



SISTEMA DE POSGRADO
MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES

TÍTULO DE LA TESIS:

“Caracterización de un radioenlace entre el campus Portoviejo de la Universidad Técnica de Manabí y su extensión en Bahía de Caráquez”

Previa la obtención del Grado Académico de Magíster en Telecomunicaciones

ELABORADO POR:

ING. ANDREA KATHERINE ALCÍVAR CEDEÑO

DIRIGIDO POR:

MSc. Juan García Pérez

Año

2014



SISTEMA DE POSGRADO

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente trabajo fue realizado en su totalidad por la Ing. Andrea Katherine Alcívar Cedeño como requerimiento parcial para la obtención del Grado Académico de Magíster en Telecomunicaciones.

Guayaquil, Abril de 2014

DIRECTOR DE TESIS

Ing. Juan García Pérez, MSc.

REVISORES:

Ing. Orlando Philco Asqui, MSc.

Ing. Luís Córdova Rivadeneira, MSc.

DIRECTOR DEL PROGRAMA

Ing. Manuel Romero Paz, MSc.



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

SISTEMA DE POSGRADO

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

YO, ANDREA KATHERINE ALCIVAR CEDEÑO

DECLARO QUE:

La tesis “Caracterización de un radioenlace entre el campus Portoviejo de la Universidad Técnica de Manabí y su extensión en Bahía de Caráquez”, previa a la obtención del grado Académico de Magíster, ha sido desarrollada en base a una investigación exhaustiva, respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan al pie de las páginas correspondientes. Consecuentemente este trabajo es de mi total autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance científico de la tesis del Grado Académico en mención.

Guayaquil, Abril de 2014

EL AUTOR

ING. ANDREA KATHERINE ALCIVAR CEDEÑO



SISTEMA DE POSGRADO

AUTORIZACIÓN

YO, ING. ANDREA KATHERINE ALCIVAR CEDEÑO

Autorizo a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, la publicación, en la biblioteca de la institución de la Tesis de Maestría titulada: “Caracterización de un radioenlace entre el campus Portoviejo de la Universidad Técnica de Manabí y su extensión en Bahía de Caráquez”, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y total autoría.

Guayaquil, Abril de 2014

EL AUTOR

ING. ANDREA KATHERINE ALCIVAR CEDEÑO

AGRADECIMIENTOS

Al Sistema de Posgrado de la Universidad Católica Santiago de Guayaquil por permitirme obtener la formación científica en el área de las telecomunicaciones dentro de sus aulas.

Al M^sC. Manuel Romero, Director de la Maestría en Telecomunicaciones de la Universidad Católica Santiago de Guayaquil por el apoyo brindado en el desarrollo y obtención de mi título.

Al M^sC. Juan García, por su colaboración y asesoría en la realización de esta investigación.

A mis amigos y compañeros de maestría, por los momentos inolvidables durante estos años y viajes de estudio.

A mis compañeros de trabajo de la UTM extensión Bahía, por las facilidades y el impulso brindado para culminar esta meta.

A todos y cada uno de quienes contribuyeron en la consecución de esta meta.

Gracias de corazón

DEDICATORIA

A mi hija Ashley Valentina, quien desde su llegada ha sido la luz que guía mis días, fuente de energía que me impulsa a seguir superándome, que este trabajo sea una forma de mostrarle que cuando se quiere alcanzar algo en la vida, no hay tiempo ni obstáculo que lo impida para poder lograrlo.

A mis hermanos, en especial a mi flaquita quien cada día que pasa lo vive con pasión y valentía siendo fuente de inspiración y superación para quienes la rodean.

Al amor de mi vida Jorge, quien con su amistad y apoyo constituye un pilar fundamental en mi vida, quien junto con mi hija me inspiran día a día a continuar luchando y cumplir cada meta propuesta.

A mis padres quienes con mucho cariño, amor y ejemplo fomentaron en mí el deseo de superación y anhelo de triunfo en la vida, además de formarme como una persona con valores para poder desenvolverme como esposa, madre y profesional.

*Con mucho amor,
Andrea*

RESUMEN

La presente investigación está motivada por las insuficiencias del sistema de comunicaciones entre la UTM y la extensión universitaria de Bahía de Caráquez. En el documento se presenta un análisis de las diferentes tecnologías de acceso inalámbricas con énfasis en WiFi y WiMAX. En el trabajo se adopta un enfoque integral en la planeación y diseño de redes de acceso inalámbrico de banda ancha cuyo aporte teórico metodológico es un sistema de pasos para la modelación y simulación de una red WiMAX. Una vez alcanzado este objetivo la tesis presenta una propuesta de solución económica y robusta en correspondencia con los requerimientos de conectividad de voz y datos entre dichas instituciones. La red diseñada se soporta en el estándar IEEE 802.16e.

Palabras claves: WiMAX, WiFi, OFDM, IEEE802.16e.

ABSTRACT

This research is motivated by the shortcomings of the communication system between UTM and university extension Caráquez Bay. An analysis of the different wireless access technologies with emphasis on WiFi and WiMAX is presented in the paper. At work a comprehensive approach is taken in the planning and design of wireless access networks Broadband whose theoretical and methodological contribution is a set of steps for modeling and simulation of a WiMAX network. Once this is achieved the thesis presents a proposal for economic and robust solution in line with the requirements of voice and data connectivity between these institutions. The designed network is supported in IEEE 802.16e.

Keywords: WiMAX, WiFi, OFDM, IEEE802.16e

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS	V
DEDICATORIA	VI
RESUMEN	VII
ABSTRACT	VIII
INDICE DE FIGURAS	XII
ÍNDICE TABLAS	XIV
GENERALIDADES DEL TRABAJO DE GRADUACIÓN	1
Introducción	1
Justificación	2
Importancia y Pertinencia Social	2
Importancia y Pertinencia Tecnológica	3
Objetivos	3
Objetivo General	3
Objetivos Específicos	3
Capítulo 1. Estado del arte de las tecnologías de acceso inalámbrico de banda ancha para entornos rurales	5
1.1 Alternativas tecnológicas para el acceso inalámbrico en áreas metropolitanas.....	5
1.2 Características generales de las principales tecnologías de acceso inalámbrico	5
1.2.1 VHF	5
1.2.2 HF	6
1.2.3 Conexión satelital (VSAT)	7
1.2.4 Tecnología WiFi	8
1.2.5 Tecnología WiMAX	14
1.2.6 Antecedentes del empleo de WiMAX en entornos rurales	26
1.2.7 Estado del arte en la planeación y diseño de redes de acceso inalámbricas....	27
1.2.8 Los programas informáticos como herramientas en el diseño de redes de acceso inalámbrico	30
Capítulo 2. Fundamentación del diseño de redes de acceso inalámbrico	33
2.1 Fundamentación del diseño de redes de acceso inalámbrico.....	33
2.2 Análisis de capacidad y demanda de servicios	35
2.2.1 Caracterización del tráfico.....	35

2.2.2	Análisis de capacidad en WiMAX	36
2.2.3	Características de recepción	36
2.2.4	Acuerdo sobre nivel de servicio con el usuario (SLA).....	39
2.2.5	Dimensionamiento de la Red.....	41
2.3	Elección de los modelos de propagación	44
2.3.1	Modelo de propagación en el espacio libre	44
2.3.5	Modelo de la atenuación específica debido a la lluvia. Influencia de la Lluvia en los niveles de transmisión en un enlace de radio.....	50
2.4	Elección del programa de simulación del enlace de radio	51
2.5	Selección de los mapas	52
2.6	Simulación y análisis del comportamiento de los enlaces de radio	52
2.7	Mejoramiento del funcionamiento de la red	53
2.7.1	Análisis de los Servicios.....	53
2.7.2	Ingeniería de Tráfico	54
2.8	Subsistema de Energía	55
2.8.1	Cálculo del consumo de la carga media diario	56
2.8.2	Dimensionamiento del sistema de almacenamiento.....	56
2.8.3	Subsistema de Protección Eléctrica.....	57
2.9	Propuesta de pasos a seguir para el diseño de una red de acceso inalámbrico	58
2.9.1	Pasos para el diseño de la red	58
Capítulo 3. Diseño e implementación del enlace inalámbrico		60
3.1	Estudio de la zona	60
3.2	Determinación de la tecnología a implementar y modelo de red propuesto.....	60
3.3	Descripción del Software. Modelo utilizado para la propagación.....	64
3.3.1	Parámetros de entrada en el modelo ITS.	65
3.4	Cálculo del enlace de radio entre el campus Portoviejo de UTM y su extensión en Bahía de Caráquez	69
3.4.1	Creación de la red en Radio Mobile	73
3.4.2	Cálculo e interpretación del enlace AIRMAX	79
3.4.3	Exportar el enlace a la aplicación: Google Earth	80
3.4.4	Cálculo del presupuesto de potencia del enlace	81
3.4.5	Resultados de la simulación	86
3.5	Descripción de los equipos propuestos	89
3.5.1	Área de cobertura	90

CONCLUSIONES	92
RECOMENDACIONES.....	93
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	94
GLOSARIO DE TÉRMINOS	98
ANEXOS	102

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Esquema de Red VHF17.....	6
Figura 1.2 Esquema de Red HF.....	8
Figura 1.3 Ejemplo de enlace Punto a Punto.....	11
Figura 1.4 Enlace Punto Multipunto.....	12
Figura 1.5 Red multipunto a multipunto.....	14
Figura 1.6 Estructura del protocolo TCP/IP.....	15
Figura 1.7 Esquema de subcanalización en OFDMA.....	20
Figura 1.8 Asignación de subportadoras menos vulnerables para combatir las interferencias en OFDMA.....	20
Figura 1.9 Etapas de planeamiento de la una red WiMAX.....	29
Figura 2.1 Esquema de los subsistemas en el diseño de una red de acceso inalámbrico.....	36
Figura 2.2. Fases del diseño del Subsistema de Telecomunicaciones.....	37
Figura 2.3: Etapas de implementación de un SLA Figura 2.5 Las Sub-portadoras en OFDM.....	43
Figura 2.4: Curvas de atenuación relativa Okumura , Factor de ganancia del ambiente y término $G(h_t)$	49
Fig. 3.1 Distancia entre la extensión de Bahía de C. y la UTM (Imagen generada mediante Google Earth).....	65
Figura 3.2 Estructura de Red Propuesta.....	66
Figura 3.3 El área sombreada indica la cobertura de SRTM.....	68
Figura 3.4 Atenuación de referencia vs. distancia.....	72
Figura 3.5 Coordenadas de la UTM, Portoviejo (generada mediante Google Earth).....	74
Figura 3.6 Barra para crear las Unidades.....	75
Figura 3.7 Opción para exportar la latitud y la longitud de la Extensión de Bahía de Caráquez.....	75

Figura 3.8 Unidad de BAHIA.....	76
Figura 3.9 Acceso a la herramienta: Propiedades de las redes.....	76
Figura 3.10 Configuración de los parámetros con la ficha “Sistemas”.....	77
Figura 3.11 Definición de la Topología a utilizar.....	78
Figura 3.12 Definición de los miembros: Red Portoviejo – Hojas.....	79
Figura 3.13 Ventana “Propiedades del Mapa”.....	80
Figura 3.14 Área de cobertura entre UTM y Hojas.....	81
Figura 3.15 Área de cobertura del enlace Hojas – Vientos.....	81
Figura 3.16 Área de cobertura del enlace Vientos – Bahía.....	82
Figura 3.17 Simulación entre Portoviejo y Hojas.....	83
Figura 3.18 Enlace exportado a Google Earth.....	83
Figura 3.19 Estructura de red propuesta para el enlace AIRMAX.....	84
Figura 3.20 Configuración de los radio enlaces.....	85
Figura 3.21 Cálculo del Presupuesto de Potencia del Enlace.....	86
Figura 3.22 Proyección de los enlaces de la red AIRMAX: vista SRTM3.....	90
Figura 3.23 Vista aérea del enlace AIRMAX desde Google Earth.....	91
Figura 3.24 Perfil topográfico de los enlaces implementados. (a) UTM PORTOVIEJO – HOJAS; (b) HOJAS – VIENTOS; (c) VIENTOS – UTM BAHIA.....	92
Figura 3.25 Antena modelo AM-9M13-120 para Rocket M.....	93

ÍNDICE TABLAS

Tabla 1.1: Distribución de las portadoras según ancho de banda del canal con la permutación PUSC.....	21
Tabla 1.2: Distribución de las portadoras según ancho de banda del canal con la permutación AMC.....	21
Tabla 1.3: Bandas de frecuencias para WiMAX.....	22
Tabla 1.4: Cobertura de WiMAX según el entorno.....	23
Tabla 2.1: Modulaciones y tasas de señal a ruido mínimas necesarias para cada tipo de...	39
Tabla 2.2: Especificaciones de recepción de la estación DBS3900.....	39
Tabla 2.3: Modulaciones y tasa de información.....	40
Tabla 2.4: Cálculos de capacidad para WiMAX 802.16e (SOFDMA TDD) para la permutación PSUC.....	41
Tabla 3.1: Parámetros de entrada para el modelo ITM.....	69
Tabla 3.2: Valores sugeridos para el parámetro de terreno irregular.....	70
Tabla 3.3: Valores sugeridos para las constantes eléctricas del terreno.....	70
Tabla 3.4: Valores sugeridos para N_s en función del clima.....	71
Tabla 3.5: Cálculo del Presupuesto de Potencia para el Enlace UTM Portoviejo-Hojas...	88
Tabla 3.6: Cálculo del Presupuesto de Potencia para el Enlace Hojas-Vientos.....	88
Tabla 3.7: Cálculo del Presupuesto de Potencia para el Enlace Vientos-Bahía.....	88
Tabla 3.8: Tabla 10: Resumen de datos de cada terminal.....	90

GENERALIDADES DEL TRABAJO DE GRADUACIÓN

Introducción

- Las redes inalámbricas (WLAN's¹) han tenido un notable desarrollo en los últimos años, siendo así que tanto organizaciones privadas como gubernamentales han adoptado este tipo de tecnología por las facilidades brindadas y la facilidad de comunicarse a altas velocidades. Es por este motivo, que continuamente se desarrollan actualizaciones a los estándares y parámetros de calidad mejorando eficientemente la productividad de las empresas que la utilizan. Su importancia radica en la facilidad de disponer conectividad en sitios que comúnmente sería imposible llegar a través de una red LAN².
- Cuando utilizamos el término *inalámbrico*, por lo general nos estamos refiriendo a la posibilidad de interconectar computadores en un mismo entorno sin la necesidad de estar físicamente conectados, brindando a los usuarios la posibilidad de desplazarse continuamente de un lugar a otro sin perder la conexión o el acceso a los recursos e información compartida. Estas ventajas que son a simple vista las que lo hacen atractivo al usuario, permiten dentro de otras aplicaciones: movilidad, acceso a la información, transmisión de datos, voz y video dentro de la red, y en algunos casos permiten alcanzar distancias de interconexión en zonas más extensas o que poseen una alto tráfico de usuarios.
- Otro aspecto a considerar al utilizar WLANs dentro de una institución es la incorporación o ampliación de la cobertura para brindar servicios a sus usuarios, pero para esto es necesario poder contar con la tecnología que proporcione disponibilidad de información pero con las medidas y protocolos de seguridad que las normas exigen.

La inexistencia de un radioenlace con características técnicas adecuadas, que interconecte el campus de la extensión universitaria en Bahía Caráquez con la matriz de la Universidad Técnica de Manabí ubicado en la ciudad de Portoviejo, afecta directamente a la disponibilidad y eficiencia de los servicios concernientes a los procesos administrativos y del sistema de enseñanza- aprendizaje.

¹ *Wireless Local Area Network* (Redes de Área Local inalámbrica)

² Red de área local, red local o LAN (del inglés local *area network*)

Por tanto el desarrollo del presente proyecto pretende comprobar a través del simulador Radio Mobile que la implementación del radioenlace con características técnicas adecuadas brindará la disponibilidad y eficiencia entre el campus de la extensión universitaria en Bahía de Caráquez con la matriz de la Universidad Técnica de Manabí ubicado en la ciudad de Portoviejo.

Justificación

- Actualmente, la tendencia en toda organización se centra principalmente en el fortalecimiento tecnológico, la disponibilidad de información y la optimización de recursos, los cuales requieren de la conectividad necesaria para que sus procesos se realicen de manera oportuna, con los estándares y protocolos de seguridad que permitan confiabilidad e integridad de los datos.
- Para que exista disponibilidad y eficiencia de los servicios entre el campus principal de la Universidad Técnica de Manabí con su extensión en Bahía de Caráquez es necesario disponer de un radioenlace que elimine las falencias existentes en el desempeño ágil y oportuno de los procesos administrativos y por ende los del sistema de enseñanza aprendizaje.
- Por lo expuesto anteriormente, el presente proyecto pretende caracterizar el diseño de una infraestructura de red propia que proporcione a la institución conectividad de alta disponibilidad, seguridad y monitoreo de los procesos institucionales, contribuyendo al mejoramiento de los procesos administrativos y académicos dentro de la comunidad universitaria, y que posteriormente sirva como plataforma para la implementación e integración de servicios como: videoconferencias, entornos virtuales de aprendizaje, acceso inalámbrico, telefonía IP, gestión de procesos entre otros.

Importancia y Pertinencia Social

La Universidad Técnica de Manabí, actualmente cuenta con un número de 14224 estudiantes dentro de la Alma Mater, 549 docentes y 128 empleados, por lo que el tráfico masivo de usuarios a los recursos e información existente en cada uno de los departamentos se vuelve inaccesible en momentos determinados, y siendo la institución una entidad de servicio a la comunidad debe poder ofrecer disponibilidad y transparencia de los datos requeridos. Por otro lado, estando la extensión de Bahía a aproximadamente

60 km de distancia de la matriz es necesario poder contar con una infraestructura, equipos y herramientas tecnológicas con un radioenlace que interconecte ambos campus.

Importancia y Pertinencia Tecnológica

- El uso de las redes inalámbricas en especial las WIFI y WIMAX,

Objetivos

Objetivo General

Determinar la factibilidad del radio enlace a través del simulador Radio Mobile

Objetivos Específicos

- Analizar los requerimientos técnicos, geográficos y ambientales para establecer el enlace que permita una conectividad óptima
- Evaluar las características técnicas de los equipos que dispongan para obtener mayor eficiencia del enlace.
- Diseñar un radioenlace entre la matriz de Portoviejo y la extensión de Bahía que permita optimizar la transmisión de la información.

Resultados

El diseño e implementación de un radioenlace basado en tecnología WIMAX, calculado utilizando el software Radio Mobile brindaría disponibilidad y eficiencia en los servicios concerniente a los procesos administrativos y del sistema de enseñanza aprendizaje, en la Extensión del Campus de la Universidad Técnica de Manabí ubicado en la ciudad de Bahía Caráquez

Las unidades de análisis y variables que nos permitirán comprobar los resultados esperados son:

Unidades de análisis

- Campus Principal Portoviejo
 - Extensión en Bahía de Caráquez

- Independientes.
- Factores geográficos y ambientales
- Características técnicas de los equipos
- Dependientes.
- Radio enlace
- Procesos administrativos y académicos
- Disponibilidad y eficiencia de datos
- Niveles de factibilidad.
- Metodología

Tipo de investigación

La investigación a realizarse es de tipo Aplicada cuasi experimental y transeccional, debido a que se pretende recolectar datos de geo localización en un momento determinado, lo que permitirá describir las variables, analizando su incidencia e interrelación simulando diversos escenarios con la utilización del Software Radio Mobile.

Enfoque Metodológico

Cuantitativo. A través de la observación y medición de parámetros que permitirán deducir la interrelación entre variables.

Por su alcance es Correlacional debido a que se establecerá relación entre el radioenlace y la disponibilidad de servicios.

Como métodos se utilizarán: el experimental en base a pruebas de simulación con el Software Radio Mobile.

