2. Aunque la metodología se desarrolló para la tecnología WiMAX Móvil, la estructura y bases de la misma pueden ser empleadas para el diseño e implementación de cualquier otro tipo de red de telecomunicaciones.

CAPÍTULO 3. Validación de la metodología propuesta mediante el diseño de una red WiMAX Móvil para la UCLV

3.1 Introducción

Una vez concluido el proceso de confección de la metodología para el diseño de una red WiMAX Móvil, se pasara a la validación de la misma. Para esto, en este capítulo se diseña una red WiMAX para el entorno del campus universitario de la UCLV. Bajo este diseño se logra integrar armónicamente las condiciones de infraestructura existente con el nuevo equipamiento, reduciendo los costos de instalación y permitiendo que se compartan recursos y servicios como acceso a Internet, correo electrónico, VoIP y video *streaming*.

3.2 Caracterización de la Red UCLV

En los últimos diez años se ha visto una creciente evolución de la red UCLV debido al perfeccionamiento técnico que se ha logrado en cuanto a equipamiento, calidad y cantidad de los servicios que se prestan, así como la seguridad de la red. Desde comienzos de la pasada década la universidad fue seleccionada para formar parte de un proyecto de colaboración internacional con el Consejo de Universidades Flamencas de Bélgica que ha sido la fuente de financiamiento que necesitaba la universidad para lograr todos los cambios que se han producido desde el punto de vista de infraestructura.

En [48] se plantea que en la red UCLV existen dos locales principales donde están instalados los servidores de rack profesionales. Uno está en “*La Puerta*” como principal nodo de interconexión física de toda la red interna y los enlaces externos y desde ahí se atienden los servicios principales de correo y navegación de internet y el otro es el local donde opera el recién instalado *Datacenter* único de su tipo en las universidades del país. Este último atiende el nuevo sistema de virtualización que se expande ya a 80 servidores virtuales y dará soporte a las investigaciones y desarrollos informáticos en las áreas universitarias con la entrega VPS (*Virtual Private Server*), lo que mejora considerablemente la estabilidad y desempeños de las aplicaciones informáticas asociadas a entidades universitarias.

En la red se cuenta con 54 servidores profesionales y 3365 computadoras de 13 facultades y 4 centros de investigación; para prestar servicio a más de 13 000 usuarios entre estudiantes y profesores de la sede central, las 14 sedes universitarias municipales y el CUFB (*Colegio de Formación Básica*) que están enlazados físicamente a la red UCLV. El *switch* central de fibra de 24 puertos conecta todo el *backbone* de la red a 1 Gbps, y tiene soporte para SNMP

(*Simple Network Management Protocol*), RMON (*Remote Network Monitoring*), filtrado de paquetes, creación de múltiples VLAN (*Virtual LAN*), QoS, ruteo de paquetes IPv4 (*Internet Protocol version 4*) y IPv6 (*Internet Protocol version 6*). Además da soporte para multidifusión, RIP (*Routing Internet Protocol*) versiones 1 y 2, OSPF (*Open Shortest First*) y soporte para redes inalámbricas.

3.2.1 Infraestructura

A continuación se describe con más exactitud la distribución de los recursos físicos que conforman la infraestructura básica del campus universitario.

3.2.1.1 Backbone

El *backbone* de distribución de la UCLV está constituido por un sistema de cableado de fibra óptica multimodo (62.5/125 μm); monomodo (9/125 μm) y pares de cable UTP (*Unshielded Twisted Pair*); los cuales interconectan a la totalidad de las facultades del campus universitario. La estructura del *backbone* está sustentada en una topología física en estrella con tres niveles jerárquicos. El primer nivel se encuentra en el nodo principal de conmutación de la red ubicada en “*La Puerta*”, donde existe un *patch-panel* que conecta todos los pares de hilos de fibra óptica que se difunden por la universidad. El segundo nivel está representado en el CEI (*Centro de Estudios de la Informática*), en el Edificio U4 (*Edificio Administrativo*) y en el nodo ubicado en el edificio de CSH (*Ciencias Sociales y Humanísticas*). En el CEI se distribuye el cableado de fibra óptica hacia las Facultades de Ingeniería Mecánica, Química y Farmacia, Ingeniería Eléctrica y Ciencia Empresariales. En el edificio CSH se distribuye hacia el CDICT (*Centro de Documentación e Información Científico Técnica*), mientras que en el U4, se parchea hacia el Rectorado y la Facultad de Construcciones. El tercer nivel se encuentra en la Facultad de Construcciones, donde se vuelve a parchear el cableado de fibra óptica hacia la Facultad de Ciencias Agropecuarias [48]. En la actualidad, aun no se completa la implementación del *backbone* en forma de lazo, lo cual contribuiría a darle redundancia a la red ante fallos puntuales de la misma.

3.2.1.2 La Puerta

El nodo de la red universitaria se sostiene sobre un *switch* con estructura modular modelo AT-X900-24-XS de la firma *Allied Telesyn*, capaz de simular 24 módulos SFP (*Small form Factor Pluggable*) y 2 tarjetas multifunción de expansión. En este momento hay 14 SPF de 1000 LX y un 3 SPF de 1000 TX. En la puerta existe un *switch Allied Telesyn* modelo Rapier 24i capa 2 al que se conectan todos los enlaces extremos, Internet y red MES (*Ministerio de*

Educación Superior). Las conexiones hacia afuera de la UCLV pasan a través de un *router* CISCO 2800 al que están conectados 4 enlaces de 2 Mbps con cable coaxial y usando tecnología HDSL (*High bit rate Digital Subscriber Line*) con protocolo *Frame Relay*. Además se conecta con un servidor para acceso telefónico de línea, conmutado con un *router* CISCO 2200.

La Puerta tiene 6 servidores Profesionales DELL modelo *Power Edge 2950 III*, 10 servidores R200, 2 servidores R300, 4 servidores R510, 2 servidores R210 y 6 servidores R410, procesador *Quad Core* y disco SATA de 250 GB [8].

3.2.1.3 Red Inalámbrica

El empleo de la tecnología inalámbrica en todo su campus universitario tiene tres fines esenciales [8]:

1. Ser método de respaldo que pudiera sustituir los enlaces existentes con fibra óptica, ante cualquier situación de contingencia
2. Poder lograr la redundancia de la red cableada UCLV.
3. Crear zonas Wi-Fi que cubrieran las principales áreas universitarias, donde los usuarios pudieran acceder a la red con la utilización de una tarjeta inalámbrica, para recibir información en tiempo real en cualquier punto de esta y adquirir mayor calidad de servicio.

Así, la red inalámbrica cuenta con servidor RADIUS ubicado en la puerta y 84 AP (Access Point) distribuidos por todo el campus.

3.2.2 Servicios

La Red UCLV presta varios servicios, entre los cuales se destacan: DNS (Domain Name Service), FTP (File Transfer Protocol), Internet, correo electrónico y VoIP. Estos servicios que se brindan facilitan el acceso y aumentan en gran medida la calidad de la red, en cuanto a variedad.

3.3 Dimensionamiento

Una vez descrita la base de la red UCLV que soportará, tanto en infraestructura como en servicios, a la red WiMAX Móvil a implementar, se pasa al dimensionamiento de la misma, observando los pasos de la metodología descritos en la sección 2.4.1. Es importante destacar que las buenas condiciones de la red UCLV permiten abaratar las inversiones que habría que hacer en infraestructura.

3.3.1 Análisis Inicial

Área(s) de servicio: El campus de la UCLV presenta un área de 1,51 Km² de un perfil de terreno rural.

Tipo de cobertura: El tipo de cobertura estará dada para terminales fijos y nómadas en entornos tanto exteriores como interiores.

Perfiles de subscriptores: Se tendrán dos tipos de subscriptores: Estudiantes y Trabajadores.

Distribución de subscriptores: Mostrado en la tabla 3.1.

Tabla 3.1: Distribución de Subscriptores

UCLV Trabajadores: 2458 Estudiantes: 4665		
Campus Central (Área=0.51Km²)		
Áreas	Estudiantes	Trabajadores
Ciencias Económicas	404	77
MFC	442	164
Ciencias Sociales	166	143
Derecho	154	53
Humanidades	234	107
Psicología	235	57
Eléctrica	697	128
Industrial y Turismo	510	131
Mecánica	241	95
Química Farmacia	299	136
Rectorado	-	740
Total	3380	1831
Subscriptores	2028	1099
Densidad de Subscriptores	3977	2155
Área Construcciones (Área=0.18 Km²)		
Construcciones + CQA	675	137
Subscriptores	405	83
Densidad de Subscriptores	2250	462
Área Camilitos (Área=0.18Km²)		
Ciencias Agropecuarias	548	196
Ciencia de la Información	60	-
Otros	-	121
Total	608	317
Subscriptores	365	191
Densidad de Subscriptores	2028	1062
Áreas Verdes		
Densidad de Subscriptores	220	

Esta tabla se basa en datos ofrecidos por el Departamento de Planificación y Estadísticas de la UCLV. En ella no se tiene en cuenta la matrícula de estudiantes del CUFB ni otras modalidades de estudio que no sean el Curso Regular Diurno. Además, los suscriptores se dividen en cuatro entornos bien definidos: Campus Central, Área Camilitos, Área Construcciones y Áreas Verdes.