Universo

Universidad Técnica de Manabí

Capítulo 1. Estado del arte de las tecnologías de acceso inalámbrico de banda ancha para entornos rurales

En este capítulo se presentan los aspectos básicos de las principales alternativas tecnológicas para el acceso inalámbrico en zonas metropolitanas. Se definen y caracterizan las distintas tecnologías para el acceso inalámbrico, particularmente: WiMAX con la familia de estándares 802.16 y se destacan los rasgos que la distinguen de las anteriores tecnologías y sus ventajas para el empleo en entornos rurales. A continuación es resumido el estado del arte en la planeación y diseño de redes de acceso inalámbricas.

1.1 Alternativas tecnológicas para el acceso inalámbrico en áreas metropolitanas

En países en vías de desarrollo es frecuente que zonas rurales de gran extensión carezcan por completo de infraestructuras de telecomunicaciones, ello supone un obstáculo para el desarrollo y la calidad de vida de las personas. El alto costo de las alternativas tecnológicas convencionales, las dificultades del entorno tales como la ausencia de alimentación eléctrica, la precariedad en las vías terrestres de comunicación, la falta de seguridad física de las instalaciones en emplazamientos deshabitados suponen grandes condicionantes para estas tecnologías entre las que se destacan VHF³, HF⁴, Conexión Satelital (VSAT), WiFi⁵ y WiMAX⁶.

Las características más generales de estas tecnologías se describen a continuación:

1.2 Características generales de las principales tecnologías de acceso inalámbrico

1.2.1 VHF

Es la banda del espectro electromagnético que ocupa el rango de frecuencias de 30 MHz a 300 MHz. Entre los sistemas que funcionan en VHF se tienen: la televisión, la radiodifusión en FM, la banda aérea, las comunicaciones entre buques y control de tráfico marítimo. (Ver Fig. 1.1)

³ Frecuencia muy alta (*Very High Frequency* en inglés)

⁴ Del inglés *High Frequency* (o altas frecuencias)

⁵ Abreviatura de *Wireless Fidelity* (Fidelidad inalámbrica)

⁶ Siglas de *Worldwide Interoperability for Microwave Access* (Interoperabilidad mundial para acceso por microondas)

En ellas se alcanzan distancias de enlace de hasta 70 Km, limitados por la potencia de transmisión y la altura de las antenas. Es recomendable línea de vista entre las antenas transmisoras y receptoras. (Araujo & otros, 2008)

Esta tecnología está diseñada para la transmisión de voz sin embargo mediante programas se pueden realizar comunicaciones de datos, pero con muy bajas velocidades.

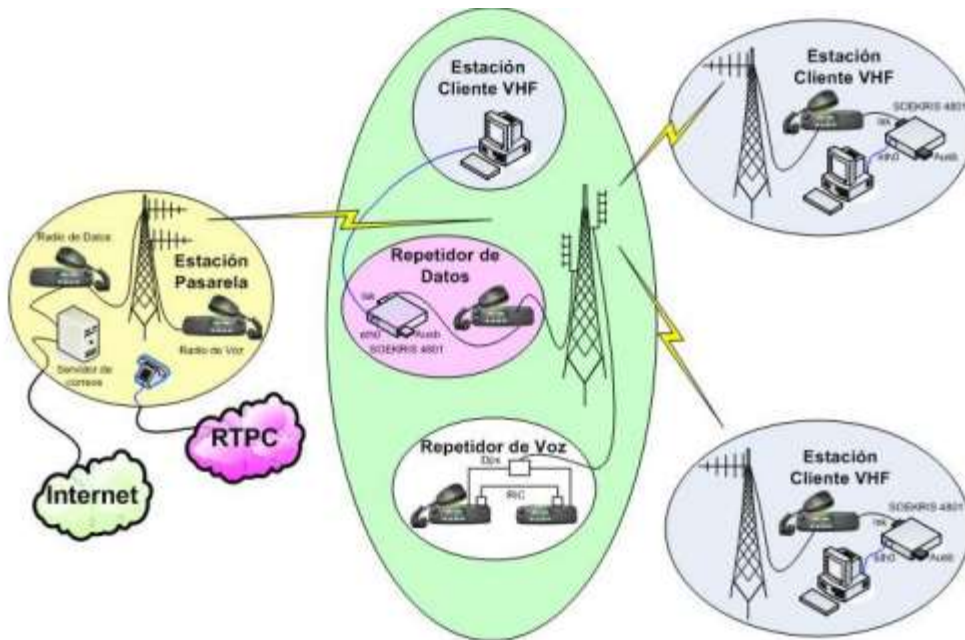


Figura 1.1 Esquema de Red VHF

Fuente: (Araujo & otros, 2008)

Desventajas:

- El uso de la banda VHF requiere de la obtención oficial de una licencia de servicio.
- Velocidades de transmisión de datos bajas.
- Alto consumo de potencia, superiores a los 100 W en transmisión.

1.2.2 HF

La transmisión en banda HF tiene un rango de frecuencia de operación de 3 a 30 MHz y permite comunicaciones de centenares y hasta miles de kilómetros. Los sistemas de radio de onda corta HF habilitan comunicaciones a través de terrenos planos, elevados o montañosos, sin la necesidad de dispositivos de retransmisión. (Araujo & otros, 2008)

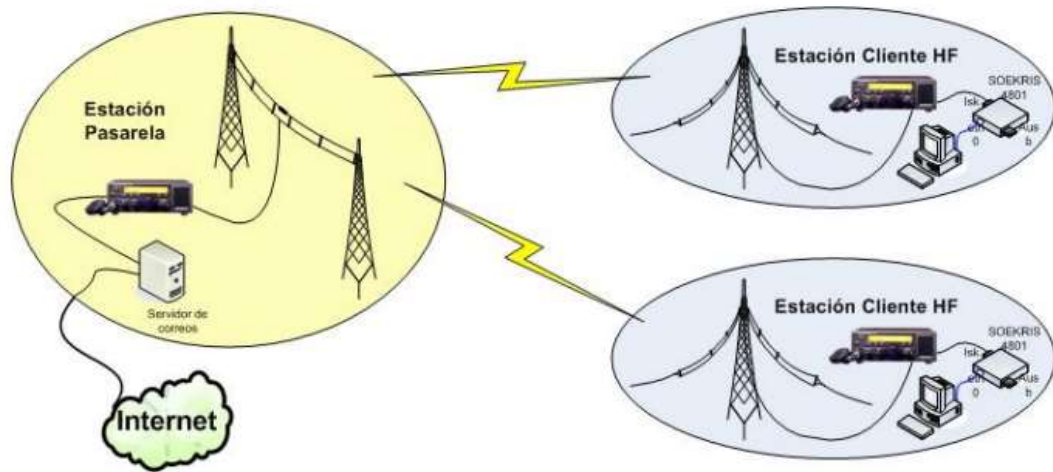


Figura 1.2 Esquema de Red HF

Fuente: (Araujo & otros, 2008) p.23

El canal HF tiene características (ruido, pequeño ancho de banda), que dificultan su empleo en la transmisión de datos y encarecen los módems para estos fines además de operar a velocidades muy bajas.

Desventajas:

- Inestabilidad de los enlaces dependientes de las condiciones de propagación.
- Consumo de energía ligeramente mayor que VHF y mucho mayor que WiFi.
- Velocidades de transmisión de datos baja.

1.2.3 Conexión satelital (VSAT)

Los sistemas VSAT son redes de comunicación de datos vía satélite para el intercambio de información punto-punto, o punto-multipunto. El componente principal de este sistema es el concentrador (*hub*) que constituye la estación central terrestre de la red. Las estaciones terminales son simples, baratas y fáciles de instalar. Las antenas usadas tienen un diámetro de entre 0.8 a 1.2 m y el consumo de energía es bajo. Con esta tecnología se consiguen diseñar redes muy densas con altas velocidades de transmisión si hay pocos usuarios conectados simultáneamente, y permite la transferencia de voz, datos y vídeo. El servicio es independiente de la distancia (Araujo & otros, 2008).

Desventajas

- La vitalidad del sistema depende de la disponibilidad del satélite.
- Es sensible a interferencias provenientes tanto de la tierra como del espacio.
- Los precios de los servicios son caros.

1.2.4 Tecnología WiFi

Esta tecnología tiene sus antecedentes en la creación del grupo de trabajo 802.11 del Comité de Estándares IEEE 802. WiFi es un nombre comercial desarrollado por un grupo llamado *Wi-Fi Alliance*. Dicha organización adopta, prueba y certifica los equipos que cumplen los estándares IEEE 802.11. El primer estándar que se estableció correspondió a las WLAN (*Wireless Local Area Network*) y la publicación de IEEE 802.11 en junio de 1997 (Sauter, 2006) (UIT, IEEE 802.11, 2010).

La familia de estándares IEEE 802.11 (802.11a, 802.11b, 802.11g, 802.11n), tiene asignadas las bandas ISM (*Industrial, Scientific and Medical*) 902-928 MHz, 2.400-2.4835 GHz, 5.725-5.850 GHz. Alcanza velocidades de entre 1 y 11 Mbps para 802.11b y hasta 54 Mbps para 802.11a/g. La versión 802.11n soporta una velocidad de transferencia máxima de 300 Mbps (80-100 Mbps estables).

Las tipologías habituales de operación de una red WiFi son iguales que las de una cableada. La diferencia es que WiFi utiliza el aire como medio de transmisión.

Los componentes básicos de una red WiFi son:

- El **punto de acceso (AP)**: es la unión entre las redes con cableado y la red WiFi, o entre diversas zonas cubiertas por redes WiFi, que actúa entonces como repetidor de la señal entre estas zonas (celdas).
- Unas o más **antenas** conectadas al punto de acceso: donde cada una de ellas presenta características geométricas que provocan que envíe la energía electromagnética en determinadas trayectorias del espacio. Las antenas omnidireccionales emiten en todas direcciones mientras que las antenas sectoriales u otros más direccionales todavía, como el caso de las parabólicas, disminuyen gradualmente la sección angular a la que envían. Al agrupar la energía transmitida (o receptada), es posible conseguir transmisiones entre antenas a

mayor alcance. Una antena omnidireccional, en cambio, ofrece una superficie de cobertura más extendida.

Establecer la clase y cantidad de antenas que debe emplearse para cubrir una zona es un trabajo que debe realizarse en cada caso específico en el diseño del proyecto, de acuerdo a la forma del terreno o ciudad y de la frecuencia con que se va a transmitir.

- Terminal **externo WiFi**: La tarjeta WiFi es de red LAN de acuerdo a la certificación WiFi y posibilita el enlace del terminal de usuario en redes 802.11. Hay diversas tarjetas para los sub- estándares (a, b o g) y también mixtas. Tales equipos externos pueden enlazarse a puertos PCI⁷ o PCMCIA⁸ o USB. Las principales diferencias entre este tipo de tarjetas y las *Ethernet* tradicionales son el encriptado de la información, el identificador de red WiFi (ESSID), el medio de transmisión y el arreglo de velocidad.
- **Antena de usuario** y terminal *pigtail*: La antena de usuario proporciona la cobertura necesaria a un usuario para ingresar a la red inalámbrica. El terminal *pigtail* es un cable que enlaza y ajusta la tarjeta inalámbrica y la antena del usuario. Hay que decir que el *pigtail* no es un componente estándar sino que es de acuerdo al fabricante. En ciertos casos la tarjeta Wi-Fi trae integrada la antena de usuario, como es el caso de las tarjetas para portátiles, PDA, etc., en este caso no se requiere una antena exterior.

1.2.4 Topología de una red WiFi

Toda red inalámbrica compleja está constituida por la combinación de uno más de los siguientes tipos de arquitectura:

- Punto a Punto
- Punto a Multipunto
- Multipunto a Multipunto

Cualquier tipo de red inalámbrica aunque no sea *WiFi*, estará constituida por la combinación de estas configuraciones básicas, es importante tener en cuenta estos bloques fundamentales cuando se analiza una red compleja.

⁷ *Peripheral Component Interconnect* (PCI, "Interconexión de Componentes Periféricos")

⁸ es el acrónimo de *Personal Computer Memory Card International Association*

A medida que la red crece en complejidad, se puede hacer más difícil de analizar. Pero si se reducen diferentes porciones de una red compleja a sólo una de estas tres topologías, se verá claramente cómo es el flujo de la información en la red.

Siempre se debe considerar que ninguna de estas topologías es la “mejor”. Cada una tiene sus ventajas e inconvenientes y deben ser aplicadas apropiadamente al problema que se desea resolver.

Enlace Punto a Punto

Las redes punto a punto son aquellas que responden a un tipo de arquitectura de red en las que cada canal de datos se usa para comunicar únicamente dos nodos.

En una red punto a punto, los dispositivos en red actúan como socios iguales, o pares entre sí. Cada dispositivo puede tomar el rol de esclavo o la función de maestro. En un momento, el dispositivo A, por ejemplo, puede hacer una petición de un mensaje/dato del dispositivo B, y este es el que le responde enviando el mensaje/dato al dispositivo A. El dispositivo A funciona como esclavo, mientras que B funciona como maestro. Un momento después los dispositivos A y B pueden revertir los roles: B, como esclavo, hace una solicitud al dispositivo A, y A, como maestro, responde a la solicitud de B. A y B permanecen en una relación recíproca o par entre ellos. (wndw, 2007)

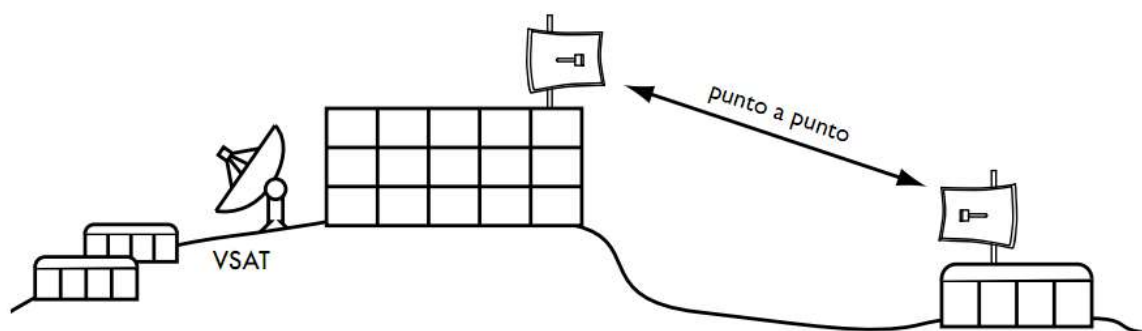


Figura 1.3 Ejemplo de enlace Punto a Punto

Fuente: (wndw, 2007)

Las redes punto a punto son relativamente fáciles de instalar y operar. A medida que las redes crecen, las relaciones punto a punto se vuelven más difíciles de coordinar y operar. Su eficiencia decrece rápidamente a medida que la cantidad de dispositivos en la red aumenta.

Los enlaces que interconectan los nodos de una red punto a punto se pueden clasificar en tres tipos según el sentido de las comunicaciones que transportan:

- **Simplex.**- La transacción sólo se efectúa en un solo sentido.
- **Half-dúplex.**- La transacción se realiza en ambos sentidos, pero de forma alternativa, es decir solo uno puede transmitir en un momento dado, no pudiendo transmitir los dos al mismo tiempo.
- **Full-Dúplex.**- La transacción se puede llevar a cabo en ambos sentidos simultáneamente.

Cuando la velocidad de los enlaces *Semi-dúplex* y *Dúplex* es la misma en ambos sentidos, se dice que es un enlace simétrico, en caso contrario se dice que es un enlace asimétrico

La conexión más simple es un enlace punto-a-punto. Estos enlaces pueden usarse para extender su red a grandes distancias. (Ver fig. 1.3)

Características:

- Se utiliza en redes locales LAN
- Los algoritmos de encaminamiento suelen ser complejos, y el control de errores se realiza en los nodos intermedios además de los extremos.
- Las estaciones reciben sólo los mensajes que entregan los nodos de la red. Estos previamente identifican a la estación receptora a partir de la dirección de destino del mensaje.
- La conexión entre los nodos se puede realizar con uno o varios sistemas de transmisión de diferente velocidad, trabajando en paralelo.
- Los retardos se deben al tránsito de los mensajes a través de los nodos intermedios.
- La conexión extremo a extremo se realiza a través de los nodos intermedios, por lo que depende de su fiabilidad.
- La seguridad es inherente a la propia estructura en malla de la red en la que cada nodo se conecta a dos o más nodos.
- Los costes del cableado dependen del número de enlaces entre las estaciones. Cada nodo tiene por lo menos dos interfaces.

Enlace Punto a Multipunto:

Cuando más de un nodo debe comunicarse con un punto central tenemos una red punto-a-multipunto.

Punto a multipunto ofrece varias rutas desde una única ubicación a varios lugares. Una conferencia puede ser considerada una comunicación punto a multipunto ya que existe

solo un orador (transmisor) y múltiples asistentes (receptor). Punto a multipunto es a menudo abreviado como P2MP, PTMP, o PMP.

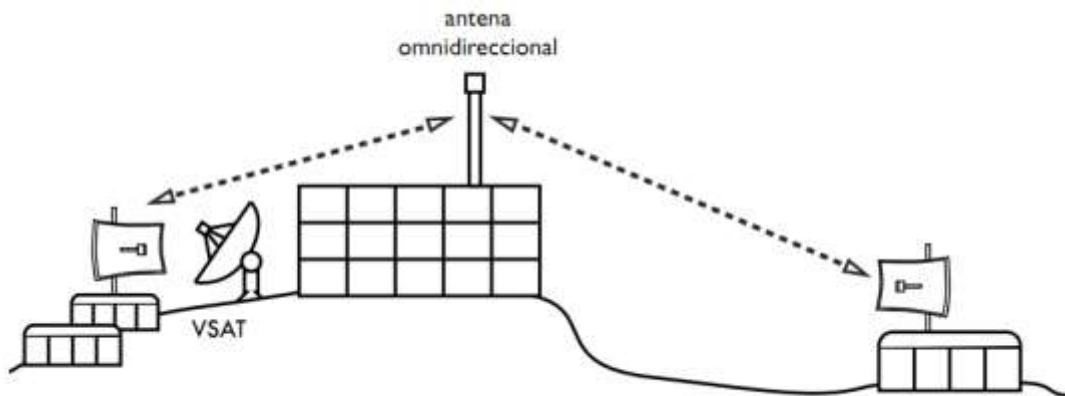


Figura 1.4 Enlace Punto Multipunto

Fuente: (wndw, 2007)

Tipos de conexiones punto a multipunto:

Existen diferentes tipos de conexiones punto a multipunto:

- **Estrella:** Un *host* conectado a varias terminales remotas.
- **Bus:** Un medio de comunicación común conectado a muchas estaciones remotas.
- **Anillo:** Todas las terminales conectadas a un mismo cable. Si una falla hay problemas con todas.
- **Malla:** Es el tipo de conexión utilizado en las centrales telefónicas. Todas las terminales interconectadas entre sí.

La red punto a multipunto es la topología más común. Considere el caso de un AP con muchos clientes. A menudo las redes punto a punto pueden evolucionar hacia redes punto a multipunto cuando se corre la voz de que es posible conectarse a la inalámbricamente. (Ver fig. 1.4)

El diseño de redes punto a multipunto es muy diferente del de las redes punto a punto. No se puede simplemente reemplazar una antena parabólica por una omnidireccional y esperar que eso sea todo. La transición de punto a punto a punto multipunto aumenta la complejidad porque ahora se tienen múltiples nodos que compiten por los recursos de la red. El resultado neto es que el caudal total disminuye. (Sauter, 2006)

Multipunto a Multipunto

Cuando cada nodo de una red puede comunicarse con cualquier otro tenemos una red multipunto a multipunto, también conocida como red en malla (*mesh*) o ad-hoc. (Ver fig. 1.5)

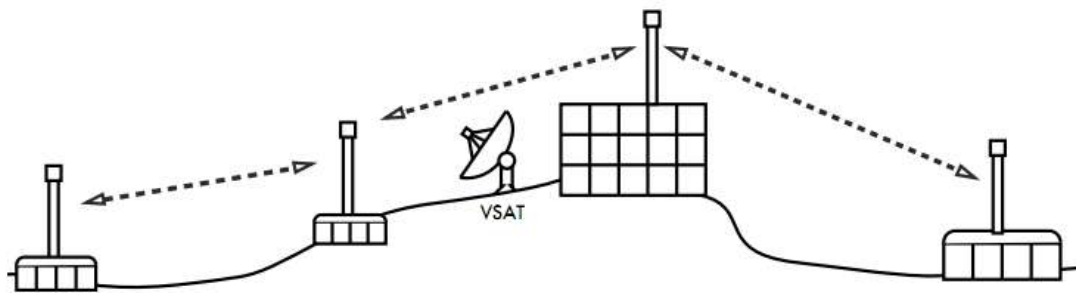


Figura 1.5 Red multipunto a multipunto

Fuente: (wndw, 2007)

Las redes Multipunto a Multipunto son considerablemente más complejas, pero también mucho más flexibles que las redes punto a multipunto. No hay una autoridad central en una red en malla. El protocolo de malla automáticamente añade nuevos nodos a la medida que se incorporan a la red, sin necesidad de cambiar la configuración de ninguno de los nodos existentes.

Las redes en malla pueden ser difíciles de configurar comparadas con las redes “punto a punto” y “punto a multipunto”. Una dificultad obvia es la escogencia del canal a ser usado en la red, puesto que cada nodo comunica con todos los demás, sólo se puede usar un canal en una malla dada. Esto reduce significativamente el caudal máximo posible.

1.2.4.1 Estrategias para el enrutamiento del tráfico de red

Wi-Fi cuando ofrece una conexión local, no provee la funcionalidad de enrutamiento (encaminamiento, ruteo), la cual es suministrada por los protocolos de las capas superiores.

Las redes complejas usan algún tipo de protocolo de enrutamiento para retransmitir el tráfico entre nodos, en cambio *Wi-Fi* provee únicamente un enlace local (entre nodos de la misma subred), hasta el nivel dos de la pila de protocolos TCP/IP. (Ver fig. 1.6)

Pila de protocolos TCP/IP	
5	Aplicación
4	Transporte
3	Internet
2	Enlace de datos
1	Física

Figura 1. 6 Estructura del protocolo TCP/IP

Elaborada por el autor

1.2.5 Tecnología WiMAX

Como parte del proceso de hacer de Internet un servicio al alcance de todos “en cualquier lugar, en cualquier momento” (UIT, Birth of broadband, Resumen, 2003) (Intel, 2003) , el IEEE formó un grupo de trabajo que llamó IEEE 802.16 para estandarizar el funcionamiento de las redes de banda ancha en las áreas metropolitanas (MAN). El grupo introdujo una serie de normas para acceso de Internet de banda ancha fijo y móvil conocido por el nombre "WiMAX" (*the Worldwide Interoperability for Microwave Access Forum*) con la misión de promover el despliegue de las redes de acceso inalámbrico de banda ancha basadas en el estándar IEEE 802.16 que certifica la interoperatividad de productos y tecnologías.

Se presenta a continuación una comparación de las dos principales tecnologías inalámbricas de banda ancha que por sus características se destacan de las restantes para su posible empleo en entornos rurales.

Una de las diferencias fundamentales es que WiFi y WiMAX están diseñadas para ambientes diferentes. Wi-Fi es una tecnología inalámbrica diseñada para redes de área local (LAN) como alternativa al cableado estructurado y soporta rangos de transmisión de hasta unos cientos de metros.

WiMAX, está diseñado para proporcionar un acceso inalámbrico metropolitano, MAN (*Metropolitan Area Network*), de banda ancha de acceso a Internet para competir con los

módems de cable y xDSL⁹, como tecnología de “última milla” y puede alcanzar distancias de hasta 50 Km.

Los rangos de frecuencia de operación de WiFi se limitan a las bandas no licenciadas de 2,4 GHz y 2,5 GHz. Por su parte WiMAX en la versión original del 2001 operaba en frecuencias de 11 GHz a 66 GHz que exige línea de vista (LOS: *Line of Sight*) entre las antenas. En el estándar 802.16a y posteriores el sistema soporta frecuencias más bajas (de 2 GHz a 11 GHz) y elimina la dependencia de visibilidad directa entre las antenas de la EB (Estación Base) y la ET (Estación Terminal o Subscriptora). Puede además trabajar en las bandas licenciadas y no licenciadas de los 2.4 GHz, 3.5 GHz y 5 GHz.

Las redes WiFi como tecnología *Ethernet*¹⁰ inalámbrica, presenta las mismas deficiencias que se encuentran en las redes *Ethernet* tradicionales (Forado, 2008). Ha sido utilizada para enlaces a larga distancia con el empleo de antenas exteriores de alta ganancia y amplificadores adecuados en entornos rurales. Presenta problemas de congestión del tráfico provocado por el "nodo oculto". Emplea el sistema de contención TDD (*Time Division Duplexing*) donde las estaciones compiten por el uso del mismo canal (Finneran, 2004).

IEEE 802.11b utiliza técnicas de modulación DSSS (Espectro Ensanchado por Secuencia Directa o *sequence spread spectrum, en inglés*), y con el empleo de OFDM (Multiplexación por División de Frecuencias Ortogonales, en inglés *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) se alcanza un mejor aprovechamiento del espectro y del ancho de banda disponible. Por su parte WiMAX define tres opciones principales para la modulación: Canal de portadora simple.

Los protocolos de seguridad empleados por WiFi son WEP (*Wired Equivalent Privacy*) y AES (*Advanced Encryption Standard*). La seguridad en WiMAX soporta dos estándares de encriptación de calidad, DES3 (*Data Encryption Standard triple*) y AES, que es considerado tecnología de vanguardia. El empleo de los protocolos PKM (*Privacy Key Management*) y EAP (*Extensible Authentication Protocol*) y certificados digitales X.509 le confieren a WiMAX funcionalidades de seguridad superiores a las ofrecidas por WiFi (Forado, 2008).

9

¹⁰ El nombre viene del concepto físico de *ether*. *Ethernet* define las características de cableado y señalización de nivel físico y los formatos de tramas de datos del nivel de enlace de datos del modelo OSI (modelo de interconexión de sistemas abiertos)

En correspondencia con lo anterior se considera que WiMAX posee un grupo de características que supera las limitaciones que presenta WiFi. Entre ellas se encuentran: distancias de cobertura para las que fueron concebidas, empleo de bandas de frecuencias licenciadas que le permiten funcionar en entornos menos expuestos a las interferencias. También resuelve los problemas de congestión en la red y de “nodo oculto” en enlaces de decenas de kilómetros, mayores velocidades de transferencia, robustez frente a los efectos de las interferencias y las multitrayectorias que le permite desempeñarse en ambientes NLOS (*Non Line of Sight*). Los mecanismos de seguridad en WiMAX le confieren mayores niveles de confiabilidad, autenticación y privacidad así como el empleo de sistemas de antenas MIMO y diversidad espacial.

Se exponen a continuación los principales estándares de la familia IEEE 802.16.

1.2.5.1 Descripción de los Estándares de IEEE 802.16

El IEEE ha desarrollado una serie de estándares IEEE 802.16 que definen las especificaciones de una red inalámbrica de área metropolitana WMAN (*Wireless Metropolitan Area Network*). Los mismos proveen acceso inalámbrico de última milla con un desempeño comparable al que actualmente ofrecen los servicios tradicionales de cable xDSL (*Línea de Suscriptor Digital*).

– IEEE 802.16

El estándar que especifica la interfaz inalámbrica para las capas PHY (Capa Física) y MAC (*Media Access Control*) en los sistemas fijos BWA (*Broadband Wireless Access*) en la banda de frecuencias comprendidas entre 10 GHz y 66 GHz fue publicado en el 2002 como IEEE 802.16 Wireless Man TM. En esta banda la disponibilidad del espectro es muy amplia en todo el mundo (canalizaciones típicas de 25 MHz en los EEUU y 28 MHz en Europa) y se logran enlaces de alta velocidad (hasta 134,4 Mbps en un canal de 28 MHz pero de corto alcance (2-5 km), que requiere de línea de vista (LOS). Los sistemas se enfocan hacia el mercado empresarial (Intel, 2003).

– IEEE 802.16a

La actualización de IEEE 802.16a, completada en enero del 2003, consideró el rango del espectro de frecuencia de 2 a 11 GHz. Utiliza rangos de frecuencia tanto licenciados como no licenciados, además incorpora la capacidad de no línea de vista *NLOS*. Esta versión da mayores capacidades a la capa MAC. Soporta protocolos como Ethernet,

ATM (*Asynchronous Transfer Mode*) e IP (*Internet Protocol*). Este estándar es para conexiones fijas de última milla punto a punto y punto multipunto. Agregó Multiplexado por División de Frecuencias Ortogonales (OFDM) en la capa PHY y también utiliza el Acceso Múltiple por División de Frecuencias Ortogonales (OFDMA) en la capa de MAC (UIT-T, 2006) (Calero, 2009).

- IEEE 802.16c

Fundamentalmente para la banda de 10 a 66 GHz. Define qué características podrían ser obligatorias u opcionales a los fabricantes que deben considerar para asegurar la interoperabilidad (IEEE, 2006).

- IEEE 802.16 – 2004 (d)

Engloba y sustituye a los antiguos estándares IEEE 802.16-2001, IEEE 802.16a e IEEE 802.16c. El estándar es una tecnología de acceso inalámbrico fijo. Está diseñada para competir con los proveedores de cable de banda ancha *xDSL* y para proveer un acceso básico de voz y banda ancha en áreas donde no existe ninguna otra tecnología de acceso. Es también una solución viable para el *backhaul* inalámbrico (segmento de red que provee la interconectividad entre el acceso y el núcleo de la red), en puntos de acceso WiFi o como una opción de reemplazo de E1 (Flujo de datos de 2.048 Mbps, norma ETSI) o T1 (Flujo de datos de 1.544 Mbps, norma ANSI) para abonados corporativos de alto valor. Empleada con éxito en soluciones de redes inalámbricas en entornos rurales o de difícil acceso y como soporte de sistemas de vigilancia en zonas volcánicas debido a su posibilidad de implementar enlaces de decenas de kilómetros y la robustez frente a las interferencias, multitrayectorias y al empleo de novedosas técnicas de multiplexación (IEEE, 2006).

El estándar realiza cambios en la parte OFDM. Entre sus características se destaca que son enlaces fijos y nómadas punto – multipunto, permite enlaces en ambientes NLOS hasta 6 Km y en LOS el alcance máximo de hasta 50 Km, con tasa de transferencia máxima de 75 Mbps. Opera en el espectro de frecuencias 2 - 66 GHz.

- IEEE 802.16e

IEEE 802.16e conserva las técnicas actualizadas en el WiMAX fijo, a las cuales se agrega un soporte robusto para una banda ancha móvil. Requiere una nueva solución de hardware/software ya que no es compatible con el anterior IEEE 802.16-2004 (IEEE,

2006). Las características del estándar son: adiciona movilidad al IEEE 802.16, opera en banda de frecuencia de 2 a 10 GHz , no requiere línea de vista con OFDM hasta 5 Km, empleo de antenas MIMO, permite *Hand-off* y alcanza velocidades de hasta 15 Mbps.

El ambiente típico en el que se desarrolla esta tecnología se muestra en el Anexo 1

1.2.5.2 Características generales de WiMAX. Multiplexación con OFDM en WiMAX

OFDM es una técnica de modulación multiportadora y a la vez constituye un avanzado método para el multiplexado de señales. Con el empleo de OFDM se logra mitigar los problemas asociados a la multitrayectoria, la interferencia intersímbolo y el retardo de esparcimiento de la señal que se presentan en estas condiciones (López, 2006).

OFDM consiste en modular varios tonos o portadoras generados de forma ortogonal, esto significa que las frecuencias en que se divide la portadora son independientes matemáticamente, de forma tal que los máximos de una coinciden con los nulos de la otra, para garantizar que no ocurra interferencia entre ellas. Con el empleo de OFDM se alcanza un mejor aprovechamiento del espectro y del ancho de banda disponible. A medida que se incrementa la cantidad de subportadoras, el período de duración de la señal OFDM (símbolo) se incrementa y la hace más resistente a los problemas asociados con la multitrayectoria (López, 2006).

1.2.5.3 Estructura OFDMA

El Acceso Múltiple por División de Frecuencias Ortogonales (OFDMA) es una técnica aún más novedosa. Consiste en agrupar varias subportadoras OFDM para formar un subcanal de tráfico que puede ser asignado de forma exclusiva en cualquier instante a un usuario determinado, (Figuras 1.7 y 1.8).

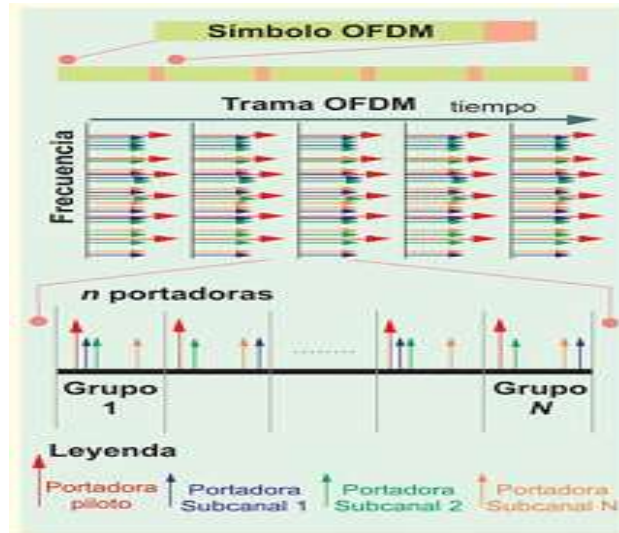


Figura 1.7: Esquema de subcanalización en OFDMA.

Fuente: (López, 2006)

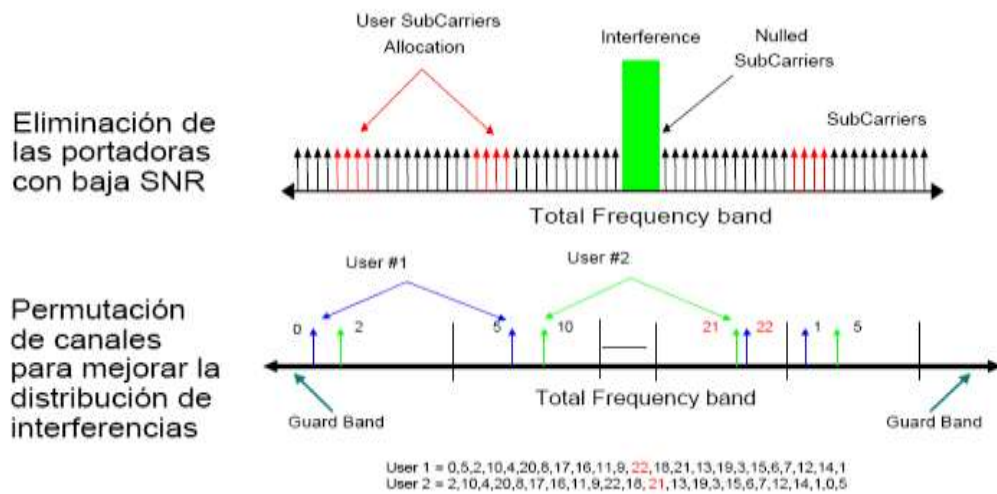


Figura 1.8: Asignación de subportadoras menos vulnerables para combatir las interferencias en OFDMA

Fuente: (Fonseca, 2008)

La sub-canalización posibilita que varios usuarios usen el canal de forma simultánea. Permite colocar las portadoras en la posición adecuada para evadir el desvanecimiento presente a determinadas frecuencias. A cada usuario se le asignan las subportadoras menos vulnerables según las condiciones de radio propagación.

Los sistemas OFDMA están basados en la cantidad variable de subportadoras, según el ancho de banda del canal. Un grupo de portadoras forman subcanales. Existen tres tipos de subportadoras; nulas (*null subcarrier*), pilotos (*pilots subcarriers*) y de datos (*data subcarriers*) (López, 2006).

La distribución de portadoras (permutaciones) se puede hacer de varias maneras. Las más usadas son llamadas *Diversity permutation PUSC*, (*Partially Used Subchannel*) y *AMC* (*Automatic Modulation and Coding*). Ambas permutaciones distribuyen las portadoras de diferentes maneras, las cuales se muestran en las Tablas 1.1 y 1.2. Las diferentes permutaciones están diseñadas para acomodar el sistema a las diferentes condiciones del servicio, entonces se puede dar mayor robustez al sistema en detrimento de la capacidad o viceversa.

Así mismo *PUSC* emplea mayor cantidad de portadoras para el enlace de bajada que el de subida, que caracteriza la asimetría en la transferencia de datos. Por otra parte, *AMC* (Tabla 1.2) fue orientado para enlaces fijos, los cuales son de mejor calidad en comparación con los enlaces móviles.

Tabla 1.1: Distribución de las portadoras según ancho de banda del canal con la permutación PUSC.

Fuente: (Horak, 2008)

PUSC	1,25 MHz		5 Mhz		7 Mhz		8,75 Mhz		10Mhz		20Mhz	
	DL	UL	DL	UL	DL	UL	DL	UL	DL	UL	DL	UL
NULL SUB-CARRIERS	44	32	92	104	184	184	184	184	184	184	368	368
PILOTS SUB-CARRIERS	12	32	60	136	120	120	120	280	120	280	240	560
DATA SUB-CARRIERS	72	64	360	272	720	560	720	560	720	560	1440	1120
TOTAL SUB-CARRIERS	128	128	512	512	1024	1024	1024	1024	1024	1024	2048	2048
NUMERO DE SUBCANALES	3	4	15	17	30	35	30	35	30	35	60	70

Tabla 1.2: Distribución de las portadoras según ancho de banda del canal con la permutación AMC.

Fuente: (Horak, 2008)

PUSC	1,25 MHz		5 Mhz		7 Mhz		8,75 Mhz		10Mhz		20Mhz	
	DL	UL	DL	UL	DL	UL	DL	UL	DL	UL	DL	UL
NULL SUB-CARRIERS	44	32	92	104	184	184	184	184	184	184	368	368
PILOTS SUB-CARRIERS	12	32	60	136	120	120	120	280	120	280	240	560
DATA SUB-CARRIERS	72	64	360	272	720	560	720	560	720	560	1440	1120
TOTAL SUB-CARRIERS	128	128	512	512	1024	1024	1024	1024	1024	1024	2048	2048
NUMERO DE SUBCANALES	3	4	15	17	30	35	30	35	30	35	60	70

El estándar 802.16e se basa en el Acceso Múltiple por División de Frecuencias Ortogonales Escalables (SOFDMA, *Orthogonal Frequency Division Multiplex Acces*).

Este método consiste en asignar, de forma dinámica, el número de subcanales requerido para cada usuario y hace más flexible el sistema.

- Bandas de Frecuencia

Los gobiernos de todos los países han establecido regulaciones para el empleo del espectro radioeléctrico e imponen control en los requisitos de potencia para disminuir el potencial de interferencia. WiMAX puede desplegarse en un amplio rango de frecuencias (licenciadas o no) entre los 2 GHz y 11 GHz, (Tabla 1.3).

Tabla 1.3: Bandas de frecuencias para WiMAX.

Fuente: (IEEE, 2006)

Area Geográfica	Bandas de frecuencia licenciadas	Bandas de frecuencia sin licencia
América del Norte	2.3 y 2.5 Ghz	5.8 Ghz
América Central y Suramérica	2.3 y 3.5 Ghz	5.8 Ghz
Europa	3.5 Ghz	5.8 Ghz
Asia	3.5 Ghz	5.8 Ghz
Medio Oriente y Africa	3.5 Ghz	5.8 Ghz

1.2.5.4 Área de cobertura de WiMAX

WiMAX es un sistema de alta tasa de transmisión de datos y alcance hasta 50 Km. Es escalable toda vez que es posible añadir nuevos canales/usuarios. El ancho de banda asignado a cada uno es flexible. Incorpora antenas sectoriales tradicionales o antenas adaptativas que permiten modificar el diagrama direccional en función del alcance y el empleo de variadas técnicas de modulación, tales como BPSK (*Binary Phase Shift Keying*), QPSK (*Cuadratura Phase Shift Keying*), 16-QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*) y 64-QAM (UIT-T, 2006), (Tabla 1.4).