En la tabla se decidió que la densidad de usuarios para las Áreas Verdes fuera de 220 suscriptores por Km² debido a que son aéreas muy pequeñas que enmarcan zonas de poco flujo de personal.

Otros aspectos que se tuvieron en cuenta para determinar la distribución de los suscriptores son:

- No todos los suscriptores estarán en la UCLV al mismo tiempo. Esto se debe principalmente a que existen dos sesiones de estudio donde cada estudiante y profesor presenta una carga docente definida para una de esas sesiones, y también a que los profesores cuentan con un régimen laboral de horario abierto. Teniendo esto en cuenta se tomó un factor de 0.6.
- Solo una porción de los suscriptores se conectará a WiMAX, o sea, no se conectarán en el mismo intervalo de tiempo.
- No todos los suscriptores tendrán dispositivos WiMAX.

Teniendo esto en cuenta se dimensiona la red para los suscriptores determinados en el primer punto y se tendrá porcentajes de utilización, o sea usuarios activos conectados simultáneamente, de un 10%, basado en las premisas de los puntos dos y tres.

Perfiles de servicios: Para cada perfil de suscriptor se definen un servicio básico para cada perfil de suscriptor. En el caso de los Trabajadores se define una relación entre la velocidad DL y la velocidad UL de 512/128, donde cada velocidad se da en kbps. Para el otro perfil se define una relación de 256/128. Además se definen una razón de contención de 10 y 30 respectivamente. En cuanto a los servicios que se ofrecerán, estos se muestran en la tabla 3.2 junto con sus parámetros característicos.

Tabla 3.2: Perfiles de Servicio

Aplicación	Categoría QoS	Mínima Razón de Datos Reservada (kbps)	%A
Juegos	ertPS	50	25%
VoIP	UGS	32	10%
Streaming Media	rtPS	64	12.5%
FTP	nrtPS	-	20%
Web	BE	-	32.5%

No se muestran los valores de la razón de datos reservada para FTP y Web, ya que son los de menor prioridad en cuanto al manejo de tráfico.

Espectro permitido: Regulación 33/2011 del MIC.

Infraestructura existente: Tal como se mostró en la sección 3.1 la infraestructura existente está en buen estado y tiene la capacidad para soportar la tecnología WiMAX Móvil.

Datos cartográficos: Mapa de elevación digital del terreno. Al ser un terreno relativamente plano se utilizó una foto tomada por *Google Map*.

Indicadores fundamentales de funcionamiento:

- Cobertura al 98% del área de servicio.
- Razón de rechazo inferior al 5%.

3.3.2 Análisis de Cobertura

Conocidos los indicadores fundamentales que sustentarán este diseño se realiza el dimensionamiento de la red, comenzando por el análisis de la cobertura. Para ello se emplearon equipamiento WiMAX de Huawei, uno de los proveedores de tecnologías de Cuba. Como BS se tiene la BTS3703 y como MS el BM358, un *stick* USB (*Universal Serial Bus*). En la tabla 3.3 y 3.4 se muestran las características esenciales de estos dos equipos que serán la base del análisis de cobertura. Para más información sobre ambos equipos ver Anexos C y D

Tabla 3.3: Parámetros de la BTS3703

Parámetros	BS
Potencia Tx en DL	30 dBm
Ganancia Tx en DL	14.5 dBi
Otras ganancias Tx en DL	0 dB
Ganancia Rx en UL	14.5 dBi
Otras ganancias Rx en UL	4 dB
Umbral de ruido en Rx en UL	5 dBm

Tabla 3.4: Parámetros del BM358

Parámetros	CPE
Potencia Tx en UL	23 dBm
Ganancia Tx en UL	2 dBi
Otras ganancias Tx en UL	0 dB
Ganancia Rx en DL	2 dBi
Otras ganancias Rx en DL	0 dB
Umbral de ruido en Rx en DL	6 dBm

Además de estos parámetros, hace falta definir las características de la tecnología a implementar y algunos márgenes adicionales. La red WiMAX Móvil, como ya se dijo en el análisis inicial, se implementará en un entorno rural, por lo que el modelo de propagación a utilizar sería el Erceg- Terreno B. En adición a esto, la banda de operación del sistema es la de 2.5 GHz, el ancho de banda de transmisión es de 10 MHz y las antenas se ubicarán a una altura de 30 m. En cuanto a los márgenes adicionales, al incluir cobertura en interiores, se tomará un valor medio de 15dB. Por *fading* se dejarán unos 5dB y como se pretende un modelo de reutilización de frecuencia 1x3x3, se dejarán 0.2dB para margen de interferencia. Por último, se realizará una corrección de 5dB.

Así, empleando el método descrito en 2.3.3 y realizando los cálculos de las pérdidas de propagación del modelo Erceg, descrito en el Anexo 1, se obtendrá una distancia de aproximadamente 875 m. Con este dato, mediante la ecuación 2.3, se determina el área que tendrá la célula que será de alrededor de 2 Km². Dado que el área que abarca el UCLV es menor que el área de cobertura de la célula WiMAX entonces se puede concluir que solo hace falta una BS para dar cobertura a la institución.

3.3.3 Análisis de Capacidad

Para este análisis se tendrán en cuenta cuatro elementos: el porcentaje de suscriptores trabajadores y suscriptores estudiantes; los perfiles de servicio por cada tipo de suscriptor definidos en 3.3.1; el peso de cada modulación empleada en el enlace unido a la razón de código y cantidad de bit que aportan y el empleo de TDD como método de duplexación.

Teniendo en la tabla 3.1 los valores máximos de estudiantes y trabajadores de la UCLV es fácil determinar el porcentaje que corresponde a cada uno, así se tendrán un 38.6% de trabajadores y un 61,4% de estudiantes. Al segundo elemento solo añadirle las velocidades a los servicios Web y FTP, en el primero se utiliza la velocidad nominal del enlace, o sea 512 kbps para trabajadores y 256 kbps para estudiantes, mientras que para FTP se le asigna la velocidad de datos que quede luego de haber ubicado los servicios con mínima razón de datos reservada. En cuanto al tercer elemento los valores, basados datos del enlace DL en entornos urbanos [37] se muestran en la tabla 3.5. Por último, se tendrá una razón entre los símbolos OFDMA DL y UL de 32:15.

Tabla 3.5: Distribución de los tipos de modulación

Tipos de Modulación	Razón de código	Peso en el enlace	Números de bits por símbolo
BPSK	1/2	5%	1
QPSK	1/2	2.5%	2
	3/4	2.5%	2
16 QAM	1/2	5%	4
	3/4	5%	4
64 QAM	2/3	40%	6
	3/4	40%	6

Con estos datos se puede estimar la razón de datos del sector, tal cual se mostró en 2.3.5.3, quedando en 15.66 Mbps. Este valor se hace igual a la razón mínima de datos de 2.3.5.4 y mediante el empleo de las ecuaciones 2.6 a 2.9 se despeja la cantidad de usuarios, que toma valor de 446.

Esa sería la cantidad de usuarios por sector, ahora bien si se tiene cuenta el empleo de BS trisectoriales, entonces la capacidad máxima de usuarios de una BS es de 1338. Como lo que se quiere es la cantidad máxima de BS para satisfacer la demanda de subscriptores de la UCLV, que sería la suma de todos los subscriptores o sea 4553, entonces se divide esta cantidad de subscriptores entre la cantidad de usuarios a los que puede dar servicio una BS, aproximándose, de ser necesario, al número entero mayor. En este caso la división da 3.40, por lo tanto habría que implementar cuatro BS.

Si se compara este valor de BS con el obtenido, luego de realizar el análisis de cobertura, se puede determinar que el diseño será limitado por capacidad y tendrá 4 BS.

3.3.4 Planificación de Frecuencias

Como son 4 BS, se utilizarán 2 juegos de frecuencias de 30 MHz de ancho de banda, que serán rehusados con el patrón 2 x 3 x 3. Teniendo en cuenta la Resolución 33/20011 del MIC, las frecuencias centrales para los juegos de frecuencias son:

$$F_{11}: 2560 - 2570 \quad F_{c11} = 2565$$

$$F_{12}: 2570 - 2580 \quad F_{c12} = 2575$$

$$F_{13}: 2580 - 2590 \quad F_{c13} = 2585$$

$$F_{21}: 2600 - 2590 \quad F_{c21} = 2595$$

$$F_{22}: 2610 - 2600 \quad F_{c22} = 2605$$

$$F_{23}: 2620 - 2610 \quad F_{c23} = 2615$$

3.4 Evaluación y Optimización

Cumplido el dimensionamiento teórico, en la siguiente etapa se ajusta el diseño de la red lo más posible a la realidad. Para esto se empleara el Atoll en su versión 2.8.0, software RPN profesional de la compañía Forsk.

3.4.1 Software Atoll

Atoll se presenta con un entorno de planificación de radio basado en ventanas, fácil de usar, que da soporte a operadores de telecomunicaciones inalámbricos durante todo el tiempo de la vida de la red, desde el diseño inicial, hasta la fase de optimización y durante las distintas aplicaciones [49].

Más que una herramienta de ingeniería, Atoll es un sistema de información técnica, abierto, escalable y flexible que puede integrarse fácilmente en otro sistema de telecomunicaciones, aumentando la productividad y disminuyendo los tiempos de desarrollo [50].