Tabla 1.4: Cobertura de WiMAX según el entorno.

Fuente: (Fonseca, 2008)

Entorno	Tamaño celda	Rendimiento
Urbanos en interiores(NLOS)	1 Km	1 Km. 21 Mbps con canales 10MHz
Suburbanos en interior(NLOS)	2.5 Km	22 Mbps con canales 10 MHz
Suburbanos en exteriores (NLOS)	7 Km	22 Mbps con canales 10 MHz
Rurales en interiores (NLOS)	5 Km	4.5 Mbps con canales 3.5 MHz
Rurales en exteriores (LOS)	15 Km	4.5 Mbps con canales 3.5 MHz

- Subcapa de Convergencia de MAC (CS)

La capa de MAC puede transportar diferentes tipos de protocolos entre ellos: ATM (*Asynchronous Transfer Mode*), IP (*Internet Protocol*) y Ethernet. La parte común de la capa de MAC es independiente del tipo de protocolo a transportar, como resultado de la adición de una nueva subcapa de convergencia no requiere un cambio en el núcleo de MAC (IEEE, 2006).

- Seguridad

La seguridad en WiMAX soporta dos estándares dentro de los mecanismos de cifrado de datos de alta calidad: AES y DES (*Estándar de Encriptación de Datos*) (IEEE, 2006). El estándar de encriptación 3DES (*Estándar de Encriptación de Datos Triple*) es una variante que proporciona seguridad al ejecutar el algoritmo del DES, tiene el efecto de hacer el cifrado mucho más difícil a la fuerza bruta. Se puede todavía considerar un algoritmo seguro de cifrado. Se emplea además la autenticación final a final con los protocolos PKM (*Privacy Key Management*) y EAP (*Protocolo de Autenticación Extensible*). Básicamente, todo el tráfico en redes WiMAX debe ser encriptado por el CCMP (*Counter Mode con Cipher Block Chaining Message Authentication Code Protocol*) que utilizan

AES para transmisiones seguras y autenticación de la integración de datos. El suministro de servicios del sistema emplea certificados digitales X.509 para que la estación base autorice al usuario final.

1.2.5.5 Soporte de Calidad de servicio (QoS)

Los mecanismos de control de *QoS* posibilitan la asignación de ancho de banda a los equipos terminales en función de las necesidades de los abonados. La capa de enlace está designada para soportar múltiples tipos de aplicaciones y usuarios con conexión para múltiples aplicaciones como servicios de voz y multimedia. El sistema proporciona los siguientes niveles de calidad de servicio, para flujos de tráfico constante, variable, en tiempo real y con el mejor esfuerzo (IEEE, 2006) (Calero, 2009).

- Servicio garantizado no solicitado. (*Unsolicited Grant Service, UGS*). Para flujos en tiempo real que generan paquetes de datos de duración fija como VoIP (*Voice over IP*).
- Servicio con sondeo en tiempo real. (*Real-Time Polling Service, rtPS*). Para flujos en tiempo real que generan paquetes de datos de duración variable tales como video MPEG (*Motion Picture Experts Group*).
- Servicio con sondeo en tiempo diferido. (*Non-Real Time Polling Service, nrtPS*). Diseñado para el soporte de conexiones que no presentan requisitos de tiempo real que generan datos de duración variable como el acceso a Internet con velocidad mínima garantizada y conexiones ATM.
- Servicio mejor esfuerzo (*Best Effort, BE*). No provee garantías de retardo, rendimiento, no reserva ancho de banda, asigna según tasas disponibles y no da prioridad. El acceso a Internet es un ejemplo típico de este tipo de servicio.
- Servicio con sondeo en tiempo real extendido. (*Extended Real-Time Polling Service (ertPS)*). Para aplicaciones de tiempo real que generan datos de longitud variable como VoIP con eliminación de períodos de silencio.

1.2.5.6 Capa Física de WiMAX

Entre las características de la capa física que le confieren robustez a WiMAX para el trabajo en ambiente de banda ancha flexible se encuentran: perfil de ráfaga adaptativo,

corrección de errores predictivos (*FEC, Forward Error Correction*) con codificación convolucional y codificación Reed-Solomon. Incorpora un sistema avanzado de antenas (*AAS, Advanced Antenna Sistem*) para mejorar la relación rango/capacidad. Presenta selección dinámica de frecuencia (*DFS, Dinamic Frequency Selection*) para minimizar la interferencia. Opera mediante la codificación espacio-tiempo (*STC, Space Time Coding*) que reduce los efectos del desvanecimiento con el empleo de diversidad espacial. Presenta sistemas de transmisión/recepción de símbolos OFDM, mediante los métodos de duplexación *FDD (Frequency Division Duplexing)* y *TDD (Time Divission Duplexing)* (Fonseca, Acceso inalámbrico de banda ancha, propuesta para Cuba, 2008) (Intel, 2003).

- **Modulación Adaptativa**

WiMAX proporciona varios esquemas de modulación y codificación por predicción de errores (*FEC, Forward Error Correction*) en función de las condiciones del canal. El algoritmo de adaptación optimiza la velocidad de transmisión y el rendimiento de error y selecciona la técnica de modulación más robusta, aunque menos eficiente (en la velocidad de transmisión) en condiciones adversas. La OFDM del estándar define nueve sistemas de modulaciones que usan BPSK, QPSK 16, QPSK 64 y los diferentes niveles de rendimiento de ancho de banda del canal (López, 2006).

- **Eficiencia en WiMAX**

En WiMAX, la combinación de la modulación y los esquemas de codificación de la eficiencia de ancho de banda brindan rendimientos de hasta 5 bits/Hz para entregar una tasa de transmisión de 100 Mbps en un canal de radio de 20 MHz (en condiciones reales puede ser 3,5 bits / Hz o 70 Mbps en 20 MHz).

Ventajas y limitaciones de WiMAX para su empleo en entornos rurales

WiMAX representa una solución para conexiones en áreas rurales, donde ésta tecnología presenta características que hacen que el sistema sea de interés debido a los siguientes aspectos:

- Su rango normal de operación se encuentra entre los 7 y los 10 Km, pero puede llegar hasta 50 Km sin modificaciones. Ello permite su empleo en entornos rurales o aislados con enlaces de largas distancias.
- Emplea Multiplexado por División de Frecuencias Ortogonales (OFDM) que mitiga los problemas asociados a la multitrayectoria, las interferencias

intersímbolos y el retardo de esparcimiento de señal propios de estas condiciones dada la presencia de obstáculos como montañas, bosques, etc.

- Soporta mecanismos de antenas inteligentes que mejoran la eficiencia espectral en sistemas inalámbricos. Emplea diversidad de antenas, aspecto importante para reforzar los niveles de señal en enlaces largos o en ambientes NLOS típicos de entornos rurales con una topografía accidentada.
- Soporta redes punto - multipunto y configuraciones mallas útiles en redes extensas que deben cubrir cientos de kilómetros cuadrados.
- El sistema WiMAX presenta técnicas de modulación adaptativa que dependen de las condiciones de SNR (relación señal a ruido). Estas técnicas disminuyen los efectos negativos asociados a los eventos climáticos que pueden ser extremos (lluvia, granizo, niebla) en entornos rurales y pueden afectar significativamente la estabilidad del funcionamiento del enlace de radio.
- Técnicas como *FEC (Forward Error Correction)*, codificación convolutiva, y otros algoritmos son usados para poder detectar y corregir errores, tal que ayude a mejorar SNR y se incorpora el *ARQ (Automatic Repeat Request)*, para solucionar los errores que no puede solucionar la *FEC*.
- Algoritmos de control de potencia son implementados en las estaciones base de tal manera, que regula los niveles de potencia en las Estaciones Terminales de Usuario (*CPE Customer Premise Equipment*). De tal forma la potencia recibida en la estación base es predeterminada que logra un ahorro en la potencia consumida en los CPE.
- Despliegue rápido.
- Bajo costo de las infraestructuras comparadas con los gastos para implementación de redes cableadas.
- Consumo de potencia relativamente bajo (en el equipamiento más reciente), por debajo de los 500 W.

1.2.5.6 Limitaciones de WiMAX

- Es difícil asegurar el servicio a todos los usuarios. Suelen quedar puntos con mala cobertura, normalmente se aspira a tener una cobertura del 80-90%.
- Los costos de las instalaciones están fuera del alcance de muchas comunidades rurales.

- Los costos de operación y mantenimiento pueden ser elevados en situaciones que exijan la presencia del personal especializado.
- La explotación en bandas de frecuencias no licenciadas incrementa la posibilidad de interferencias.
- Mayor exposición al impacto de factores climáticos extremos.

1.2.6 Antecedentes del empleo de WiMAX en entornos rurales

La literatura consultada recoge una amplia variedad de ejemplos sobre el uso efectivo en zonas rurales con el fin de dar conectividad en aquellos lugares donde es deficiente o no existen redes de cobre u otras alternativas. Asia, Medio Oriente, Europa y Latinoamérica son los principales escenarios de despliegue de esta tecnología.

Se ha expandido el empleo de la infraestructura de red de WiMAX (IEEE 802.16 d, IEEE 802.16 e), en China y Rusia, para dar cobertura de acceso de banda ancha en zonas remotas y dispersas en las bandas de de 2,5 GHz, 2,7 GHz y 3,5 GHz que asegura servicios de conectividad a Internet, multimedia, VoIP (Estrada & Camacho, 2009) (Zhenzhen & Zhonglin, 2008)

En zonas rurales y aisladas de Estados Unidos (Montañas Rocosas) y Canadá, se han buscado soluciones de conectividad en integración con otras tecnologías, (WiFi y Satélite) para ampliar el paquete de ofertas de los operadores (Congling, 2008).

España se destaca en la implementación de WiMAX en zonas rurales de municipios del interior del país bajo el proyecto Banda Ancha Rural (BAR) para asegurar comunicaciones VoIP y datos de la red municipal, así como conexión a Internet (Caroline, 2010).

Con motivo de la celebración de la Copa Mundial de fútbol en Sur África, Huawei apoyó la estrategia para resolver el problema del acceso de banda ancha en ciudades y en extensas regiones rurales con baja densidad poblacional (Belmonte, 2008).

En Arabia Saudita se han desplegado soluciones de redes inalámbricas con tecnología WiMAX desde el 2007 en más de 15 ciudades y en zonas rurales sin infraestructura de pares de cobre, con servicios de VPN (*Virtual Private Network*). Allí se asegura calidad de servicio (*QoS*) para suscriptores empresariales y domésticos (Huawey, 2010).

Como resultado del estudio de la tecnología WiMAX se destaca que dadas sus ventajosas características como: soportar enlaces de largas distancias, robustez frente a las interferencias y multitrayectorias, garantizar calidad de servicio, empleo de novedosas técnicas de multiplexación y modulación adaptativas, etc, resulta de un especial interés para soluciones inalámbricas de banda ancha en entornos rurales.

1.2.7 Estado del arte en la planeación y diseño de redes de acceso inalámbricas

La planeación permite fijar las diferentes posibilidades y establece las maneras a utilizar y su continuidad de acción, en el tiempo y energía necesaria para garantizar las metas establecidas (Fonseca, Cuba y los sistemas BWA. Conferencia del Curso de Redes Inalámbricas de Acceso de Banda Ancha WiFi y WiMAX, 2008).

Al aplicar las definiciones anteriores al planeamiento de redes y/o servicios de telecomunicación, el resultado es un proceso fundamental que debe ser completado antes del establecimiento de dicha red/servicio, para asegurar que todos sus requerimientos, condiciones y prestaciones cumplan con todas las expectativas previstas por el operador y esperadas por el cliente (Fonseca, Cuba y los sistemas BWA. Conferencia del Curso de Redes Inalámbricas de Acceso de Banda Ancha WiFi y WiMAX, 2008) (García, 2009) (Vilkkki, 2010).

En general se reconocen tres fases en el proceso de planeamiento: 1-Diseño topológico, 2-Síntesis de la Red y 3-Realización de la red. En el trabajo de Vilkkki (Vilkkki, 2010) se presenta un esquema útil para la comprensión de la complejidad y el alcance de la planeación de una red de telecomunicaciones. En la Figura 1.11 se reproduce dicho modelo adaptado al contexto de una red WiMAX. Conforme al autor la red planeada es resultado de la integración de varios campos entre los que se encuentran, la predicción de la demanda de tráfico y negociar con el usuario el nivel de servicio hasta obtener un diseño de la red (resultante del estudio de su topología física y lógica). Este modelo de red se simula con el fin de examinar su comportamiento. A continuación se trabaja en el balance y optimización del tráfico en la red diseñada con vistas a satisfacer los requerimientos de capacidad y servicios previamente formulados por el usuario. La planeación concluye con la definición de los aspectos de gestión y mantenimiento de la red WiMAX.

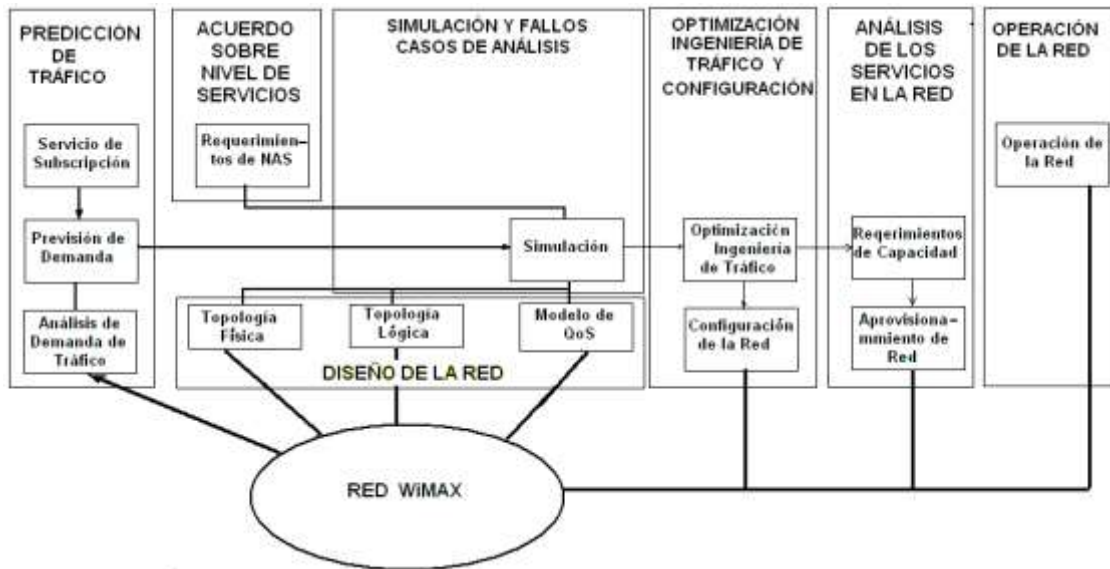


Figura 1.9 Etapas de planeamiento de la una red WiMAX

Fuente: (García, 2009)

La comunidad científica del tema (Vilkki, 2010) (Araujo & otros, 2008) (Gütter, 2010) aborda esquemas de diseño similares al señalado, no obstante al énfasis que realicen en uno u otro aspecto del mismo. En (Gütter, 2010) se concibe el proceso de construcción de redes WiMAX en dos etapas: Diseño de la Red y Planeamiento de la Red. En la primera incluye la determinación de la topología, el tipo de enlace y en qué ambiente será realizado, la determinación de las relaciones entre *BER* (*Bit Error Rate*) y la tasa de transmisión (*Throughput*), la selección de la banda de frecuencia de trabajo entre otros. En la etapa de planeamiento calcula la zona de Fresnel y el presupuesto de enlace, selección del equipamiento y sus principales parámetros con consideraciones para la ubicación de las estaciones base, antenas y su conectividad al núcleo de la red, así como el estudio de los sitios de instalación. No se incluyen otros aspectos de interés para el diseño y carece de un esquema general e integral que guíe la labor de realización de todo el proyecto.

Motorola (Ohrtman, 2005) por su parte presenta una propuesta de diseño más general que estructura en varias etapas:

- 1- Realiza un acercamiento al estado actual del equipamiento precedente, el entorno de despliegue y sus características.
- 2- Revisión de los requerimientos de la red en el futuro y su escalabilidad de servicios y aplicaciones.

- 3- Plantea los requerimientos de seguridad.
- 4- Define la magnitud del despliegue y exigencias de cobertura.
- 5- Determina las especificaciones del diseño.
- 6- Estudia las características de los sitios de instalación, recomienda aplicaciones, equipamiento y realiza simulaciones. Esta variante de diseño provee un detallado proceso pero referido a tecnología Motorola.

En general los autores (Gütter, 2010) (Fonseca, Acceso inalámbrico de banda ancha, propuesta para Cuba, 2008) (Fonseca, Cuba y los sistemas BWA. Conferencia del Curso de Redes Inalámbricas de Acceso de Banda Ancha WiFi y WiMAX, 2008) (Ohrtman, 2005) (Motorola, 2008) (López F. , 2009) se enfocan en el diseño del sistema de radiocomunicaciones, sin embargo no centran la atención en otros aspectos de importancia como son: alimentación eléctrica, seguridad física, infraestructura y protección.

Un referente de interés en el diseño de redes inalámbricas en ambientes rurales corresponde a los criterios aportados en la obra de Gerson y colaboradores (Araujo & otros, 2008). En la presente investigación se adopta la propuesta de diseño del referido colectivo de autores (Araujo & otros, 2008) a partir de los siguientes criterios:

- Aporta probada experiencia del Diseño y Planeamiento en entornos rurales en países en desarrollo donde se requieren redes inalámbricas que satisfagan requerimientos como: diseño de soluciones tecnológicas robustas y sencillas de usar, de poco o ningún mantenimiento de técnicos especializados, de bajo consumo energético, y bajos costos de despliegue y operación.
- Profunda sistematización e integralidad de las etapas que conforman el proceso de diseño y planeamiento al subdividirlo en los siguientes subsistemas:

1. Subsistema de Telecomunicaciones.

Abarca desde la selección del equipamiento, el modelo de radio propagación, hasta la simulación de las condiciones del entorno en el que se implementará el enlace de radio y caracterizar su viabilidad.

2. Subsistema de Energía.

El diseño del mismo ofrece las soluciones de alimentación y autonomía energética del sistema de comunicaciones.

3. Subsistema de Protección.

La seguridad, comodidad de instalación, robustez y supervivencia del equipamiento ante condiciones meteorológicas adversas, se obtienen como resultado de un correcto diseño de este subsistema.

4. Subsistema de Infraestructura.

Se encarga de la selección de las condiciones, (especificaciones de montaje) y accesorios de instalación tales como torres, herrajes, pararrayos.

1.2.8 Los programas informáticos como herramientas en el diseño de redes de acceso inalámbrico

En el proceso de diseño los programas informáticos sirven de importante herramienta como modelos para la simulación del funcionamiento de un radio enlace. En la diversidad de aplicaciones informáticas existentes se reportan (Rodrigues, Velez, & Sebastiao, 2006):

Pathloss: Este programa es una herramienta para el diseño de enlaces de radio, que operan en un rango de frecuencia de 30 MHz a 100 GHz. El formato de los módulos Resumen, Altura de Antenas y Tablas de Cálculo depende de la aplicación, ya sea microondas (punto a punto o punto a multipunto) o VHF-UHF.

En el programa se pueden emplear varias bases de datos, entre ellas *GTOPO30 (Global 30 Arc Second Elevation Data Set)*, *SRTM (Shuttler Radar Topography Mission)* y *DTED (Digital Terrain Elevation Data)*. Estas permiten generar el perfil del terreno para los cálculos de distancia y de otros parámetros como la rugosidad del terreno en el módulo Tablas de Cálculo, además de generar el mapa de la región donde se encuentran los sitios, en los módulos Red y Datos del Terreno.