Atoll está formado por un módulo principal, al que se le pueden ir añadiendo módulos de las diferentes tecnologías que poseen. En cada plantilla se proporciona una estructura adecuada a la tecnología en la que se basan. Las diferentes tecnologías que Atoll tiene disponible, dependiendo de la configuración instalada en el equipo, son [51, 52]:

- *GMS/GPRS/EPRS*: Esta plantilla se utiliza para modelar y planificar tecnologías de segunda generación (2G), basadas en TDMA.
- *CDMA2000*: Esta plantilla se utiliza para modelar tecnologías de tercera generación (3G) basadas en CDMA2000 (evolución de CDMA).
- *IS-95 CDMAONE*: Esta plantilla se utiliza para modelar sistemas de segunda generación (2G) basados en CDMA.
- *Microwave Radio Links*: Permite modelar enlaces de radio, como parte de una red de telecomunicaciones para cualquier plantilla.
- *UMTS HSPA*: UMTS y HSPA son sistemas de tercera generación (3G) que se basan en la tecnología WCDMA. Esta plantilla se utiliza para este tipo de sistemas, puesto que WCDMA y CDMA son incompatibles (a pesar de ser tecnologías similares).
- *WiMAX*: Esta plantilla ha sido desarrollada en cooperación con los proveedores de equipos WiMAX. Actualmente Atoll soporta los estándares IEEE 802.16d e IEEE 802.16e.

Mediante la implementación de esta herramienta de planificación se puede disponer de base de datos topográficos de gran resolución y acceder a ellos para obtener perfiles de terreno y datos que se utilizarán para realizar los cálculos de propagación. Además se pueden

emplear métodos de predicción propagación radioeléctrica más elaborados. Por último, facilita la planificación al poder comprobar distintas posibilidades de configuración de red (variar emplazamientos, potencias, orientación de antenas, etc.), simplificando el proceso de optimización [50].

Para el trabajo con este software se recomienda el estudio de [49, 51, 52].

3.4.2 Evaluación de la red

Antes de comenzar a trabajar con el software, primeramente se elige la plantilla sobre la cual trabajar, que en este caso es la plantilla WiMAX IEEE 802.16e. Es importante decir que en este software este es la única plantilla que asegura movilidad en la tecnología WiMAX, es de esperarse que para futuras versiones se implemente WiMAX IEEE 802.16m. Después de realizar esto se importa el mapa de trabajo y a partir de ahí se configuran todos los aspectos involucrados en el diseño, a saber: las BS, los terminales móviles, los servicios, los tipos de suscriptores, y los entornos, quedando tal como se muestra en la figura 3.1.

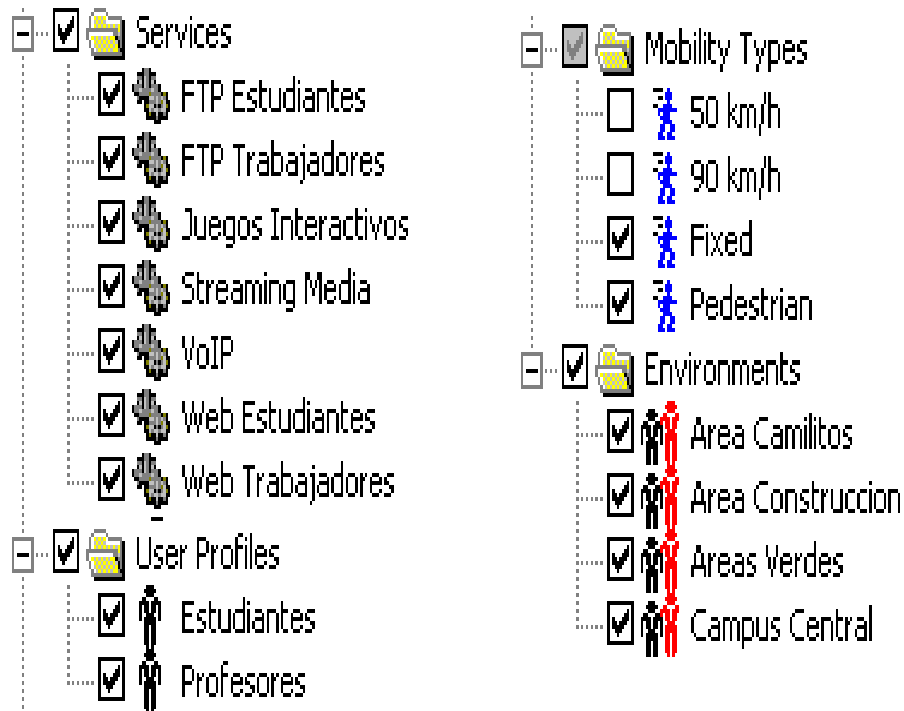


Figura 3.1: Parámetros de la red WiMAX Móvil UCLV

Ahora se pasa a la ubicación de las BS. Para esto se tuvieron en cuenta los criterios de la sección 2.3.7. Quedando finalmente ubicadas en el Rectorado, en la Facultad de Ingeniería Eléctrica, en la Facultad de Construcciones y en la Facultad de Ciencias Agropecuaria, tal como se muestra en la figura 3.4.



Figura 3.2: Distribución de las BS

Una vez ubicadas en cada transmisor se dio un canal de acuerdo con la planificación de frecuencias realizada, de tal forma que hubiese la menor interferencia posible entre estos. Con las condiciones creadas se realizó el análisis de cobertura. La figura 3.5 muestra el mapa de cobertura de la red.

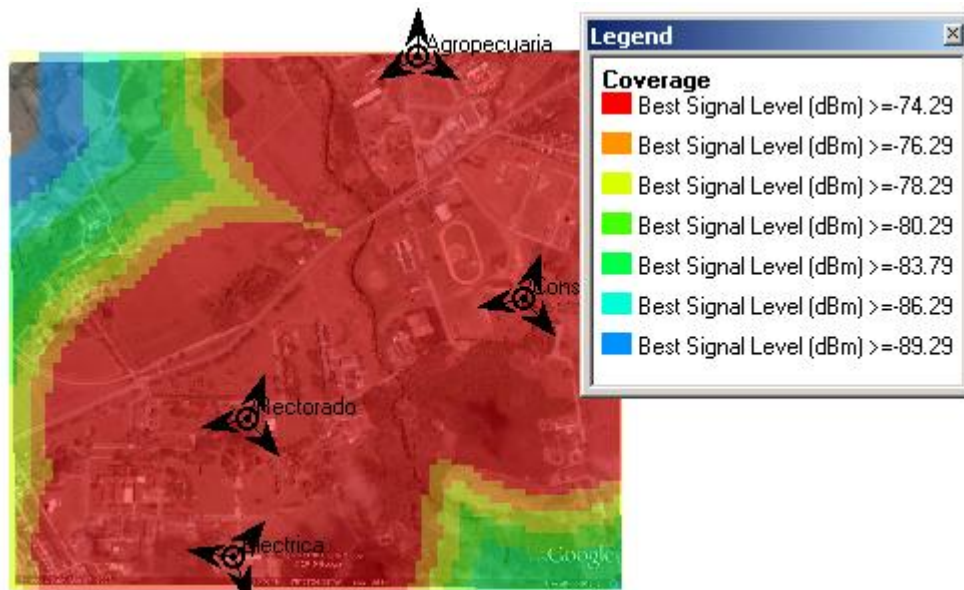


Figura 3.3: Mapa de cobertura de la red WiMAX Móvil UCLV

Los valores de la leyenda se ajustaron a los niveles de señal que determinan el tipo de modulación y razón de código bajo la cual ocurre la comunicación. Como se puede apreciar

toda el área roja define la comunicación empleando 64 QAM con razón de código $\frac{3}{4}$. Este resultado permite apreciar que se cumple con el criterio de calidad en cuanto a cobertura. A continuación se verá el comportamiento del tráfico en la red. Para lograr una distribución más exacta respecto a la densidad de suscriptores de cada área se definieron mapas de tráfico. El empleo del software Atoll permite realizar esta operación simplemente dibujando sobre el mapa de trabajo, quedando dividido el mismo como se muestra en la figura 3.6.