Radio Mobile: es un instrumento de software creado por Roger Coudé para pronosticar el trabajo de sistemas de radio en exteriores. En primera instancia se creó para radio aficionados que transmiten audio e información en UHF y VHF, posibilita establecer presupuestos de enlaces en una extensa cantidad de frecuencias y se emplea además por profesionales.

Emplea patrones virtuales de altura de terreno para determinar automáticamente el contorno de la trayectoria del emisor al receptor. Utiliza el Modelo del Terreno Irregular (ITM) para difusión de radio (modelo *Longley-Rice*, 1968). No establece únicamente presupuestos del enlace sino que además genera diversos mapas digitales, presentaciones en tres dimensiones y estereoscópicas, así como animaciones.

SISRE: El Sistema de cálculos de Radio Enlaces SISRE (en la versión 5.1) es un programa informático realizado en Cuba. Ha sido usado en la predicción de funcionamiento de numerosos sistemas en América, Europa y Asia. Trabaja en la banda de 30 MHz a 50 GHz.

Probe 3: Es un producto de la empresa productora de programas y bases de datos profesionales para la predicción de la propagación en las comunicaciones (*V-Soft Communications' propagation prediction*). Probe 3 brinda la predicción de radiopropagación en el rango de frecuencia de los 20 a 20 000 MHz. Usa cualquiera de las numerosas bases de datos de elevaciones terrestres USGS de 3 ó 30 arco-segundos pertenecientes a *V-Soft Communications*.

TAP Versión 4.5: El paquete de análisis del terreno (*TAP*) para Windows W2K/XP está compuesto de 24 módulos, que están combinados a través de herramientas, que amplían las capacidades de los diseños de sistemas de RF. El módulo fundamental de estos es el de trazado básico. Tiene disponibles las bases de datos de 3" de arco completa para todos los países de Latinoamérica, (América Central y Sudamérica).

ICS Telecom. 5: Forma parte del conjunto de herramientas implementadas por la compañía de programas ATDI para utilizarse en las actuales tecnologías de radio enlace dentro de las bandas comprendidas entre los 1,5 GHz y los 55 GHz .Permite el diseño, optimización y extensión de redes de radio de microondas analógicas o digitales. Dispone de una base de datos interna de equipos.

Durante el desarrollo de este capítulo se verifica que WiMAX resulta una tecnología ventajosa frente a VHF, HF, VSAT y WiFi por asegurar altas tasas de transferencia en enlaces que pueden alcanzar decenas de kilómetros sin alterar las características del sistema, robustez frente a las interferencias y multitrayectorias y permite el trabajo en ambientes NLOS. Como resultado de lo anterior la tecnología WiMAX, se destaca como mejor candidato pues supera las limitaciones de las anteriores.

La planeación y diseño juega un papel esencial con el fin de obtener resultados satisfactorios en la implementación de redes de acceso inalámbricas y se comprobó la necesidad del empleo de enfoques integrales que abarquen desde el estudio de tráfico hasta la operación y mantenimiento de la red y el transcurso por sus etapas intermedias.

En el mundo existe una diversidad de herramientas que permiten la simulación de los enlaces de radio entre los que se destacan Radio Mobile y Pathloss por el empleo de bases de datos de alta resolución, por poseer múltiples herramientas de análisis de los enlaces y presentar interfases amigables para su manipulación. Ambos están disponibles para su empleo con versiones recientes.

Capítulo 2. Fundamentación del diseño de redes de acceso inalámbrico

En este capítulo se presentan los aspectos relacionados con el diseño de redes de acceso inalámbrico y las etapas que conforman este proceso en correspondencia con un enfoque integral que incluye aspectos relacionados con la energía, protección eléctrica e infraestructura. Al concluir esta etapa se presenta una propuesta de pasos a seguir para el diseño de redes de acceso inalámbrico.

2.1 Fundamentación del diseño de redes de acceso inalámbrico

Diseño es el proceso durante el cual se determinan las líneas generales de un proyecto a partir de una idea previa donde se establecen los procedimientos generales a seguir y su secuencia así como se definen las relaciones entre los elementos que lo componen.

El proceso de diseño de redes se encarga de realizar el dimensionamiento de la red. Para ello se fundamenta en la arquitectura seleccionada que debe garantizar: el transporte del tráfico de los usuarios, la estrategia de protección y recuperación ante fallos y minimizar los costos asociados a la estructura de la red y el equipamiento seleccionado. La limitación de los costos está definida por las condiciones de fiabilidad y restauración en caso de fallos (Fonseca, Cuba y los sistemas BWA. Conferencia del Curso de Redes Inalámbricas de Acceso de Banda Ancha WiFi y WiMAX, 2008) (García, 2009) (Vilkki, 2010).

Para una mejor comprensión del proceso de planeamiento y diseño se plantea una subdivisión en subsistemas los que se describen:

Subsistema de Telecomunicaciones. En el diseño del Subsistema de Telecomunicaciones (Figura 2.1) se definen tres etapas generales: La primera, donde se analiza las capacidades de servicios, tráfico de la red y las necesidades de los clientes al establecer las capacidades de tráfico asociadas y los requerimientos a los elementos de la red. La segunda: El dimensionamiento de la red que comienza con la caracterización del territorio y la determinación de los puntos de presencia desde donde se accederá al núcleo de la red. En función de esto se determina la topología y la selección de la tecnología que pueda satisfacer los requerimientos de capacidad y el esquema de calidad de servicio acordado con los usuarios. La tercera etapa se encarga de la simulación empleando el modelado del comportamiento, de los usuarios y de la red, brinda la retroalimentación suficiente para la corregir y acomodar las medidas esenciales de la red.

Subsistema Eléctrico. El diseño del mismo ofrece las soluciones de alimentación y autonomía energética del sistema de comunicaciones.

Subsistema de Protección. La seguridad, comodidad de instalación, robustez y supervivencia del equipamiento ante las condiciones meteorológicas adversas, se obtienen como resultado de un correcto diseño de este subsistema.

Subsistema de Infraestructura. Se encarga de la selección de las condiciones, (especificaciones de montaje) y accesorios de instalación tales como torres, herrajes, pararrayos.



Figura 2.1. Esquema de los subsistemas en el diseño de una red de acceso inalámbrico.

Elaborada por el autor

El diseño de la red de acceso tiene su fundamento en el diseño de los subsistemas de la red.

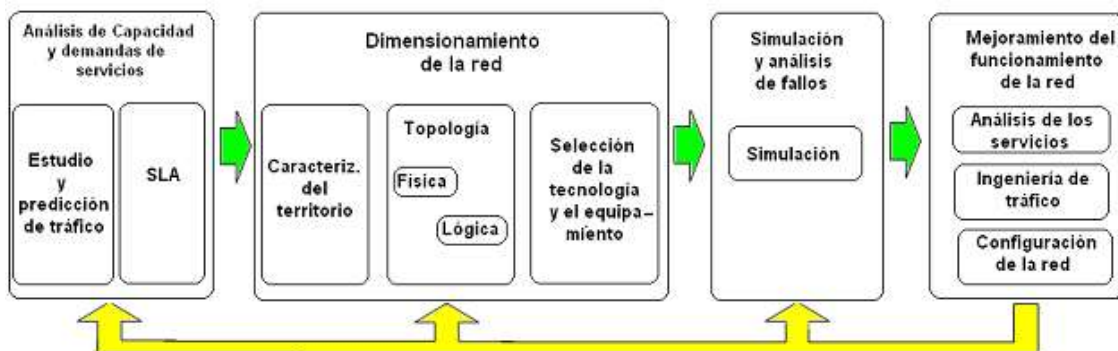


Figura 2.2. Fases del diseño del Subsistema de Telecomunicaciones

Elaborada por el autor)

2.2 Análisis de capacidad y demanda de servicios

En esta primera etapa del diseño del Subsistema de Telecomunicaciones se realiza el estudio y predicción de tráfico. Se definen los requerimientos de la red, se determinan las capacidades actuales y futuras de la misma. Se formaliza el acuerdo de nivel de servicios con el usuario.

2.2.1 Caracterización del tráfico

El estudio y predicción de tráfico es el modelado y estimación de las cargas dentro de la red y se basa en el en la hipotética conducta del tráfico producido por cada componente de la red. Se realiza en dos escenarios diferentes: sobre una nueva red o con una red creada.

El propósito fundamental de esta fase de planeamiento de la red es determinar el mínimo requerimiento de capacidad de la red que garantice los niveles de servicio acordados con el cliente. Es principalmente significativo porque posibilita al usuario prevenir casos de congestión y obstrucción de la red y considerar su posible expansión a mediano y largo plazo. Por tal razón se debe considerar las siguientes variables: los usuarios, que son los que establecen necesidades e imponen prioridades, los servicios y aplicaciones provistos por la red, la calidad y el grado de servicio, la arquitectura de la red y la tecnología seleccionada (Fonseca, Cuba y los sistemas BWA. Conferencia del Curso de Redes Inalámbricas de Acceso de Banda Ancha WiFi y WiMAX, 2008).

En el proceso de estudio del tráfico, para redes en funcionamiento, las aplicaciones informáticas sirven de importante herramienta para graficar los flujos de tráfico dentro de la red. Con ellas se obtiene información en tiempo real sobre el desempeño en las diferentes capas y nodos de la red, así como es posible conforme a sus resultados ajustar su comportamiento. Entre las aplicaciones informáticas mencionadas se encuentra el *NetFlow Analyser* y el *MRTG Traffic Grapher*.

Una vez consideradas las capacidades requeridas se definen las necesidades de conexión hacia el núcleo de la red (WAN/MAN). Algunas de las opciones son: enlaces E1, Frame relay, xDSL, etc (García, 2009).

2.2.2 Análisis de capacidad en WiMAX

La evolución de las técnicas de red y de las aplicaciones de telecomunicaciones implica una incesante transformación de los requerimientos de ancho de banda requerido. Para establecer los requerimientos obligatorios de los métodos incluidos, se emplean patrones de planeamiento de suficiencias, de acuerdo a la calidad de los servicios según la percepción del cliente (Fonseca, Cuba y los sistemas BWA. Conferencia del Curso de Redes Inalámbricas de Acceso de Banda Ancha WiFi y WiMAX, 2008) p-16.

Se considera el planeamiento de suficiencias como el procedimiento de delineación y cálculo de redes de acuerdo a la demanda pronosticada, de manera que la red sustente el incremento de las solicitudes de usuario para conservar una prestación apropiada, es decir, unas determinadas calidades de servicio (Fonseca, Cuba y los sistemas BWA. Conferencia del Curso de Redes Inalámbricas de Acceso de Banda Ancha WiFi y WiMAX, 2008).

La capacidad de transferencia en WiMAX está definida como la cantidad de datos que se pueden transmitir en un período de tiempo con un una tasa de error (*BER*) y en un ancho de banda determinado (Gütter, 2010).

Los servicios demandados por el cliente (VoIP, Videoconferencia, datos) determinan los requerimientos de capacidad de un enlace WiMAX.

2.2.3 Características de recepción

Para cada capa física el estándar define la sensibilidad mínima requerida según el ancho de banda y la modulación utilizada. Ésta sensibilidad se puede calcular mediante la expresión: que se muestra en el Anexo 2 (Sánchez, 2010).

En la Tabla 2.1, se muestra un esquema de la relación señal a ruido mínima requerida por cada esquema de modulación que es típico de la tecnología WiMAX. Los fabricantes aportan además, en la documentación técnica de los equipos, las especificaciones de recepción, donde se relaciona la modulación empleada en dependencia del ancho de banda del canal y del nivel de señal recibida en la antena receptora como se observa en la Tabla 2.2.

Tabla 2.1: Modulaciones y tasas de señal a ruido mínimas necesarias para cada tipo de modulación

Fuente: (Caroline, 2010) (UIT-T, 2006) p 255.

Tipo de Modulación	Relación señal a ruido [dB]
QPSK ½	7.0
QPSK ¾	9.0
16 QAM ½	12.8
16 QAM ¾	15.8
64 QAM ½	15.8
64 QAM ⅔	19.5
64 QAM ¾	21.2
64 QAM 5/6	22.0

Tabla 2.2: Especificaciones de recepción de la estación DBS3900.

Fuente: (Torres, 2010)

Tipo de Modulación	Sensibilidad del receptor [dBm]. Canal de 5MHz	Sensibilidad del receptor [dBm]. Canal de 10MHz
QPSK-1/2	-99.00	-97.7
QPSK-3/4	-97.4	-94.3
QAM 16 1/2	-95.1	-82.0
QAM 16 3/4	-91.0	-87.9

2.2.3.1 Modelo de capacidad

La capacidad neta del sistema está dada por la ecuación (2.1), la cual es ocupada para sistemas OFDM TDD. Con al ecuación 2.1 se realizan los cálculos de capacidad de la Tabla 2.4 (Fonseca, Acceso inalámbrico de banda ancha, propuesta para Cuba, 2008).

$$\text{tasa de transmisión [bps]} = \left(\frac{\text{subportadoras de datos}}{\text{período del símbolo}} \right) \cdot \left(\text{cantidad de bit por símbolo por subportadora} \right) \quad (2.1)$$

- Donde:

- Subportadoras de datos: Es la cantidad de subportadoras de datos en el sistema. La cantidad depende del ancho de banda usado y de la permutación usada.
- Período del símbolo: Inverso de la duración del símbolo, incluye la cabecera.
- Cantidad de bit por símbolo: Es la cantidad de datos por símbolo por subportadora, depende de la modulación ocupada. La cantidad de datos por portadora que aporta cada modulación se resume en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3: Modulaciones y tasa de información

Fuente: (Fonseca, Acceso inalámbrico de banda ancha, propuesta para Cuba, 2008).

Tipo de Modulación	Cantidad de bit/ símbolo/ subportadora
QPSK $\frac{1}{2}$	1
QPSK $\frac{3}{4}$	1.5
16 QAM $\frac{1}{2}$	2.0
16 QAM $\frac{3}{4}$	3.0
64 QAM $\frac{1}{2}$	3.0
64 QAM $\frac{2}{3}$	4.0
64 QAM $\frac{3}{4}$	4.5
64 QAM $\frac{5}{6}$	5.0

2.2.3.2 Cálculo de capacidad de los sistemas WIMAX

Al analizar la capacidad para el sistema WiMAX se utilizan los parámetros OFDMA que se muestran en Anexo 3. A partir de tales parámetros y con la ecuación 2.1 se realizaron los cálculos para todos los anchos de banda de WIMAX 802.16e. Los resultados se resumen en la Tabla 2.4 y son exclusivos para el sistema WIMAX 802.16e SOFDMA TDD.

Tabla 2.4: Cálculos de capacidad para WiMAX 802.16e (SOFDMA TDD) para la permutación PSUC.

Fuente: (Fonseca, Conferencia sobre Redes Inalámbricas de Acceso de Banda Ancha, WiFi y WiMAX, 2008)

Tipo de modulación	Razón de código	Canal de 5 MHz		Canal de 10 MHz	
		Velocidad en el enlace de bajada	Velocidad en el enlace de subida	Velocidad en el enlace de bajada	Velocidad en el enlace de subida
		[Mbps]	[Mbps]	[Mbps]	[Mbps]
QPSK	1/2 CTC	3.17	2.28	6.34	4.70
	3/4 CTC	4.75	3.43	9.50	3.06
16 QAM	1/2 CTC	6.34	4.57	12.07	9.41
	3/4 CTC	9.50	6.85	19.01	14.11
64 QAM	1/2 CTC	9.50	6.85	19.01	14.11
	2/3 CTC	12.67	9.14	26.34	18.82
	3/4 CTC	14.26	10.28	28.51	21.17
	5/6 CTC	15.84	11.42	31.68	23.52

Todo lo anterior, referente al cálculo de la capacidad del enlace, se resume de la siguiente forma:

Con el empleo de los modelos de propagación o el programa de simulación se calculan las atenuaciones que degradan la señal en su recorrido hasta la antena receptora. Al conocer ese nivel de señal se relaciona con el tipo de modulación empleada (Tabla 2.2). Con este dato se extrae de la Tabla 2.4 la información de la velocidad de transferencia del sistema que se puede obtener con ese tipo de modulación para el ancho de banda del canal empleado.

Se logra así un modelo de capacidades, el cual, considera: la frecuencia, el ancho de banda del canal y las permutaciones soportadas. Entregará las capacidades teóricas para sistemas SOFDMA / TDD. Al tener una estimación de esta información se podrá determinar las capacidades del sistema y la distancia a la cual se puede dar tales capacidades en función de las modulaciones a emplear en las diferentes condiciones del canal de radio (Gütter, 2010) p-220, (Fonseca, Acceso inalámbrico de banda ancha, propuesta para Cuba, 2008) p-132.

2.2.4 Acuerdo sobre nivel de servicio con el usuario (SLA)

El término SLA (*Service Level Agreement*) corresponde a los acuerdos establecidos entre el cliente y los proveedores de servicio que fija las exigencias con las que se debe asegurar las prestaciones contratadas. Este procedimiento otorga el carácter legal a las relaciones que se establecen y define las responsabilidades entre las partes. Este documento lo emplean los operadores o suministradores como fuente de información

durante el dimensionamiento de la red (García, 2009), (Ohrman, 2005), (González, 2006). En la Figura 2.3 se muestran las etapas de este proceso.

Entre los principales aspectos que se consideran en este acuerdo con el usuario se incluyen:

- Desempeño de la red

Para evaluar el desempeño de la red se verifica el comportamiento de los parámetros de calidad de servicio. La definición de calidad de servicio dada por la Recomendación E 800 de la ITU-T indica que “la calidad de servicio (*QoS*) es el efecto global del funcionamiento de un servicio que determina el grado de satisfacción de un usuario de este servicio”. Los principales parámetros que norma la Recomendación Y.1541 [33] de la ITU-T para evaluarla son:

Retardo: El retardo de paquetes IP (IPTD) o latencia, es el retardo que sufre un paquete IP al ser transmitido entre dos nodos. Este se produce debido a la espera de los paquetes en los distintos nodos de la red ya sea por colas o procesamiento.

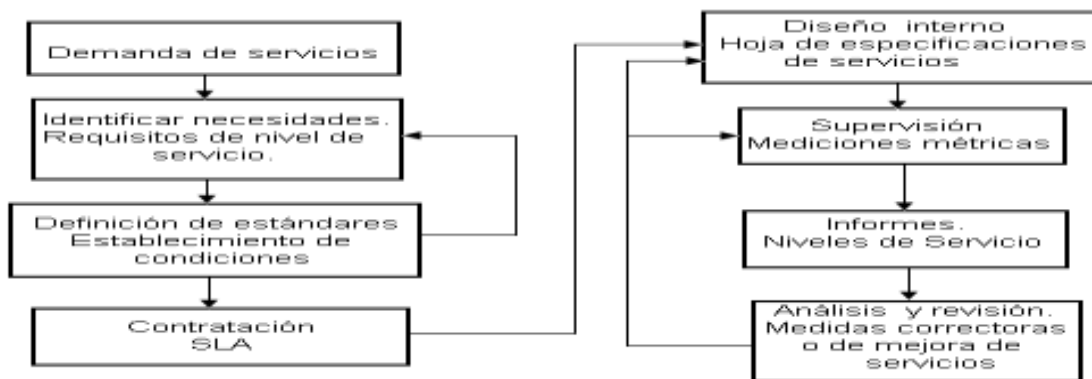


Figura 2.3: Etapas de implementación de un SLA.

Fuente: (González, 2006)

Retardo medio: Es la media aritmética de los diferentes retardos que sufren los paquetes IP al ser transmitidos por la red.

Tasa de errores: La tasa de errores en los paquetes IP (BER) es la relación entre el total de paquetes IP con errores y los paquetes IP transmitidos. Estos errores pueden ser ocasionados por la codificación o decodificación.

Tasa de pérdida de paquetes: La tasa de pérdida de paquetes (PLR) es la relación entre los paquetes IP perdidos y todos los paquetes transmitidos. Estas pérdidas se dan por

congestión en las colas de los nodos, expiración del tiempo de vida de los paquetes o por fallas de transmisión de los nodos.