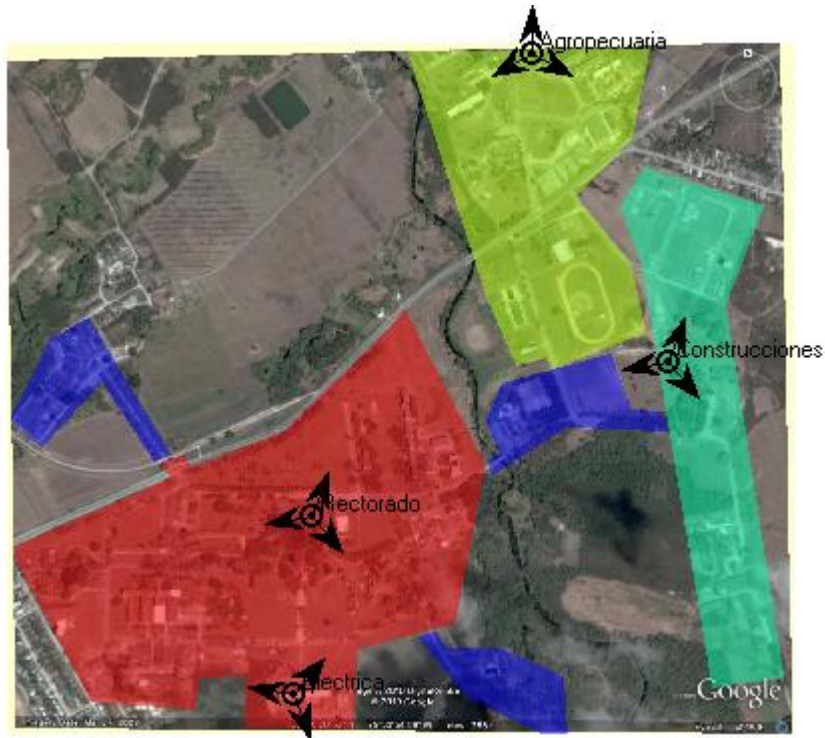


Figura 3.4: Mapas de tráfico de la red

Con este mapa de tráfico se crean distribuciones de usuarios empleando el algoritmo de Monte Carlo que se corresponde con una instantánea del comportamiento de la red. De los resultados de dichas simulaciones se puede obtener la demanda de tráfico, razón de rechazo, los recursos demandados por cada usuario, además de la carga de cada sector. Una vez definidos los mapas de tráfico solo queda simular el comportamiento de la red. En la figura 3.7 se muestra los resultados promedios de dos grupos de 30 simulaciones con un proceso aleatorio entre 50 iteraciones.

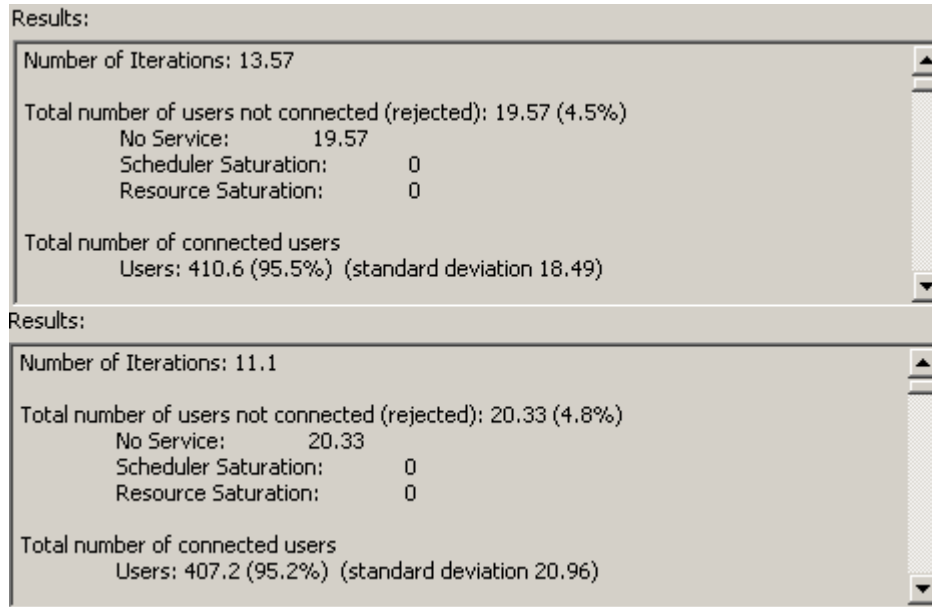


Figura 3.5: Resultados de las simulaciones de tráfico

Como se puede apreciar, la razón de rechazo es inferior al 5 % por lo que también cumple el criterio de calidad en cuanto a la razón de rechazo.

Además de estos datos, se evidenció que había sectores con baja carga de tráfico lo que haría posible una redistribución de los recursos para lograr un diseño óptimo. La figura 3.8 muestra el ejemplo de un transmisor de la BS de Agropecuaria y otro de la BS Construcciones que no llegan a un 20% de carga de tráfico en el enlace DL.

Transmitter	Name	Traffic Load (DL) (%)	Traffic Load (UL) (%)	UL Noise Rise (dB)	Seg
Agropecuaria_1	Agropecu	8.11	2.17	24.94	
Agropecuaria_2	Agropecu	58.19	9.78	17.25	
Agropecuaria_3	Agropecu	60.94	13.86	31.35	
Construcciones_1	Construcc	33.78	9.31	17.56	
Construcciones_2	Construcc	43.91	6.52	17.2	
Construcciones_3	Construcc	19.87	4.69	12.92	

Figura 3.6: Carga de tráfico de los transmisores

Antes de finalizar se hace un análisis para determinar el nivel de interferencia presente, teniendo en cuenta que para que un receptor pueda reproducir la señal la relación C/N+I (Carrier to Noise and Interference ratio) debe ser mayor e igual a la relación C/N+I de referencia. En la figura 3.9 se muestra que los niveles de interferencia son aceptables, en el

orden de los 10 dB por encima de la relación C/N+I de referencia. Analizando el resultado se puede ver la efectividad del uso de un esquema 2x3x3 para la planificación de frecuencia donde, pese a tener un factor de reutilización bajo, todavía los niveles de interferencia no son perjudiciales.

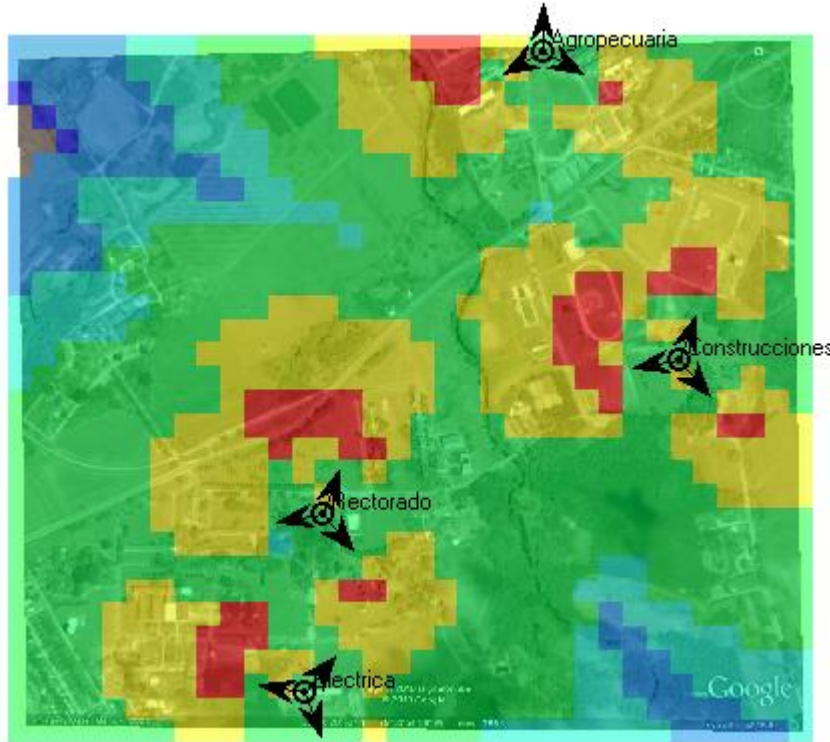


Figura 3.7: Análisis de Interferencia

3.4.3 Optimización de la red

Para lograr una optimización de la red se comenzó a analizar y redistribuir los recursos de cada BS. El primer paso fue eliminar aquellos transmisores con baja carga de datos para después ir distribuyendo la carga entre los restante, esto no solo beneficia al balance de carga sino que disminuye el nivel de interferencia dentro de la red. Al finalizar este proceso se llegó a la conclusión de que con solo 8 sectores se puede lograr un mejor desempeño. La figura 3.10 muestra la red final después de este paso del proceso de optimización, en este caso el color de cada transmisor se asocia al canal usado por el mismo.

El siguiente paso fue tratar de disminuir, en cada BS, la altura de los mástiles donde se ubicarían las antenas. Esto no solo ahorraría recursos sino que mantendría la fachada de los edificios seleccionados para ubicar en su tejado el mástil y las antenas. Así, en los edificios del Rectorado y Construcciones, de 5 metros de altura estimada, se ubicaron las antenas a

una altura de 10 metros, mientras que en los edificios de Agropecuaria y Eléctrica, de 10 metros de altura estimada, se ubicaron las antenas a 15 metros.

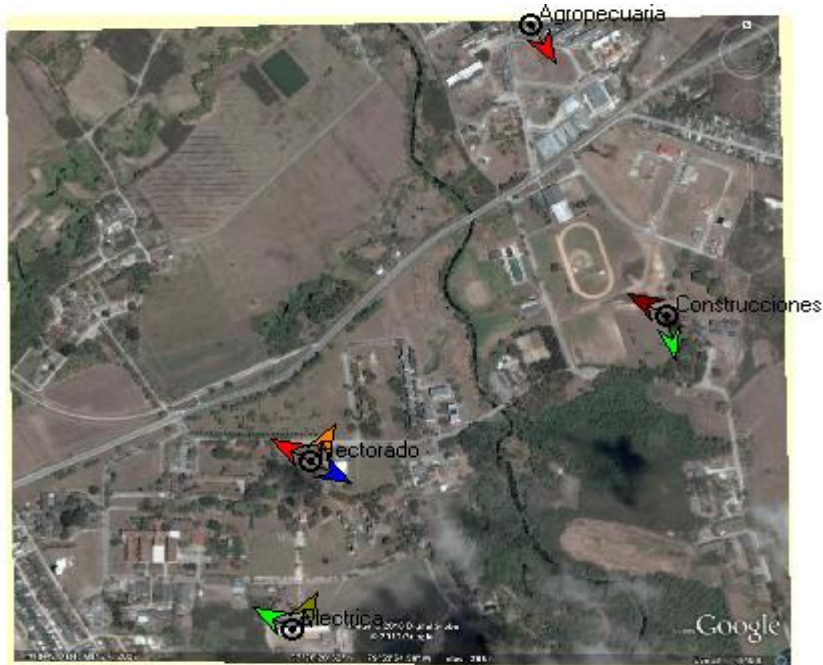


Figura 3.8: Red WiMAX Móvil UCLV después de la optimización

Debido a que el área de cobertura es proporcional a la altura de las antenas, este cambio podría ocasionar que los parámetros de cobertura y razón de rechazo pudiesen variar y desviarse de lo establecido, así que se hicieron las comprobaciones pertinentes.

Como se puede apreciar en la figura 3.11, aún con estos cambios, la red sigue cumpliendo los niveles de calidad en cuanto a cobertura.

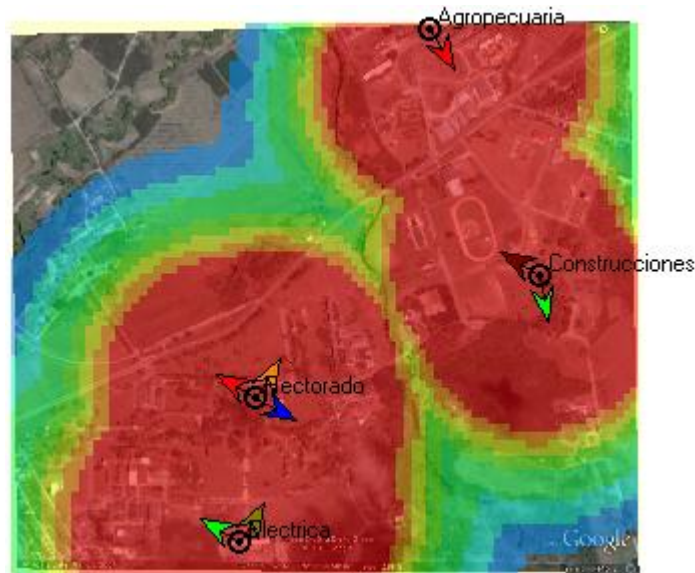


Figura 3.9: Mapa de cobertura de la red WiMAX Móvil UCLV optimizada

En cuanto a la obtención de una razón de rechazo conforme a los parámetros de calidad, se hicieron varios grupos de simulaciones basados en los mismos mapas de tráfico que se tenían en la red inicial. La figura 3.12 muestra los resultados de las simulaciones donde se puede apreciar que la razón de rechazo se mantuvo inferior al 5%.

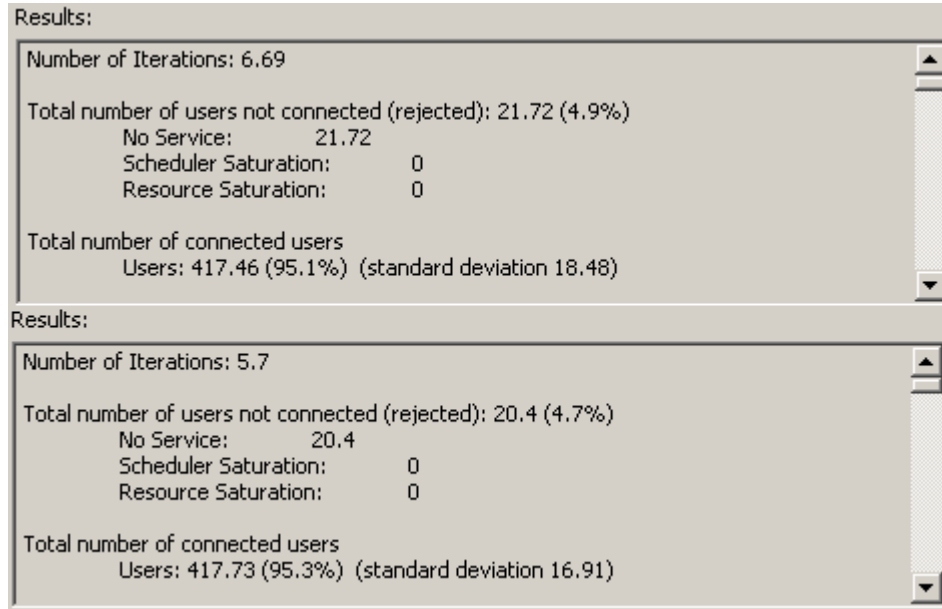


Figura 3.10: Resultado de las simulaciones de tráfico

Además de los resultados anteriores, se puede constatar que en estas condiciones la carga de tráfico está mejor repartida y que los niveles de interferencia mejoraron tal como se ve en las figuras 3.13 y 3.14.

	Site	Transmitter	Traffic Load (DL) (%)	Traffic Load (UL) (%)
	Agropecuaria	Agropecuaria_2	61.44	14.38
	Construcciones	Construcciones_2	31.02	6.72
	Construcciones	Construcciones_3	42.06	9.96
	Electrica	Electrica_1	60.75	13.58
	Electrica	Electrica_3	90.24	23.41
	Rectorado	Rectorado_1	68.39	15.37

Figura 3.11: Carga de Tráfico de los trasmisores después de optimizar

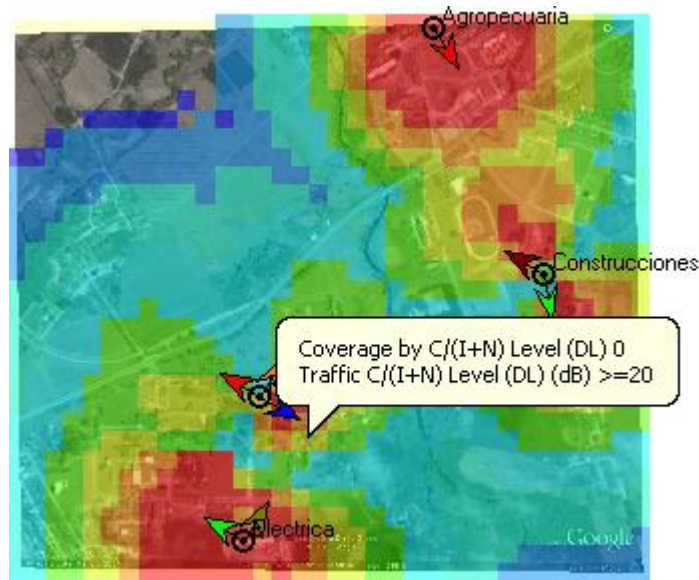


Figura 3.12: Análisis de Interferencia de la red optimizada.

3.5 Factibilidad

Al realizar el análisis de factibilidad para este diseño hay que tener en cuenta las condiciones socioeconómicas del proyecto en cuestión. Por regulaciones del MIC el único encargado de implementar esta tecnología es ETECSA, por lo tanto el proyecto debería estar definido hacia sus intereses, de tal forma que puedan recuperar la inversión en un tiempo razonable, preferiblemente menor de 5 años, fijando el precio de los servicios. Esto limita el análisis solo a las posibles inversiones iniciales que detallen los costos de los terminales y todos los elementos relacionados con la BS. Además se le debe adicionar a esto que es posible que la UCLV tenga que arrendar más ancho de banda a ETECSA para soportar el nuevo tráfico que aparecería a causa de la nueva red.

Teniendo en cuenta la falta de datos para realizar un análisis económico que permita apreciar la magnitud del diseño de red WiMAX Móvil elaborado a fin de determinar si es o no factible, el estudio de la red solo incluirá hasta la etapa de optimización.

3.6 Conclusiones parciales

Una vez finalizado el capítulo se establecen las siguientes conclusiones:

1. La obtención de un diseño de red WiMAX Móvil optimizado y eficiente para un entorno real, utilizando los métodos teóricos y los medios presentes en la metodología elaborada, permitió apreciar la validez de la misma.
2. Queda evidenciado que un mayor conocimiento de las condiciones iniciales permiten alcanzar diseños de red más exactos.

3. Se demostró las fortalezas del software Atoll para el diseño de redes inalámbricas mediante su empleo en el estudio de una posible red WiMAX Movil en la UCLV.
4. La estructura de la metodología desarrollada permite un estudio integral de la tecnología WiMAX basado en su razón de ser: su implementación bajo un diseño inteligente que logre resultados satisfactorios tanto para los clientes como para el operador.