Jitter: También llamado fluctuación del retardo de paquetes IP (IPDV), es la variación en el retardo de una secuencia de paquetes.

La Recomendación Y.1541 de la ITU-T además identifica ocho clases de *QoS* según las características de calidad en el servicio que requieran las diferentes aplicaciones de tráfico en la red. Estas clases serán utilizadas para el establecimiento de acuerdos entre los usuarios finales y el proveedor del servicio. Ver Anexo 4.

- Niveles de cobertura (interior, exterior, nómada, portátil, móvil).
- Se relacionan los servicios requeridos y se expresan los requerimientos de los servicios de forma medible, (métricas objetivas). Se definen los niveles de servicio y los requisitos de nivel de servicio. (Calidad de servicio *QoS* y Grado de servicio *GoS*).
- Tipos de servicio a los que tendrá acceso.
- Niveles de disponibilidad y tiempo de restablecimiento ante fallos del sistema, costos y tarifas.
- Seguridad: medidas generales y específicas por proteger la organización de la acción de intrusos que acceden ilegalmente a la red. Este aspecto también debe listar los riesgos de seguridad que el cliente identificó durante la etapa de planificación.

2.2.5 Dimensionamiento de la Red

El dimensionamiento de la red consiste en la determinación del volumen del equipamiento y su arquitectura que garantice los requerimientos mínimos de capacidad para asegurar los niveles de servicio acordados con el usuario. Por esta causa el dimensionamiento se realiza para el momento en que se genera mayor tráfico en la red, en el horario pico (García, 2009).

El dimensionamiento de la red comienza con la caracterización del territorio y la determinación de los puntos de presencia desde donde se accederá al núcleo de la red. Se determina la topología física y lógica de la red y la selección del equipamiento.

2.2.5.1 Caracterización del territorio

La caracterización del territorio es un exhaustivo estudio del terreno que tiene el objetivo de la reproducción con el mayor número de detalles de las condiciones reales del lugar de despliegue (Gütter, 2010) p-227, (Araujo & otros, 2008) p-121.

El empleo de mapas cartográficos, digitales, programas informáticos como el Google Earth, Mapinfo, GPS, auxilian la labor de ubicación de los puntos de interés en el despliegue previsto. Con el expreso interés de la ubicación de las estaciones de radio o repetidores, se identifican las principales elevaciones u obstáculos geográficos del territorio.

Se verifica la existencia de embalses, lagos o mar lo cual puede influir en los enlaces de radio. Es importante conocer la altura promedio de la vegetación en la zona sobre todo si la altura de las antenas a emplear es baja. Al estudiar el clima se evalúa la influencia de la intensidad de las lluvias toda vez que pueden introducir atenuaciones importantes cuando se trabaja en frecuencias en el orden de los GHz (Mate, 2007). Se determina si es un entorno urbano, suburbano o rural, las vías de comunicación, la existencia de redes de energía industrial y la radiación solar diaria media, por ser un dato importante si se proyecta el empleo de energía fotovoltaica. Además se puntualiza la existencia de Centros de Comunicaciones y Sistemas de transporte de la red a través de los que se puede tener acceso hacia los proveedores de servicio o el núcleo de la red (Gütter, 2010).

2.2.5.2 Selección de la Topología

Topología es la estructura física y lógica de la red. La topología física se refiere al esquema físico de la red, específicamente al posicionamiento de los nodos y los circuitos que los interconectan. La topología lógica se refiere a la manera en que los dispositivos se interconectan lógicamente en una red y puede diferir considerablemente de la topología física (Horak, 2008).

Los elementos analizados en epígrafes anteriores influyen directamente en la selección de la topología. La ubicación de los elementos de la red en el terreno influenciados por sus características, la determinación de los puntos de presencia (*PoP*) de la FO o el lugar por donde se accederá al núcleo de la red, son elementos determinantes a la hora de definir la topología física de la red. Otros factores importantes son: el costo, el nivel de protección o vitalidad de los sistemas, el nivel de gestión, seguridad, mantenimiento y operación de las redes. Durante la fase de diseño hay que conocer el alcance actual y

futuro de la red (Fonseca, Cuba y los sistemas BWA. Conferencia del Curso de Redes Inalámbricas de Acceso de Banda Ancha WiFi y WiMAX, 2008) p-20. Existen diversas topologías lógicas como son: bus, estrella, malla, anillo, árbol. La topología en estrella es especialmente empleada en sistemas o redes donde el tráfico se enruta a un punto común. Las labores de operación y gestión son más simples que en el caso de redes malladas y además resultan más económicas respecto a estas últimas aunque más vulnerable a fallos en la red. La topología mallada aporta la posibilidad de aplicar medidas de ingeniería de tráfico y aplicar políticas de contingencia para el caso de desperfectos de elementos de la red. Su comportamiento es mejor en este sentido que la topología en estrella.

2.2.5.3 Selección del equipamiento

Un paso importante del trabajo de diseño de la red de telecomunicaciones consiste en determinar si los puestos que se quieren interconectar a la red pueden hacerlo a un costo razonable, con una calidad de servicio adecuada y de forma coherente con las prioridades exigidas. Por lo tanto, habrá que determinar cuál es la tecnología más apropiada para la transmisión de la información en las redes troncales y de distribución.

Aparte de la tecnología a utilizar, se ha de llevar a cabo una selección preliminar de los equipos que podrían ser instalados para utilizarlos en la simulación del programa. Estos equipos, y el uso que de ellos se haga han de cumplir con las normas legales vigentes establecidas por el Ministerio de la informática y las Comunicaciones. Además, se ha de garantizar que se dispondrá de repuestos, suministro, accesorios y, en general, de cualquier elemento usado por estos equipos en el mercado nacional por un período no menor de 5 años. Adicionalmente, estos equipos deben cumplir con los estándares internacionales (ITU, ETSI, ANSI, IEEE) para cuyo propósito serían adquiridos.

2.2.5.4 Simulación

La simulación tiene su fundamento en la elección de los modelos de propagación. Parte de seleccionar los programas de simulación que permiten visualizar los perfiles y los principales parámetros de los enlaces de radio. Otra tarea importante en esta etapa es la correcta selección de los mapas a utilizar.

2.3 Elección de los modelos de propagación

Los modelos de propagación son aproximaciones teóricas basadas en cálculos matemáticos o empíricos donde se caracteriza la atenuación de las señales electromagnéticas desde la antena del transmisor a la antena del receptor como una función de la distancia, frecuencia de la señal, alturas de las antenas, factores atmosféricos, climatológicos y otros parámetros significativos (Gütter, 2010) p-220, (UIT-R, 2005) p-20. Cuando se emplean frecuencias en el orden de los GHz y enlaces de decenas de kilómetros es importante considerar los efectos de la lluvia, la cual puede introducir atenuaciones significativas en el enlace de radio (Ohrtman, 2005).

Se emplean los modelos de propagación con el propósito de calcular la fortaleza de la señal de radio durante el diseño y planeamiento de redes inalámbricas lo cual permite adelantarse al costoso proceso de despliegue de los medios para determinar si un enlace de radio se puede o no implementar.

Para la selección de un modelo se considera un grupo de parámetros como son: rango de las frecuencias en que puede ser empleado, área de cobertura, ambiente de desempeño, (interior o exterior), tipos de entorno (urbano, suburbano, rural).

Como regla básica se debe calcular el presupuesto del enlace con el empleo de los modelos de propagación más adecuados al entorno y a las condiciones específicas del lugar y asegurar en los cálculos del enlace de radio un margen de señal superior a los 20 dB referida a la sensibilidad del receptor para contrarrestar eventos ocasionales no considerados (Gütter, 2010) p-221, (Araujo & otros, 2008) p-121.

2.3.1 Modelo de propagación en el espacio libre

El modelo de propagación en el espacio libre es un modelo ideal, define cuánto se atenúa la señal durante la propagación desde la antena transmisora hasta la receptora, considera solo la frecuencia de la señal y la distancia entre las antenas, tampoco toma en cuenta los efectos de la multitraectoria. Este modelo suele emplearse como una primera aproximación, cuando existe visibilidad entre las antenas y está liberada la primera zona de Fresnel (Araujo & otros, 2008) p-114. Se muestra en la ecuación 2.2.

$$PL_{FSPL} = 32.45 + 20 \log_{10}(d) + 20 \log_{10}(f) \quad (2.2)$$

Donde:

PL_{FSPL} : Pérdidas de la señal en el espacio libre [dB]

f : Frecuencia de la señal [MHz]

d : Distancia entre las antenas [Km]

2.3.4.1 Modelo de propagación de Okumura

El modelo Okumura (Okumura, Ohmori, Kawano, & Fukuda, 1968) es un modelo empírico clásico bien conocido, para medir la fortaleza de la señal de radio en áreas urbanas. El modelo fue construido por los datos recolectados en la ciudad de Tokio, Japón. Este modelo es perfecto para usar en las ciudades que tienen estructura densa y alta. Okumura proporciona además un factor de corrección para las áreas suburbanas, rurales o abiertas para frecuencias de hasta 3 GHz.

La pérdida de paso media puede ser expresada como:

$$PL(dB) = L_f + A_{mn}(f, d) - G(h_{te}) - G(h_{re}) - G_{AREA} \quad (2.3)$$

Donde:

PL : Pérdida media [dB]

L_f : Pérdida en el espacio libre [dB]

$A_{mn}(f, d)$: Atenuación media relativa en el espacio libre [dB]

$G(h_{te})$: Factor de ganancia de la antena de la Estación Base con altura h_{te} [dB]

$G(h_{re})$: Factor de ganancia de la antena de la Estación Terminal con altura h_{re} [dB]

G_{AREA} : Ganancia debido al tipo de ambiente [dB]

Y los parámetros:

f : Frecuencia [MHz]

h_{te} : Altura de la antena transmisora [m]

h_{re} : Altura de la antena receptora [m]

d : Distancia entre las antenas transmisora y receptora [m]

En la Figura 2.4 se muestran los valores de $A_{mn}(f,d)$ y $G_{\text{ÁREA}}$. (Curvas de atenuación relativa Okumura y Factor de ganancia del ambiente).

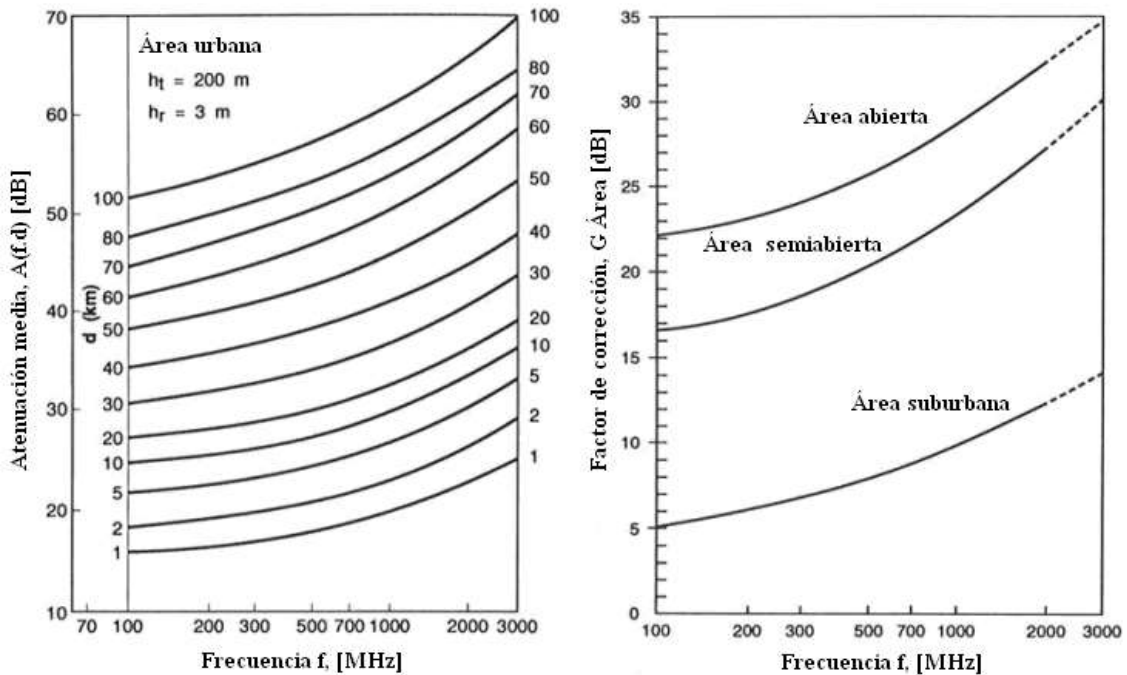


Figura 2.4: Curvas de atenuación relativa Okumura, Factor de ganancia del ambiente y término $G(h_{te})$

Fuente: (Okumura, Ohmori, Kawano, & Fukuda, 1968)

2.3.4.2 Modelo de propagación Okumura-Hata

Modelo empírico, limitado en frecuencias, ya que es efectivo hasta 1500 MHz. Las pérdidas consideradas por este modelo están dadas por la ecuación 2.4: (Okumura, Ohmori, Kawano, & Fukuda, 1968)

$$L(\text{urbano})[\text{dB}] = 69,55 + 26,16 \cdot \log(f) - 13,82 \cdot \log(h_{te}) - a(h_{re}) + (44,9 - 6,55 \cdot \log[h_{te}]) \cdot \log(d) \quad (2.4)$$

Donde:

f : Frecuencia de la portadora [MHz]

h_{te} : Altura de la antena transmisora [m]

válido para $30 \text{ m} < h_{tx} < 200 \text{ m}$.

h_{re} : Altura de la antena receptora [m]

válido para $1 \text{ m} < h_{rx} < 10 \text{ m}$.

$a(h_{re})$: Factor de corrección para la altura efectiva de la antena móvil, depende del tipo de ciudad.

d : Distancia entre el transmisor y receptor en km.

El factor de corrección de altura puede tomar distintos valores en dependencia del ambiente en el cual se desarrolle el estudio de propagación, entonces $a(h_{re})$ se define:

Para ciudades pequeñas y medianas:

$$a(h_{re})[\text{dB}] = (1,1 \cdot \log([f_c]) - 0,7) \cdot h_{re} - (1,56 \cdot \log[fc] - 0,8) \quad (2.5)$$

Para ciudades grandes:

$$a(h_{re})[\text{dB}] = 3,2 \cdot (\log[11,75 \cdot h_{re}])^2 - 4,97 \quad (2.6)$$

Aunque el modelo está definido para ambientes urbanos, también existen correcciones para el cálculo de las pérdidas en ambientes suburbanos y rurales, los cuales se muestran en las siguientes ecuaciones:

Para áreas suburbanas:

$$L[\text{dB}] = L(\text{urbano}) - 2 \cdot (\log\left[\frac{f_c}{28}\right])^2 - 5,4 \quad (2.7)$$

$$L[\text{dB}] = L(\text{urbano}) - 4,78 \cdot (\log[f_c])^2 + 18,33 \cdot \log(f_c) - 40,94 \quad (2.8)$$

Debido al creciente uso de mayores frecuencias para las comunicaciones móviles el modelo Okumura – Hata debió ser ampliado para frecuencias mayores. Con tal propósito se emplea el modelo COST 231.

2.3.4.3 Modelo de propagación *Hata COST 231*

Modelo desarrollado por la Cooperativa Europea para Investigación Científica y Técnica, COST por sus siglas en francés, (*Coopération Européenne dans le domaine de la Recherche Scientifique et Technique*). Extensión en frecuencia del modelo de propagación Okumura – Hata. Modelo generalmente utilizado para distancias entre las antenas transmisora y receptora de hasta 20 Km y frecuencias menores a 2000 MHz, aunque usado también en predicciones para 2.5 GHz. Igualmente el modelo puede ser extrapolable a 3.5 GHz al suponer una menor precisión de los resultados. Esta representación es válida, para WIMAX en 2.3 GHz, 2.5 GHz, 3.3 GHz y 3.5 GHz (Belmonte, 2008). El modelo indica las pérdidas con la ecuación 2.9:

$$PL = 46.3 + 33.9\log_{10}(f) - 13.82\log_{10}(h_{te}) - ah_m + (44.9 - 6.55\log_{10}(h_{te}))\log_{10}d + c_m \quad (2.9)$$

Donde:

d : Distancia entre las antenas transmisora y receptora [Km]

f : Frecuencia [MHz]

h_{te} : Altura de la antena transmisora [m]

C_m es un factor de corrección para adecuar el modelo que extiende el rango de la frecuencia para el que opera el modelo. El factor de corrección se basa en pruebas empíricas, las cuales demuestran que para grandes ciudades es mayor que para áreas suburbanas. Entonces C_m puede tomar los siguientes valores:

$C_m = 0 \text{ dB}$ para ciudades medianas y áreas suburbanas.

$C_m = 3 \text{ dB}$ para centros metropolitanos.

El valor para ah_m para áreas suburbanas y rurales se define como:

$$ah_m = (1.11\log_{10}f - 0.7)h_{re} - (1.5\log_{10}f - 0.8) \quad (2.10)$$

Donde:

h_{re} : Altura de la antena receptora [m]

2.3.4.4 Modelo de propagación Longley–Rice

Se basa en la teoría electromagnética, en el modelo del Instituto de Ciencias y Telecomunicaciones (ITS), para propagación de ondas de radio entre las frecuencias de 20 MHz a 20 GHz, emplea el análisis estadístico de las características del terreno y mediciones de radio, la predicción de la atenuación media de la onda de radio de acuerdo al trayecto y la variación de la señal en el tiempo y en el espacio. Este modelo incluye la mayoría de los modos más importantes de propagación (difracción, atenuación atmosférica, modos de propagación troposférica, difracción sobre el terreno irregular, polarización, entre otros). Una limitación del Modelo Longley Rice es que no incluye los efectos de la ionosfera y debido a esto es que son limitadas las aplicaciones en frecuencias bajas. Este modelo es aplicable para distancias de 1 a 2000 Km, con altura de las antenas desde 0.5 hasta 3000 m (Torres, 2010).

La expresión de la señal recibida es:

$$w = W_{fs} - a \quad (2.11)$$

Donde:

W_{fs} : Nivel de señal que evalúa las pérdidas en el espacio libre.

La ecuación general que evalúa este modelo es la siguiente.

$$w'(t, l, s) = W_0 + Y_S(s) + \delta_L(s) Y_L(l) + \delta_T(s) Y_T(t) \quad (2.12)$$

Donde:

W_0 es el nivel medio de señal general. Y_S , Y_L , Y_T son tres variables aleatorias llamadas “desviaciones” que se expresan en dB. Los términos δ_L y δ_T son llamados multiplicadores, son adimensionales y siempre positivos. Por tanto son cinco variables aleatorias mutuamente independientes lo que permite tratarlas por separado y luego combinarlas al usar la teoría de probabilidad estándar.

Y_S : Variabilidad de la ubicación.

Y_L : Variable que determina los parámetros de irregularidad del terreno. Incorpora el término Δh (variación de la altura) y aproxima este valor en función del tipo de terreno.

Y_T : Variabilidad en el tiempo. Evalúa las condiciones atmosféricas en función del clima y los efectos del tiempo en el índice de refracción, la cual es determinante en la magnitud de la atenuación de la señal troposférica.

El gradiente del índice de refracción de la atmósfera en el área cercana a la superficie terrestre es uno de los parámetros más importantes usados en la predicción a mediano y a largo plazo en las pérdidas de transmisión. El gradiente de la superficie determina en cuánto la onda de radio se inclina, se refracta o pasa a través de la atmósfera. El modelo sugiere valores de permitividad relativa y conductividad del terreno en dependencia de las características de éste y en función de sus parámetros eléctricos. También sugiere valores de atenuación para ambientes LOS, de difracción o de dispersión.

Existen otros modelos de propagación de amplia explotación en la actualidad. Entre ellos se mencionan, *Stanford University Interim (SUI)* que es una extensión del modelo Hata para frecuencias superiores a los 1900 MHz y puede ser utilizado para frecuencias de hasta 3.5 GHz. con cobertura típica de 0,1 a 8 Km. Describe tres tipos de terreno (A, B y C) lo que le otorga una gran variedad de posibles entornos de trabajo (UIT-R, 2005).