CONCLUSIONES

Como culminación de esta investigación se arribó a las siguientes conclusiones:

- 1- La descripción realizada de la tecnología WiMAX y más concretamente de su variante móvil, aporta los suficientes conocimientos teóricos sobre la misma, de modo que sirven de herramienta base para el diseño de este tipo de redes.
- 2- La tecnología WiMAX presenta características de funcionamiento y de implementación que la hacen una plataforma adecuada para el salto hacia la cuarta generación de las redes de acceso inalámbricas de banda ancha.
- 3- La correcta articulación de las diferentes categorías que conforman una metodología permitió elaborar una propuesta que considera las necesidades de diseño de una red WiMAX Móvil, permitiendo al operador elegir aquel proyecto de red que se adecue más a sus intereses.
- 4- Aunque la metodología se desarrolló para la tecnología WiMAX Móvil, la estructura y bases de la misma pueden ser empleadas para el diseño e implementación de cualquier otro tipo de red de telecomunicaciones.
- 5- Se validó la metodología elaborada, utilizando métodos teóricos y empleando simulaciones virtuales en un entorno real, donde la red modelada cumplió los indicadores fundamentales de funcionamiento. Además quedó evidenciado que un mayor conocimiento de las condiciones iniciales permiten alcanzar diseños de red más exactos.

RECOMENDACIONES

Al concluir esta investigación se ofrecen las siguientes recomendaciones:

- 1- Desarrollar, mediante el empleo de la metodología elaborada, posibles diseños de redes WiMAX Móvil que tengan en cuenta otros escenarios de implementación.
- 2- Completar el estudio de factibilidad económica para una red WiMAX Móvil en la UCLV, que tenga en cuenta datos y propuestas reales con vistas a mejorar su oferta de servicios.
- 3- Utilizar la metodología elaborada como complemento para el estudio de las redes de acceso inalámbricas en cursos de pregrado y de postgrado, con vistas a aumentar el nivel de conocimientos de los profesionales de esta rama.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] M. A. G. Cartas, "Descripción de las tecnologías empleadas en las normas IEEE 802.11n y IEEE 802.16e," Tesis de Grado, Departamento de Electrónica y Telecomunicaciones, UCLV, Santa Clara, 2009.
- [2] M. Ergen. (2009). *Mobile Broadband.Including WiMAX and LTE*.
- [3] S. Ahmadi. (2011). *Mobile WiMAX. A System Approach to Understanding IEEE 802.16m Radio Access Technology*.
- [4] A.-E. M. Taha, *et al.* (2012). *LTE, LTE-Advanced and WiMAX. Towards IMT-Advanced Networks*.
- [5] A. R. I. Jadue, "Metodologías, herramientas y criterios para la planificación general de plataformas de telecomunicaciones " Tesis de Grado, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Chile, Santiago de Chile, 2007.
- [6] G. S. V. R. K. Rao. (2008). *WiMAX. A Wireless Technology Revolution*.
- [7] M. A. M. Valdebenito, "Metodologías, criterios y herramientas para la planificación de redes inalámbricas," Tesis de Grado, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Chile, Santiago de Chile, 2007.
- [8] G. T. Valdivia, "Diseño de una red WiMAX Móvil para la Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas," Tesis de Grado, Departamento de Electrónica y Telecomunicaciones, UCLV, Santa Clara, 2012.
- [9] A. R. Estopiñan, "Red de acceso inalámbrica para la provincia Mayabeque," Tesis de Maestría, Departamento de Electrónica y Telecomunicaciones, UCLV, Santa Clara, 2012.
- [10] I. G. Bermejo, "Nuevas tecnologías y modelos de negocios para operadores móviles," Tesis de Grado, Teoría de la Señal y Comunicaciones, 2008.
- [11] K.-C. Chen and J. R. B. d. Marca. (2008). *Mobile WiMAX*.
- [12] P. G. García, "Diseño de una herramienta de planificación de sistemas WiMAX " Tesis de Grado, Universidad Politécnica de Catalunya, 2006.
- [13] J. G. Andrews, *et al.* (2007). *Fundamentals of WiMAX. Understanding broadband wireless networking*.

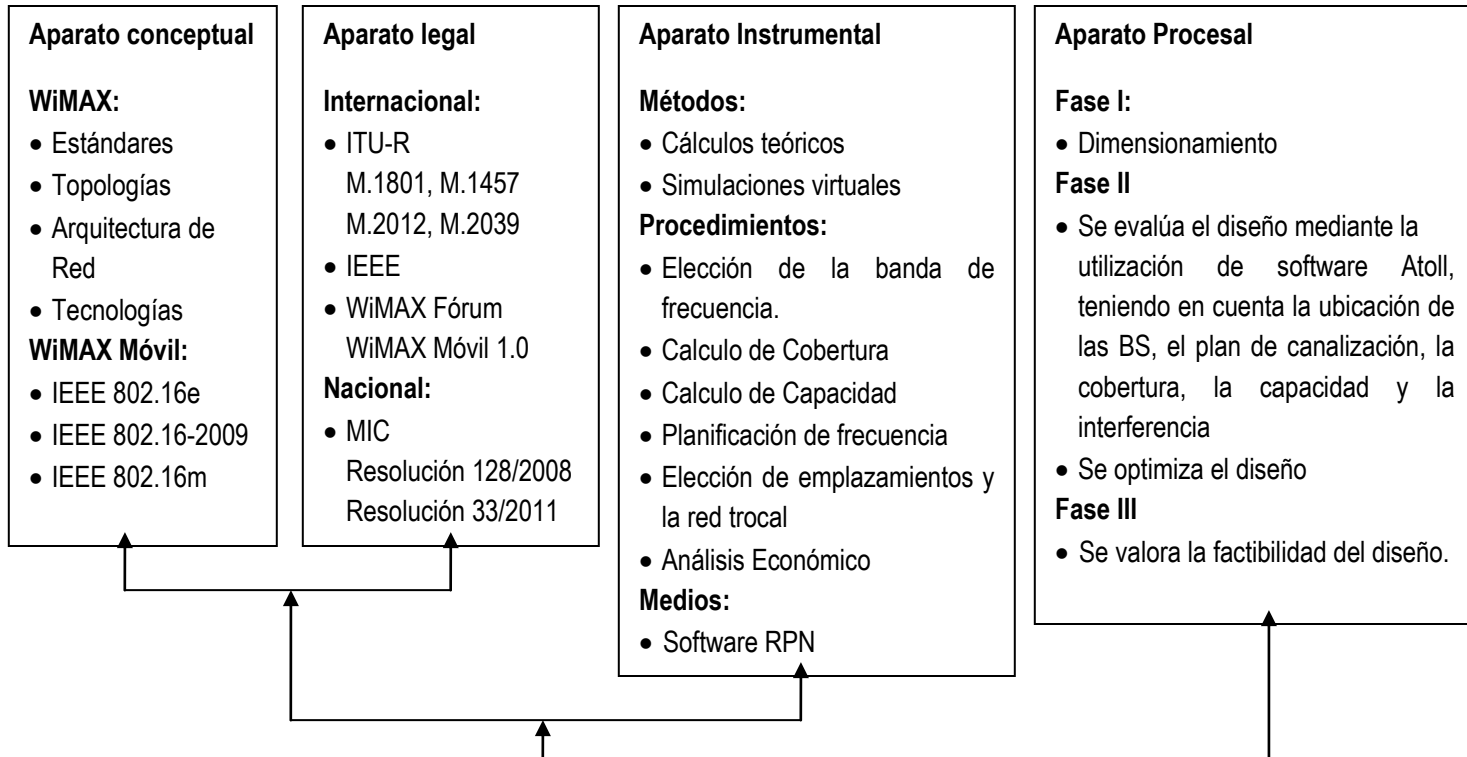
- [14] F. C. Geada. (2007, WiMAX. Nueva alternativa de comunicaciones para entornos rurales.
- [15] A. R. Fleites, *et al.* (2007, Enlace inalámbrico en la red UCLV.
- [16] B. H. Walke, *et al.* (2006). *IEEE 802 Wireless Systems. Protocols, Multi-hop Mesh/Relaying, Performance and Spectrum Coexistence.*
- [17] Y. D. Ferrer, "Descripción del estándar IEEE 802.16m," Tesis de Grado, Departamento de Electrónica y Telecomunicaciones, UCLV, Santa Clara, 2013.
- [18] C. R. Moreno, "Análisis de la viabilidad de la modificación de la enmienda IEEE802.16j para su aplicación en la banda no licenciada de 5GHz," Tesis de Maestría, Universidad Rey Juan Carlos, 2010.
- [19] D. Sweeney. (2006). *WiMAX Operator's Manual. Building 802.16 Wireless Network.*
- [20] A. Ahmad. (2005). *Wireless and Mobile Data Networks.*
- [21] R. v. Nee and R. Prasad. (2000). *OFDM for Wireless Multimedia Communications.*
- [22] W. Forum, "Mobile WiMAX- Part 1: A Technical Overview and Performance Evaluation ", ed: WiMAX Forum, 2006.
- [23] S. V. Pascual, "Red de acceso de Banda Ancha mediante WiMAX Móvil (IEEE 802.16e)," Tesis de Grado, Departamento de Ingeniería Informática, Universidad Autónoma de Madrid, Madrid, 2010.
- [24] C. Álvarez, *et al.*, "Las Telecomunicaciones y la Movilidad en la Sociedad de la Información," ed. España, 2005.
- [25] V. Kühn. (2006). *Wireless Communications over MIMO Channels. Applications to CDMA and Multiple Antenna Systems*
- [26] R. A. G. Clará, "Descripción de la tecnología MIMO empleada en redes inalámbricas de nueva generación," Tesis de Grado, Departamento de Electrónica y Telecomunicaciones, UCLV, Santa Clara, 2012.
- [27] E. Herrera-Ramírez, *et al.*, "Desarrollando el estándar IEEE 802.11n, un paso adelante en WLAN," ed: CiComp'07, 2007.
- [28] IEEE, "Amendment 2: Physical and Medium Access Control Layers for Combined Fixed and Mobile Operation in Licenced Band," in *IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks. Part 16: Air Interface for Fixed and Mobile Broadband Wireless Access Systems*, ed. US: IEEE, 2006.
- [29] H. Yaghoogi, "Scalable OFDMA Physical Layer in IEEE 802.16 WirelessMAN," *Intel Technology Journal*, vol. 08, 2004.

- [30] Q. Networks, "WiMAX: la revolucion inalambrica...j y móvil !," ed: Quobis Networks Inc, 2009.
- [31] H. Zhang, "MIMO Communications Systems: Antenna Selection and Interference Mitigation," Tesis de Doctorado, Universidad Estatal de Carolina del Norte, 2006.
- [32] A. Networks, "Mobile WiMAX Security," ed: Airspan Networks Inc, 2007.
- [33] N. d. A. Ramírez and J. L. González, "Caracterización y diseño de los resultados científicos como aportes a la investigacion educativa," ed.
- [34] C. L. López, "Metodología para la enseñanza - aprendizaje e tecnologías de la información y la comunicación a partir del vínculo escuela primaria - joven club de computación y electrónica," Tesis de Doctorado, Instituto Superior Pedagogico "Felix Varela", Santa Clara, 2009.
- [35] Y. Zhang. (2008). *Wireless Networks Planning and Optimization*.
- [36] C. So-In, *et al.*, "Capacity Evaluation for IEEE802.16e Mobile WiMAX," *Journal of Computer Systems, Networks, and Communications*, vol. 2010, p. 12, 2009.
- [37] A. M. Ahmadzadeh, "Capacity and Cell-Range Estimation for Multitraffic Users in Mobile WiMAX," Tesis de Maestría, School of Engineering, Colegio Universitario de Boras, 2008.
- [38] A. F. A. Rawi, *et al.*, "Pareto-meta heuristic multi-objective network optimization for ofdma - based systems," presented at the IEEE 6th International Conference, 2010.
- [39] Y. R.-G. Guerra, *et al.*, "Regulaciones del Ministerio de las Comunicaciones sobre el Espectro Radioeléctrico y los Sistemas de Radiocomunicaciones ", E. y. Telecomunicaciones, Ed., ed. Santa Clara, 2012.
- [40] M. D. Kats and F. H. P. Fitzek. (2009). *WiMAX Evolution. Emerging Technologies and Applications*.
- [41] W. Forum, "WiMAX System Evaluation Methodology ", ed: WiMAX Forum, 2008.
- [42] B. Ramasankar, "Comparison of Radio Propagation Models for WiMAX Coverage at 450 MHz, 2.5 GHz and 3.5 GHz for Different Terrains," Tesis de Maestría, Glasgow Caledonian University, 2012.
- [43] V. Teterin, "Optimized Network Dimensioning and Planning for WiMAX Technology," Tesis de Doctorado, School of Computer Science & Informatics, Cardiff University, 2012.
- [44] A. Kumar. (2008). *Mobile Broadcasting with WiMAX: Principles, Technology, and Applications*.

-
- [45] B. Upase, *et al.*, "Radio Network Dimensioning and Planning for WiMAX Networks," ed, 2007.
- [46] R. D. González, "Metodos para el aumento de la capacidad UMTS en Atoll," Tesis de Grado, Escuela Superior de Ingenieros de Sevilla, 2009.
- [47] J. Beltran, *et al.*, "Guía para una gestión basada en procesos," ed. Instituto Andaluz de tecnología, 2003.
- [48] I. S. Casas, "Realizar un análisis del tráfico de los servicios mail, FTP y HTTP de la Red UCLV," Tesis de Grado, Departamento de Electrónica y Telecomunicaciones, UCLV, Santa Clara, 2013.
- [49] A. P. Gallosa, "Estudio del software Atoll como propuesta docente a la asignatura Sistemas de Radio I " Tesis de Grado, Departamento de Electrónica y Telecomunicaciones, UCLV, Santa Clara, 2013.
- [50] C. G. Salas, "Planificación de una red LTE con la herramienta Atoll y análisis del impacto de las estrategias de Paquet Scheduling," Tesis de Grado, Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Telecomunicación, Universidad Politécnica de Catalunya, Barcelona, 2012.
- [51] Forsk, "Atoll 2.8.0 Getting Started," ed: Forsk, 2009.
- [52] Forsk, "Atoll 2.8.0 User Manual Radio," ed: Forsk, 2009.

ANEXOS

Anexo A: Estructura particular para el Diseño de redes WiMAX Móvil.



Anexo B: Modelos de Propagación

Modelo Cost 231 Hata

Este modelo está diseñado para operar en la banda de frecuencia de 1.5 GHz a 2 GHz y permite calcular las pérdidas medias de propagación mediante la expresión B.1

$$\overline{PL} = 46.3 + 33.9\log_{10}(f_c) - 13.82\log_{10}(h_t) - a(h_r) + (44.9 - 6.55\log_{10}(h_t))\log_{10}(d) + C_M \quad (\text{B.1})$$

Donde:

- f_c frecuencia de operación expresada en MHz
- h_t altura efectiva de la antena en la BS expresada en metros, con valores entre 30 y 200 m
- h_r altura efectiva de la antena en la MS expresada en metros, con valores entre 1 y 10 m
- $a(h_r)$ factor de corrección
- d distancia entre el transmisor y el receptor, con valores entre 1 y 20 Km
- $C_M = 0 \text{ dB}$, para entornos suburbanos, residenciales o ciudades medianas con vegetación
- $C_M = 3 \text{ dB}$, para entornos urbanos y centros metropolitanos

El factor de corrección toma valores entornos urbanos densos, urbanos y grandes ciudades de:

$$a(h_r) = 8.29(\log_{10}(1.54 h_r))^2 - 1.1 \quad (\text{B.2})$$

para frecuencias de operación menores a los 200 MHz

$$a(h_r) = 3.2(\log_{10}(11.75 h_r))^2 - 4.79 \quad (\text{B.3})$$

para frecuencias de operación mayores a los 400 MHz

En el caso de entornos suburbanos y residenciales:

$$a(h_r) = (1.1\log_{10}(f_c) - 0.7)h_r - (1.56\log_{10}(f_c) - 0.8) \quad (\text{B.4})$$

Modelos Cost 231 Walfish-Ikegami

Este modelo toma en consideración características adicionales del entorno, como las alturas de los edificios, ancho de las calles, separación entre edificios y la orientación de las calles respecto a la dirección de la onda de incidente, tal como muestra la figura B.1.

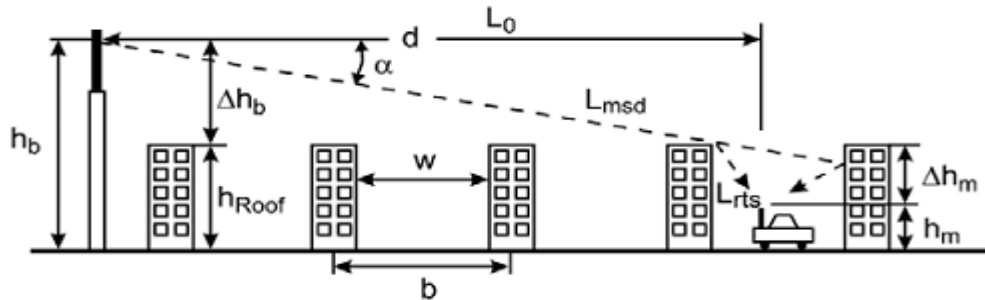


Figura B.1: Parámetros del Modelo Cost 231 Walfish-Ikegami [41]

Este modelo distingue entre casos con línea de vista y sin línea de vista. Para el primer caso las pérdidas de propagación están dadas por B.5:

$$\overline{PL} = 42.6 + 20\log_{10}(d) + 20\log_{10}(f_c) \quad (\text{B.5})$$

para $d \geq 0.02 \text{ Km}$. Aquí d se expresa en Km y f_c en MHz

Para el caso de que no exista línea de vista las pérdidas serían la sumatoria de tres términos, pérdidas de espacio libre L_0 , pérdidas por múltiples trayectos L_{msd} y las pérdidas por difracción a causa del tejado de los edificios L_{rts} , tal como se muestra en B.6

$$\overline{PL} = \begin{cases} P_{L_0} + L_{msd} + L_{rts}, & \text{para } L_{msd} + L_{rts} > 0 \\ P_{L_0} & , \text{ para } L_{msd} + L_{rts} \leq 0 \end{cases} \quad (\text{B.6})$$

donde

$$P_{L_0} = 34.2 + 20\log_{10}(d) + 20\log_{10}(f_c) \quad (\text{B.7})$$

$$L_{rts} = -16.9 - 10\log_{10}(w) + 10\log_{10}(f_c) + 20\log_{10}(\Delta h_m) + L_{ori} \quad (\text{B.8})$$