El Modelo Hata-Okumura extendido o ECC-33, con recomendaciones de la UIT también abarca la banda de los 3.5 GHz. Otro modelo Walfish-Ikegami (W-I) muy empleado para ambientes NLOS aporta un mayor grado de precisión en la evaluación de las pérdidas debido a los parámetros adicionales introducidos para caracterizar los diferentes tipos de terrenos (UIT-R, 2005).

De los modelos presentados se considera que el Modelo Longley–Rice es el más adecuado para realizar el diseño de la red de acceso inalámbrica por las razones siguientes: Este modelo incluye la mayoría de los modos mas importantes de propagación (difracción, atenuación atmosférica, modos de propagación troposférica, difracción sobre el terreno irregular, polarización), por lo que permite realizar una aproximación más realista de las condiciones en las que se realiza la modelación. Este modelo cubre la banda de trabajo en la que se realizará el diseño y satisface las exigencias para ser empleado en entornos rurales.

El desarrollo de las aplicaciones informáticas ha simplificado el cálculo de los enlaces de radio. Estos programas implementan algoritmos basados en los modelos de propagación y combinados con el tratamiento de las bases de datos digitalizadas del terreno se logra obtener diseños de alta calidad.

2.3.5 Modelo de la atenuación específica debido a la lluvia. Influencia de la Lluvia en los niveles de transmisión en un enlace de radio

La propagación de las ondas de radio a través de la atmósfera además de las pérdidas de la señal en el “espacio libre” es atenuada por otros factores. La interacción de las ondas electromagnéticas con las partículas de la atmósfera tales como la lluvia, nieve o granizo degrada la calidad de señal con una atenuación adicional. Los fenómenos físicos implicados en la atenuación son dos, la absorción de energía incidente y la dispersión (*scattering*) de esta energía.

La atenuación específica debida a la lluvia puede calcularse a partir de la Recomendación UIT-R 838 (*International Telecommunications Union Recommendation*) (Barbán, 2010). La atenuación específica γ (dB/km) se obtiene a partir de la intensidad de lluvia R (mm/h). En el Anexo 5 se detalla el procedimiento para realizar el cálculo.

2.4 Elección del programa de simulación del enlace de radio

En el estado del arte figuran diversos programas informáticos cuya selección suele fundamentarse en determinados criterios entre los que se destacan los siguientes (Paggi, 2003).

- Deben ser las últimas actualizaciones.
- Ser adecuados para trabajar en plataformas Windows 2000 o posteriores.
- Ser productos estables con madurez en el mercado o en su distribución.
- Ser actuales. La última versión disponible sea lo más reciente posible y que el producto continúe disponible en el mercado ó distribución.
- Estar disponibles para usar y poseer al menos demostraciones (*Demos*) cuyas bases de datos digitales presenten una alta resolución (hasta 3 segundos de arco) como SRTM.
- Presentar una interfase gráfica de ayuda y amigable al diseño de la red.
- Que sus autores sean reconocidos en el área de la comunidad científica.
- Permitir la mayor cantidad de topologías posibles y de aquellas funcionalidades que se adapten al caso de estudio.
- Que implementen modelos de propagación que cumplan con los requisitos del diseño que se realiza.
- Importancia de la empresa o institución que lo desarrolla.

El proceso del diseño aplicado va a condicionar en alguna medida, la búsqueda y elección del programa de simulación. La caracterización del terreno, las exigencias de cobertura, los entornos donde se realizará el despliegue de la red a diseñar, la banda de frecuencia de trabajo del equipamiento de radio seleccionado, las condiciones de visibilidad o no de los elementos inalámbricos de la red son elementos que se evalúan

para la selección de la herramienta adecuada. En la decisión final influyen también las preferencias del diseñador.

2.5 Selección de los mapas

Existen actualmente una gran variedad de Bases de datos digitales del terreno, entre ellas GTOPO, TERRAIN, STRM, GLOBE, DTED (*Digital Terrain Elevation Data*) de nivel 1 y 2. Presentan resoluciones de 1, 3 ó 30 arc-segundos. Los mapas se seleccionan en función del programa de simulación del enlace de radio escogido. Se emplean además otros programas para ayudar en la ubicación de los puntos en el terreno como son el Mapinfo y el Google Earth y el Sistema GPS (*Global Positions Systems*) que permiten realizar precisiones de ubicación de los puntos en el terreno.

2.6 Simulación y análisis del comportamiento de los enlaces de radio

La simulación es el proceso de usar programas informáticos y modelos matemáticos para analizar el comportamiento de una red sin requerir una red real. Los programas para el cálculo de los enlaces de radio son aplicaciones informáticas que basan su funcionamiento en los modelos de propagación de las señales de radio y el empleo de bases de datos digitalizadas del terreno (García, 2009) p 49, (Oppenheimer, 2010).

En el proceso de planeamiento es imprescindible simular para visualizar los efectos de diversos eventos y escenarios en la red que se diseña, así se obtiene información adelantada sobre el desempeño del mismo, y conforme a los resultados logrados, ajustar su comportamiento.

La simulación es la más cercana aproximación a las condiciones reales de los entornos (topografía, vegetación, clima, refractividad del terreno) donde se planifica implementar un enlace de radio sin que implique el costoso y voluminoso trabajo de despliegue del equipamiento, torres, antenas, etc.

En esta fase es posible observar los atributos de la red diseñada, los efectos de diferentes escenarios de fallos pueden ser evaluados y comprobar como la red sobrevive a ellos. Se establece por tanto, un proceso de realimentación y perfeccionamiento de los parámetros de la red definidos preliminarmente que permiten mejorar los índices de calidad del diseño.

Como parámetro importante para asegurar el correcto funcionamiento del enlace de radio es lograr un margen de éxito de la fortaleza de la señal en la antena receptora de 20 dB por encima de la sensibilidad del receptor (Gütter, 2010) p-221, (Araujo & otros, 2008) p-121.

2.7 Mejoramiento del funcionamiento de la red

El resultado esperado al concluir esta etapa es obtener el mejor equilibrio posible entre las características de la red y el costo de la red en consideración con los requerimientos de calidad de servicio y grado de servicio (López F. , 2009).

2.7.1 Análisis de los Servicios

El análisis de los servicios consiste en verificar si las aplicaciones y los servicios que presta la red se comportan con los índices de calidad pactados con el usuario (García, 2009). *QoS* y *GoS* son condiciones estrechamente vinculadas con las medidas de tráfico entre cada par de nodos de la red. *GoS* representa la penetrabilidad a una aplicación, usualmente a la hora pico y *QoS* aquellas condiciones inherentes a la utilización de la aplicación, así se tiene el MOS (*Mean Opinion Rate*) en telefonía u otros como PLR (*Packet Loss Rate*), PER (*Packet Error Rate*) o el retraso de paquetes en la red (Fonseca, Cuba y los sistemas BWA. Conferencia del Curso de Redes Inalámbricas de Acceso de Banda Ancha WiFi y WiMAX, 2008) p 35.

Pruebas de campo con el equipamiento, estudio de las opiniones de los usuarios (*Survey methods*) y empleo de métodos analíticos y estadísticos son ampliamente empleados (García, 2009) p 26. En el proceso de estudio del tráfico, las aplicaciones informáticas, sirven de importante herramienta para graficar los flujos de tráfico dentro de la red, el sistema de gestión de red (*NMS o Network Management Systems*) es utilizado con ese objetivo. Con esas herramientas se obtiene información en tiempo real sobre el desempeño en las diferentes capas y nodos de la red, así como es posible conforme a sus resultados ajustar su comportamiento.

Pueden ser empleadas herramientas de gestión de redes para realizar una vigilancia efectiva de desempeño de la red (demora, pérdida de paquetes, *jitter*), así como estadísticas de errores, seguimiento y evaluación de carga, lo que permite realizar la

detección, diagnóstico y corrección de error en menor tiempo y la posibilidad de encaminar el tráfico de red si alguna parte de la red opera en déficit (Oppenheimer, 2010). Aplicaciones como el *NetFlow Analyser* y *MRTG Traffic Grapher XE 2.1.2* son ejemplo de estos programas.

Otras aplicaciones son empleadas como son el *Network Simulator (Ns2)* y el *OPNET 14*, este último permite la simulación de escenarios que representan redes móviles (ITU-T, 2006).

La importancia de esta etapa radica en la certificación de la calidad con que se prestan los servicios pactados con el usuario.

2.7.2 Ingeniería de Tráfico

La Ingeniería de Tráfico (*TE*) es la disciplina encargada del estudio y utilización eficiente de los diferentes tipos de recursos disponibles en la red y proporcionar políticas de contingencia en caso de fallas para asegurar la Calidad de servicio *QoS* y el Grado de servicio *GoS* necesarios para las aplicaciones de los usuarios según el Acuerdo de Servicio. Este proceso se logra sin agregar recursos a la red (García, 2009) p-28, (Barbán, 2010) p-35.

La Ingeniería de Tráfico, pretende la optimizar el trabajo de la red, incluye el empleo de la tecnología y métodos científicos para medir, determinar, ajustar y vigilar el tráfico en la red. Su finalidad primordial es optimizar la utilidad de una red en lo referente al tráfico y forma de empleo de los medios. Se clasifica en dos formas de acuerdo a sus finalidades:

Orientada a tráfico: ésta rama tiene como objetivo el perfeccionamiento de los parámetros relacionados a la transmisión de información, por ejemplo: minimizar la pérdida de paquetes, minimizar el retardo, maximizar la velocidad de transferencia. Esto se logra al realizar acciones de reserva de recursos, diferenciación de los servicios, asignaciones dinámicas de ancho de banda.

Orientada a recursos: ésta rama se plantea como objetivo, la optimización del empleo de los medios de la red, para evitar que se produzca congestión en sectores de la red y otros estén subutilizados. Toma principalmente el ancho de banda como recurso a optimizar. Para mejorar el desempeño de las redes se reorienta el tráfico hacia puntos de acceso menos congestionados. También se modifica la topología de la red.

2.8 Subsistema de Energía

El subsistema de energía es el conjunto de equipos y elementos que funcionan de manera relacionada y coordinada con el fin de dotar a los sistemas de telecomunicaciones, de alimentación eléctrica autónoma para garantizar su funcionamiento continuo y su durabilidad (Araujo & otros, 2008).

En las zonas rurales el suministro de energía eléctrica no es estable por lo que la instalación de dispositivos o sistemas en estas localidades debe diseñarse con su propio sistema de energía. Las soluciones más comunes es el empleo de Inversores, baterías y paneles solares.

Para seleccionar el tipo de inversor se consideran los siguientes criterios. Respecto a sus especificaciones técnicas es necesario evaluar la potencia nominal del inversor. La potencia del equipo debe ser un 30 % superior al consumo de carga pico del sistema a alimentar. El voltaje de alimentación de corriente directa (banco de baterías) debe considerarse por su influencia en la selección del tipo de baterías y el volumen que ocupan en la instalación así como el régimen de descarga en el modo de trabajo “Inversor”. Otros parámetros son: voltaje a la entrada y la salida y frecuencia de operación. Además se debe puntualizar con el proveedor garantizar que se dispondrá de repuestos, suministro, accesorios y en general de cualquier elemento usado por estos equipos en el mercado nacional por un período no menor de 5 años.

Para la selección de las baterías los principales parámetros son:

Tipo de baterías. Hay dos tipos principales de baterías: arranque y ciclo- profundo. Las baterías pueden ser selladas o no selladas (despiden gases durante su operación). Los tipos de baterías recomendadas para usar con los inversores son las de ciclo profundo.

Los otros parámetros son voltaje y capacidad de la batería los que definen en gran medida la autonomía del sistema de energía.

Para el diseño de este subsistema se deben realizar las siguientes tareas (Araujo & otros, 2008).

2.8.1 Cálculo del consumo de la carga media diario

La carga media diaria es el consumo en watt que aportan todos los medios que se alimentan del sistema de energía, en un día (L [W/h]). Estos datos sirven de base para el dimensionamiento de la fuente de energía.

2.8.2 Dimensionamiento del sistema de almacenamiento

El dimensionamiento del sistema de almacenamiento consiste en determinar la capacidad mínima necesaria del sistema de almacenamiento de energía (baterías), las cuales deben asegurar un grado de autonomía en correspondencia con lo pactado con el cliente en el SLA. Para realizar el cálculo de la capacidad del banco de baterías (en W/h), se utilizan los siguientes criterios:

- Autonomía del Banco de Baterías: (N_{da}), (se expresa en días u horas). Es el tiempo que el banco de baterías debe alimentar el sistema sin deterioro de su capacidad. Se determina para una cantidad de horas, en dependencia de los requerimientos del SLA.
- Profundidad de descarga del banco de baterías: (Pd_{max}). Es el máximo nivel al que se pueden descargar las baterías (expresado en %) sin deterioro de su capacidad. Es un dato que aporta el fabricante en la documentación técnica de las baterías. Un valor típico para las baterías de descarga profunda es 80 % ($Pd_{max} = 0.8$)
- Eficiencia del banco de baterías (%)
- Eficiencia del Inversor (%)

La capacidad del Banco de Baterías (C_{nom}) se calcula por la fórmula 2.13.

$$C_{nom}(Wh) = L \cdot (1 + \eta_G) \frac{N_{da}}{Pd_{max}} \quad (2.13)$$

Donde:

C_{nom} : Capacidad total del banco de baterías [w/h]

L : Consumo máximo de la carga para 24 h [w/h]

N_{da} : Número de días de autonomía con baterías [días]

η_G : Se consideran unas pérdidas del 10% adicionales sobre el consumo de las cargas

($\eta_G = 0,1$)

P_{dmax} : Nivel máximo de descarga del banco de baterías. (Seleccionado 0,8) [%]

2.8.3 Subsistema de Protección Eléctrica

Es el conjunto de elementos, accesorios y dispositivos que están destinados a garantizar la seguridad física del personal y los medios instalados en una determinada locación, de los eventos asociados a los fenómenos eléctricos que pueden afectar al buen funcionamiento de los equipos electrónicos (Carpenter R. , 2002), (García R. , 2000).

En las zonas rurales y montañosas es frecuente la descarga de rayos directos durante las tormentas que impactan en las instalaciones de comunicaciones o en las cercanías. Es por tanto imprescindible la instalación de sistemas que garanticen: la protección y seguridad de la vida humana, de los equipos y medios emplazados en esos lugares y del funcionamiento estable y seguro de éstos.

Existen diversas normativas internacionales acerca de la protección eléctrica, entre ellas: ITU K.56, IEEE 81, y IEEE 81.2 (Araujo & otros, 2008). No existe ninguna tecnología que por sí sola pueda eliminar el riesgo de los rayos y sus transitorios. Es necesario un sistema integral, que se encargue de: captura de la descarga (sistemas de pararrayos), derivación del rayo hacia la tierra y disipación de la energía en la tierra.

En (Carpenter R. , 2002), (García R. , 2000) y (Carpenter R. B., 2000) se dispone de los elementos necesarios para los diseños de los Sistemas de Pararrayos y de Aterramiento.

2.8.3.1 Subsistema de Infraestructura

El diseño de este subsistema incluye las especificaciones para el montaje de las torres y del Sistema de Pararrayos (Araujo & otros, 2008), así como verificar la existencia de la infraestructura necesaria para la instalación de las Estaciones Base o Puntos de Acceso, (edificaciones, vías de acceso, energía, seguridad) o la posibilidad de construirla o implementarla (Gütter, 2010).

Esta etapa es de mucha importancia para el despliegue de la red diseñada. Aquí se materializan las condiciones específicas del montaje como resultado de la inspección realizada durante la caracterización del terreno. En las visitas a los sitios se verifica las

dimensiones y particulares del local donde se instalarán los medios y la seguridad para el acceso solo del personal autorizado. Además la existencia de vías de acceso para el traslado de personal y equipos a estas instalaciones. Reviste también especial interés la existencia o no de alimentación de la red de corriente alterna industrial y las facilidades para la instalación de las torres. En el Anexo 6 se muestra la composición y accesorios de las torres.

2.9 Propuesta de pasos a seguir para el diseño de una red de acceso inalámbrico

En este epígrafe se sistematiza el proceso para la planificación y diseño de una red de acceso inalámbrica. La estructura de los pasos que se proponen está basada en las etapas conceptualizadas en el epígrafe 2.

2.9.1 Pasos para el diseño de la red

Paso No. 1: Análisis de los requerimientos del usuario

Paso No. 2: Caracterización del tráfico

Paso No. 3: Acuerdo sobre nivel de servicio con el usuario

Paso No. 4: Caracterización del territorio

Paso No. 5: Selección de la Topología

Paso No. 6: Selección del equipamiento

Paso No.7: Elección de los modelos de propagación

Paso No.8: Compatibilización

Paso No.9: Simulación y análisis del comportamiento de los enlaces de radio

Paso No. 10: Análisis de capacidad de la red

Paso No.11: Análisis de los servicios y mejoramiento del funcionamiento de la red

Paso No. 12: Dimensionamiento del subsistema de energía

Paso No.13: Dimensionamiento del subsistema de protección eléctrica

Paso No. 14: Dimensionamiento del subsistema de Infraestructura

Paso No.15: Presentación de la propuesta de red de acceso inalámbrica

En el capítulo se realizó la fundamentación del diseño de redes de acceso inalámbricas de banda ancha el cual se sustenta en la caracterización de los subsistemas de Telecomunicaciones, Energético, Protección eléctrica y de Infraestructura que de forma interrelacionada lo componen.

Con el fin de sistematizar la proyección de la red, en el capítulo se elaboró una propuesta de pasos. La misma comprende el análisis de los requerimientos del usuario y la elaboración del acuerdo sobre los niveles de servicio. Juega un papel esencial, la selección de la topología y el equipamiento, la modelación y simulación de los enlaces de radio para el posterior análisis del comportamiento de los servicios y finalmente la presentación de la propuesta de red.

Capítulo 3. Diseño e implementación del enlace inalámbrico

3.1 Estudio de la zona

El primer paso para el diseño de una red de telecomunicaciones consiste en determinar si los puestos que se quieren interconectar a dicha la red se pueden implementar a un coste razonable, con una calidad de servicio adecuada y con las prioridades exigidas.

Por lo tanto, habrá que determinar cuál es la mejor tecnología (la más apropiada) para la transmisión de datos en una red formada por la Universidad Técnica de Manabí y su extensión situada en Bahía de Caráquez, donde ambas entidades en su conjunto cuentan con un número considerables de usuarios entre estudiantes, docentes y empleados que imponen un tráfico masivo de usuarios a los recursos de la red existentes en cada uno de los departamentos y tornan difícil hasta el punto de volverse inaccesible en determinadas horas del día.

Por tal motivo, siendo la institución dos entidades de servicio a la comunidad de gran importancia, deben poder ofrecer disponibilidad y transparencia en el intercambio de información, capaz de contar con una gran infraestructura de equipos y herramientas tecnológicas aptas para un radioenlace que interconecte ambos campus universitarios con la calidad mínimas exigidas a los recursos a la red.

En este capítulo se pretende comprobar la viabilidad de un enlace inalámbrico a través del software: *Radio Mobile*, el cual permite la simulación de un radioenlace con características técnicas adecuadas capaz de brindar una disponibilidad y eficiencia a los recursos de la red, entre el campus de la extensión universitaria en Bahía de Caráquez con la matriz de la Universidad Técnica de Manabí ubicado en la ciudad de Portoviejo.

Esto permitirá evaluar el comportamiento de la señal de radio entre los elementos de la red creada, las pérdidas, atenuaciones y caracterizar a partir del modelo desarrollado, el cálculo y la predicción de desempeño del sistema de radio propuesto.

3.2 Determinación de la tecnología a implementar y modelo de red propuesto

Como resultado del estudio de la tecnología WiMAX acerca de sus ventajosas características se pudo apreciar la notable superioridad de la misma para enlaces tanto: punto a punto, punto a multipunto y multipunto a multipunto frente a la tecnología WiFi,

especialmente debido a la elevada eficiencia en la capa física y de control de acceso al medio.