Aquí w es el ancho de las calles dado en metros, y Δh_m es la diferencia entre la altura del techo (h_{roof}) y la altura de la MS. Mientras

$$L_{ori} = \begin{cases} -10 + 0.354\varphi & \text{para } 0^\circ \leq \varphi \leq 35^\circ \\ 2.5 + 0.075(\varphi - 35) & \text{para } 35^\circ \leq \varphi \leq 55^\circ \\ 4.0 - 0.114(\varphi - 35) & \text{para } 55^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ \end{cases} \quad (\text{B.9})$$

donde φ es el ángulo entre la orientación de la calle y la dirección de la onda incidente como se muestra en la figura B.2

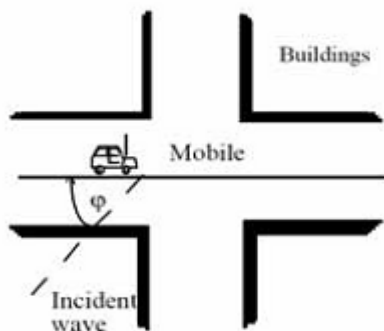


Figura B.2: Ángulo de orientación de la calle [41]

Por último, L_{msd} queda definido por B.10:

$$L_{msd} = L_{bsh} + k_a + k_d \log_{10}(d) + k_f \log_{10}(f_c) - 9 \log_{10} b \quad (\text{B.10})$$

Aquí b es la distancia, en metros, entre dos edificios. Los demás términos se evalúan mediante las expresiones B.11-B.14

$$L_{bsh} = \begin{cases} 18 \log_{10}(1 + \Delta h_b) & \text{para } h_b \geq h_{\text{roof}} \\ 0 & \text{para } h_b \leq h_{\text{roof}} \end{cases} \quad (\text{B.11})$$

$$k_a = \begin{cases} 54 & \text{para } h_b > h_{\text{roof}} \\ 54 - 0.8\Delta h_b & \text{para } d \geq 0.5 \text{ km y } h_b \leq h_{\text{roof}} \\ 54 - 0.8\Delta h_b d / 0.5 & \text{para } d < 0.5 \text{ Km y } h_b = h_{\text{roof}} \end{cases} \quad (\text{B.12})$$

$$k_d = \begin{cases} 18 & \text{para } h_b > h_{\text{roof}} \\ 18 - 15\Delta h_b / h_{\text{roof}} & \text{para } h_b \leq h_{\text{roof}} \end{cases} \quad (\text{B.13})$$

$$k_f = \begin{cases} 0.7 \left[\frac{f_c}{925} - 1 \right] & \text{para entornos suburbanos} \\ 1.5 \left[\frac{f_c}{925} - 1 \right] & \text{para entornos urbanos} \end{cases} \quad (\text{B.14})$$

Para estos cálculos $\Delta h_b = h_b - h_{\text{roof}}$. Este modelo está restringido a la utilización de frecuencias de operación entre 800 MHz y 2000 MHz, alturas de las antenas de la BS entre 4 y 50 m, alturas de las antenas de la MS entre 1 y 3 m y para distancias entre 0.02 y 5 Km.

Modelo Erceg

Este modelo depende del terreno en el cual se realice el enlace. En este modelo se definen 3 categorías de escenarios geográficos:

- Terreno A: aplicable a terrenos montañosos con mediana y alta densidad de árboles, útil para zonas urbanas.
- Terreno B: aplicable a terrenos montañosos con moderada densidad de árboles, útil para zonas suburbanas.
- Terreno C: aplicable a terrenos llanos con baja densidad de árboles y zonas rurales.

En este modelo las pérdidas medias de propagación se calculan mediante la expresión B.15:

$$\overline{PL} = A + 10\gamma \log_{10} d/d_0 + s; d > d_0 \quad (\text{B.15})$$

$$\text{donde } A = 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi d_0}{\lambda} \right) \quad (\text{B.16})$$

El parámetro λ corresponde a la longitud de onda de la señal en metros, γ es el exponente de las pérdidas por propagación, d es la distancia entre un punto determinado y la antena de la BS, d_0 es una distancia de referencia igual a 100 m y por último s corresponde al término que representa los efectos de desvanecimiento por sombra o apantallamiento que oscila entre valores de 8.2 dB y 10.6 dB.

El exponente de propagación se calcula mediante la expresión B.17:

$$\gamma = a - b \cdot h_b + \frac{c}{h_b} \quad (\text{B.17})$$

Donde hay que tener en cuenta que los parámetros a , b y c que dependen de las categorías del terreno, cuyos valores se muestran en la Tabla A1.1, y h_b es la altura de la BS que puede variar entre 10 y 80 metros.

Tabla A1.1: Parámetros a , b y c de acuerdo al tipo de terreno

Parámetros	Terreno tipo A	Terreno tipo B	Terreno tipo C
a	4.6	4	3.6
b	0.0075	0.0065	0.005
c	12.6	17.1	20

A este modelo se le agrego ciertos factores de corrección. El primer factor de corrección fue en cuento a la frecuencia ya que este modelo operaba originalmente para frecuencias cercanas a los 2 GHz, con esta corrección se aumentaba el rango de las frecuencias de operación. El otro factor permitió considerar que la antena del receptor puede estar entre 2 y 10 m, originalmente el modelo utilizaba antenas de altura cercanas a los 2 metros.

Luego en el modelo, con los factores de corrección mencionados anteriormente, las pérdidas de propagación estarán dadas por B.18:

$$\overline{PL}_{\text{corregido}} = \overline{PL} + \Delta PL_f + \Delta PL_h \quad (\text{B.18})$$

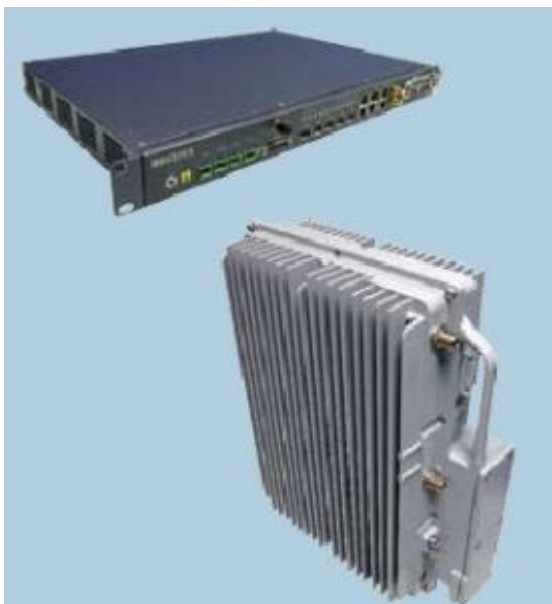
donde

$$\Delta PL_f = 6 \log_{10} \left(\frac{f}{2000} \right) \quad ; f \text{ está en MHz} \quad (\text{B.19})$$

$$\Delta PL_h = -10.8 \log_{10} \left(\frac{h}{2} \right) \quad ; \text{ para categorías del terreno A y B} \quad (\text{B.20})$$

$$\Delta PL_h = -20 \log_{10} \left(\frac{h}{2} \right) \quad ; \text{ para categorías C} \quad (\text{B.21})$$

Anexo C: Estación Base 3703



Especificaciones:

- ❖ Fabricante: Huawei
- ❖ Frecuencias de operación: 2.5 GHz (2496 - 2690 MHz); 2.3 GHz (2300 - 2400 MHz); 3.5 GHz (3400 - 3600 MHz)
- ❖ Máxima Potencia de TX por cada antena: 10W para banda de 2.5 y 2.3 GHz; 5W para la banda de 3.5 GHz
- ❖ Ancho de Banda: 5 MHz o 10 MHz
- ❖ Voltaje de alimentación: -48V DC.
- ❖ Antenas: Puede conectar hasta 6 RRU, cada uno para un sector con antenas de 60°, 90° o 120°. También permite antena para GPS.
- ❖ Seguridad: Basada en las especificaciones de la enmienda IEEE 802.16e
- ❖ QoS: Soporta los cinco esquemas de servicios definidos en IEEE 802.16e-2005: UGS (*Unsolicited Grant Service*), rtPS (*Real-time Polling Service*), ertPS (*Extended Real-time Polling Service*), nrtPS (*Non Real-time Polling Service*) y BE (*Best Effort*).
- ❖ Sistema completamente configurable a distancia. Permite visualización de alarmas.
- ❖ Capacidad de suscriptores activos: Un sector presenta un máximo de 512 usuarios en línea.
- ❖ Máximo pico en enlace descendente: 30 Mbps por sector para 10 MHz de ancho de banda; 15 MHz para 5 MHz de ancho de Banda.

Anexo D: Stick USB WiMAX BM358**Especificaciones:**

- ❖ Fabricante: Huawei
- ❖ Frecuencia de operación: 2.3-2.5
- ❖ Estándar: IEEE802.16e-2005
- ❖ Método de Duplexación: TDD
- ❖ Ancho de Banda del Canal: 10MHz
- ❖ Modulación: QPSK, 16QAM, 64QAM
- ❖ Potencia de Transmisión: 23 dB
- ❖ Antenas: 2 en recepción, una en transmisión.
- ❖ Ganancia: 2dBi
- ❖ MIMO: Matrix A y Matrix B
- ❖ QoS: ertPS, nrtPS, rtPS y BE
- ❖ Consumo Máximo de Potencia: Inferior a 1.75 W
- ❖ Dimensiones: 77 x 28 x 10mm
- ❖ Peso: 22g
- ❖ Soporte: Windows XP-32-bit, Windows Vista, Windows 7, Mac OS 10.5 e inferiores.