WiMAX soporta mayor dispersión multitrayecto que WiFi. Es decir, con diferencias de recorridos superiores a 120 metros la señal WiFi se degrada (diseñado para propagación en interiores), mientras que WiMAX soporta dispersiones superiores a 2.000 metros, por lo que es una señal mucho más robusta en entornos exteriores.

Otra razón que convence es que WiMAX permiten mayores distancias de enlace empleando la misma potencia y antena que los equipos WiFi, lo cual constituye un ahorro en antenas. También cuenta con condiciones para incrementar más canales, de acuerdo a la normativa de cada país; el ancho de banda es configurable y sujeto a la relación de espectro; además de que permite dividir el canal de comunicación en pequeñas subportadoras, lo que hace más eficiente el canal.

En este proyecto se puede apreciar que la distancia existente entre los dos campus universitarios es apreciable (aprox. 48,27 km), por lo que no es factible el empleo de métodos de acuerdo a las normativas IEEE 802.11 en sus modelos a, b, g o n denominados WiFi, ya que éste es más adecuado para espacios de menor distancia. (Ver Fig. 3.1)

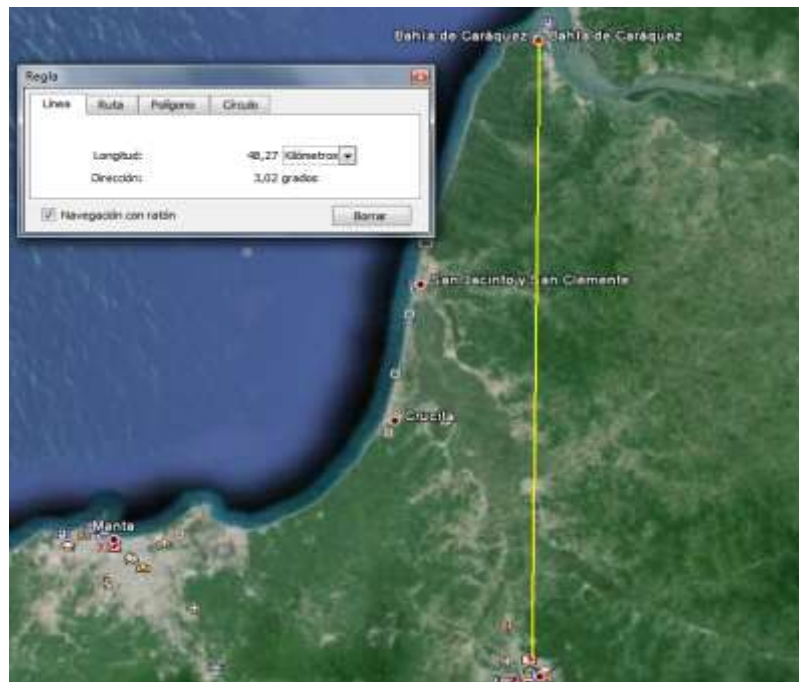


Fig. 3.1 Distancia entre la extensión de Bahía de C. y la UTM (Imagen generada mediante Google Earth)

Por este motivo se propone utilizar la tecnología WiMAX que es capaz de cubrir entornos de redes metropolitanas de hasta de 50 Km de distancias entre un radio y otro, contando con antenas de alta direccionalidad y gran ganancia.

Específicamente, se ha pensado establecer como nodo principal la Universidad Técnica de Manabí (UTM) y como estación a la extensión universitaria de Bahía de Caráquez.

El enlace propuesto pasará desde el nodo principal: UTM a la zona geográfica “Vientos”, luego a la localidad “Hojas”, empleados como estaciones repetidoras hasta llegar la señal a la extensión universitaria de Bahía. Estos dos puntos intermedios se han agregado para garantizar la conexión desde un extremo a otro logrando visibilidad entre los radios, ya que la UTM y Bahía están en zonas bajas y entre ellos existen elevaciones montañosas que pueden llegar a interferir la señal. Este enlace tendrá una distancia total de 59,62 Km.

En la zona geográfica “Vientos” se situarán dos antenas, una en la dirección de la UTM y otra antena mirando hacia la zona geográfica “Vientos”. De la misma forma, esta localidad también tendrá dos antenas para garantizar el enlace hacia la localidad de “Hojas” y la extensión de Bahía. Todo con la finalidad de que en caso que no se logre una visión directa o NLOS (non Line of Sight) entre las antenas se pueda garantizar un enlace con poca visibilidad entre ellas (edificios, árboles, inclemencias del tiempo) consiguiendo establecer velocidades de hasta 300Mbps.

El enlace punto a multipunto propuesto es ideal para extender la cobertura inalámbrica involucrando grandes zonas de importancia para la universidad y recomendable para el campus universitarios, así como también locaciones corporativas con numerosas edificaciones dispersadas sobre un área de tamaño significativo como es la provincia de Manabí. (Ver Fig. 3.2)



Figura 3.2 Estructura de Red Propuesta

Elaborada por el autor

Con las soluciones *punto a multipunto* se tendrá la posibilidad además de:

Calidad de servicio extremo a extremo de voz y vídeo, soportando un número considerable de cientos de llamadas con calidad de voz convencional.

Alimentación de puntos de libre acceso (*hotspots*) permitiendo un alto rendimiento.

Seguridad y vigilancia a través cámaras inalámbricas transmitiendo vídeo para ofrecer servicios seguros y confiables.

Acceso de última milla para los usuarios pertenecientes a la comunidad universitaria.

Reemplazo de línea arrendada por una conectividad eficaz en cuanto a costos, proveyendo servicios de VOIP y de datos en el campus universitarios.

El tiempo de configuración e instalación es menor que el de una línea punto a punto de los proveedores de cable habituales.

Las antenas están mejor protegidas para trabajar en ambientes adversos por lo que no es necesaria una inversión en aclimatación de salas.

Menor costo de implantación y retorno de la inversión mucho más rápido.

Software para la Simulación: Radio Mobile

Radio Mobile es un programa de libre utilización para valorar radio enlaces de larga distancia en zonas irregulares, empleando contornos geográficos añadiendo datos del equipamiento (potencia, sensibilidad del receptor, tipologías de las antenas, pérdidas, etc.) que se requiera simular.

Este programa es muy poderoso en la implementación y análisis de redes inalámbricas, cobertura de una antena fija hacía un móvil, trazado de estaciones de televisión y de radio y aplicaciones en sistemas de reporte de posición automática entre otros.

Los datos a insertar para las simulaciones posibilitan expresar de manera fiel el equipamiento real a emplearse al implementar el proyecto.

Existe varias bases de datos con los perfiles de la superficie terrestre que se puede utilizar con el programa “Radio Mobile”, entre las cuales se incluyen: DTED, SRTM, GTOPO30, CANADA3D, TERRAIN y GLOBE.

La más precisa de todas es la base de datos SRTM tomada por el transbordador “*Endeavour*” mediante un radar de alta resolución, aunque tiene el inconveniente de que existen muchos huecos en la cobertura de sus mapas, debido a las sombras proyectadas por en el radar y por eso generalmente se complementa con otra base de datos que aunque sea menos precisa, pueda llenar los huecos de cobertura, por ejemplo la GTOPO30 o la DTED.

La base de datos STRM fue obtenida en la misión topográfica de una Nave Radar, que utilizando la técnica de interferometría SRTM, acumuló datos topográficos de casi el ochenta por ciento de la superficie terrestre (entre las latitudes 60° norte y 56° sur), territorio habitado por más del 95 por ciento de la población humana y creando así la primer base de datos digital de la ondulación terrenal global. Para lograr esto se lanzó al espacio el 11 de febrero del 2000, en misión topográfica la Nave Radar (SRTM), la cual llevaba como carga útil a bordo la nave espacial “*Endeavour*”. (Obsérvese la Fig. 3.3)

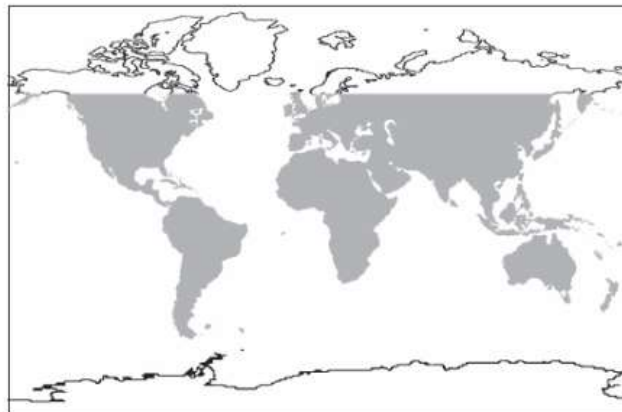


Figura 3.3 El área sombreada indica la cobertura de SRTM

Fuente: (Wiener, 1986)

Los radares de la nave hicieron el barrido de la mayoría de la superficie de la tierra en sólo diez días de operación, obteniéndose la más completa base de datos topográfica digital de alta resolución de la tierra.

3.3 Descripción del Software. Modelo utilizado para la propagación

Este programa utiliza con buenos resultados el modelo *Longley-Rice* para predicción troposférica en comunicaciones de radio a través de zonas irregulares para enlaces de largo y mediano alcance, adicionalmente brinda variados servicios de soporte para la

delineación y simulación de los enlaces y las redes de telecomunicaciones. Además posibilita operar con frecuencias de 20 MHz a 40 GHz y trayectorias de 1 a 2000 Km.

El modelo tiene propósitos generales y puede ser aplicado en varios problemas de la ingeniería y está basado en la teoría electromagnética y en análisis estadísticos para las tipologías de terreno y mediciones de radio, pronostican la atenuación de la onda de radio de acuerdo al trayecto y la inestabilidad de la transmisión en tiempo y espacio.

Dicho modelo toma en cuenta la absorción atmosférica incluyendo absorción del vapor de agua y el oxígeno, las pérdidas debido a la temperatura del ruido atmosférico y la atenuación causada por la lluvia y las nubes.

El modelo considera igualmente las irregularidades del terreno, tales como las de filo de cuchillo, las pérdidas debido a obstáculos aislados, la difracción, la dispersión y el desvanecimiento de potencia de largo plazo.

El modelo *Longley-Rice* ofrece grandes ventajas, una de ellas es que permite la elaboración de redes de comunicaciones de radio, siendo de gran utilidad a la hora de verificar la eficiencia de los enlaces de las redes de radio, además de que permite evaluar si un enlace entre dos sitios dados es realizable o no técnicamente y suministra las características de su funcionamiento.

3.3.1 Parámetros de entrada en el modelo ITS.

Los parámetros de entrada del modelo de *Longley-Rice* se detallan en la tabla 3.1, donde se enfatizan los valores admitidos o los términos para los que el modelo fue planteado.

Tabla 3.1: Parámetros de entrada para el modelo ITM

Fuente: (Hufford, Longley, & Kissick, 1982)

Parámetros del sistema	
Frecuencia	20 MHz a 20 GHz
Distancia	1 km a 2000 km
Altura de antenas	0.5 m a 3000 m
Polarización	horizontal o vertical
Parámetros del entorno	
Variable de terreno irregular Δh	rugosidad promedio
Constantes eléctricas del terreno	permitividad y conductividad
Refractividad de la superficie	250 a 400 N-unidades
Clima	7 tipos
Parámetros de instalación	
Criterio de posicionamiento	random, careful o very careful
Parámetros estadísticos	
Fiabilidad respecto a variabilidad de tiempo, locación y situación	0.1% al 99.9%

Las variables del método están relacionadas al equipamiento de radio y no depende de las características del entorno.

Frecuencia: la correspondiente a la portadora de la transmisión. Este modelo es casi insensible a la frecuencia, de esta manera un valor determinado puede envolver un extenso ancho de banda.

Distancia: corresponde a la circular entre dos terminales.

Altura de antenas: es la elevación del centro de irradiación sobre la altura del terreno y se establece para cada terminal.

Polarización: ésta para las antenas puede ser vertical u horizontal. Este modelo considera que las dos antenas emplean la misma polarización. Las características del medio representan estadísticamente las correspondientes al sitio donde trabajará el proyecto. Estas variables no dependen del método de radio.

Parámetro de terreno irregular Δh : La variabilidad de la zona entre los dos terminales se consideran como una función aleatoria del trayecto entre ellos. Para definir esta función, el modelo ITM emplea un solo valor de Δh para mostrar de manera sencilla la elevación promedio del terreno. Datos típicos se muestran en la tabla 3.2

Tabla 3.2: Valores sugeridos para el parámetro de terreno irregular

Fuente: (Hufford, Longley, & Kissick, 1982)

Forma del terreno	Δh (m)
Plano o superficie del agua	0
Llanura	30
Colinas	90
Montañas	200
Montañas escabrosas	500
Para un nivel promedio usar $\Delta h = 90$ m	

Constantes eléctricas del terreno: La permitividad relativa (constante dieléctrica) y la conductividad de la tierra. Datos típicos se muestran en la tabla 3.3.

Tabla 3.3: Valores sugeridos para las constantes eléctricas del terreno

Fuente: (Wiener, 1986)

Tipo de suelo	Permitividad relativa	Conductividad (S/m)
Tierra promedio	15	0.005
Tierra pobre	4	0.001
Tierra buena	25	0.020
Agua dulce	81	0.010
Agua salada	81	5.000
En la mayoría de los casos usar las constantes de tierra promedio.		

Refractividad de la superficie N_s : Las constantes atmosféricas y especialmente la refractividad atmosférica, deben considerarse como funciones aleatorias de posición y tiempo. Generalmente esta función puede ser determinada por un solo valor N_s que constituye el valor estándar de la refractividad cerca del nivel de la tierra o superficie. Comúnmente se expresa en N-unidades (partes por millón), Datos típicos se muestran en la tabla 3.4.

Clima: Se representa cualitativamente mediante un conjunto discreto de etiquetas. Los climas registrados en la actualidad se presentan en la tabla 3.4. Conjuntamente con N_s , el clima se emplea para definir la atmósfera y su variación en el tiempo.

Tabla 3.4: Valores sugeridos para N_s en función del clima

Fuente: (Hufford, Longley, & Kissick, 1982)

Clima	Ns (N-unidades)
Ecuatorial	360
Continentes subtropical	320
Marítimo subtropical	370
Desierto	280
Continental templado	301
Marítimo templado, sobre la tierra	320
Marítimo templado, sobre el mar	350
Para condiciones promedio usar el clima continental templado y Ns = 301 N-unidades	

La manera en que un sistema de radiocomunicación se sitúa en un entorno determinado genera significativas interacciones en el mismo. En este modelo, las características de implementación pretenden definir dichas interacciones para poder emplearlas en los terminales del radio enlace.

Criterio de posicionamiento: Detalla cualitativamente la precaución considerada en la implementación de cada terminal. Esta característica puede precisarse con una etiqueta como: *random*, *careful* o *very careful*.

Por último, los indicadores estadísticos son los que detallan las circunstancias estadísticas del contexto proyectado. Esos indicadores se especifican como la variabilidad de tiempo, de localización y de situación. El empleo de uno o algunos de esos indicadores y su respectiva estimación necesaria en un caso específico, puede modificar relevantemente según las circunstancias de la zona y las tipologías de cada estación, generalmente esta información puede omitirse y/o ser reemplazarse con datos promedios o estimados.

Delineación General del modelo: al determinarse los datos para los indicadores de entrada, el modelo de zona irregular ejecuta evaluaciones geométricas sobre el trayecto de transmisión. Por ejemplo, en la modalidad de predicción de área se evalúa el horizonte radial del área a cubrirse.

Entonces, el modelo establece una atenuación de referencia, es decir un valor medio de atenuación, con respecto al espacio libre, ese valor es considerado por el modelo como una función continua de la distancia tal como se aprecia en la figura 3.3

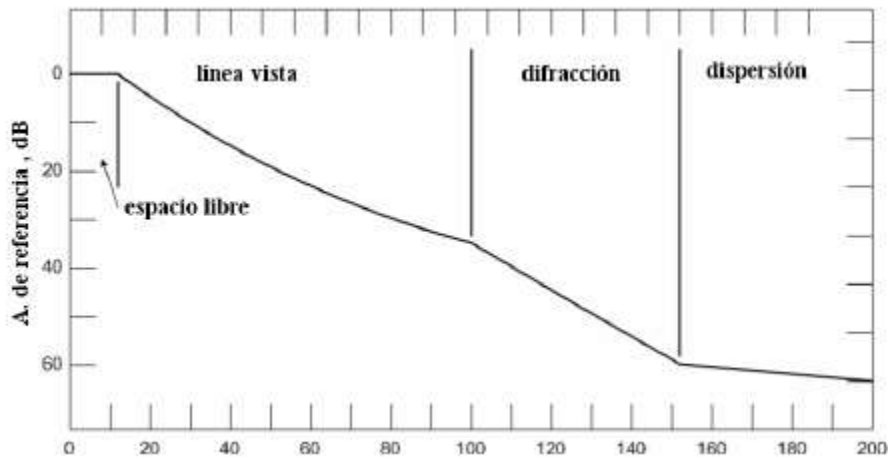


Figura 3.4 Atenuación de referencia vs. distancia.

Fuente: (Hufford, Longley, & Kissick, 1982)

En este gráfico se aprecian tres áreas: *línea vista*, *difracción* y *dispersión*. La primera es donde la curvatura de la tierra no impide la línea directa de transmisión de señales pero podrían ocurrir obstáculos como cerros, montes, etc. La atenuación de referencia se establece como una función logarítmica lineal del trayecto.

Varias veces se requiere conseguir una media de la atenuación para las características atmosféricas de una zona durante un año, para lo cual el modelo establece un promedio estadístico de atenuación de referencia para cada clase de clima definido.

Para estas deducciones el modelo emplea métodos teóricos de reflexión sobre suelo irregular, refracción en una atmósfera estándar, difracción en torno a la tierra y sobre obstrucciones agudas y dispersión troposférica. Esta mezcla de teoría básica y valores experimentales producen un modelo semi-empírico según la situación física y a determinados datos de referencia de las características y además satisface las leyes físicas adecuadamente bien, permitiendo extrapolar éstos desde los valores de referencia con un buen nivel de confiabilidad.

3.4 Cálculo del enlace de radio entre el campus Portoviejo de UTM y su extensión en Bahía de Caráquez

Antes que nada se precisó de instalar la aplicación *Radio Mobile* y una vez operativa la misma, se procedió a ubicar geográficamente los lugares donde se efectuará el enlace inalámbrico que comprendidos entre Universidad Técnica de Manabí (UTM) y el campus

universitario situado en Bahía de Caráquez a unos 60 Kms de distancia aproximadamente. Para ello, se utilizó también la aplicación *Google Earth*, ya que las nuevas versiones de *Radio Mobile* permiten importar ubicaciones desde *Google Earth*.

Los pasos a seguir para el cálculo del enlace son los siguientes:

- Creación las ubicaciones en *Google Earth*.
- Creación unidades en *Radio Mobile* desde las ubicaciones en *Google Earth*.
- Creación una red en *Radio Mobile*.
- Creación un sistema en *Radio Mobile*.
- Cálculo e interpretación del enlace.
- Exportar el enlace a la aplicación: *Google Earth*.
- Creación las ubicaciones en *Google Earth*

El primer procedimiento fue establecer en la aplicación *Google Earth* los principales lugares geográficos formados por la Universidad Técnica de Manabí (UTM) y la extensión de Bahía de Caráquez. Para ello se realizó la navegación a través del *Google Earth* hasta localizar ambos lugares, a los cuales se le hizo una marcación con la herramienta de “Marcadores”. Además de etiquetar la UTM y su extensión de Bahía, también se marcaron sobre el mapa las localidades: Vientos y Hojas como estaciones repetidoras.

Esto permite obtener automáticamente y de forma más forma más fácil, las latitudes y longitudes de las localizaciones pertenecientes al enlace. De otra forma habría que tener dichos parámetros a *priori* para su introducción más tarde en la aplicación *Radio Mobile*. (Ver Fig. 3.5)

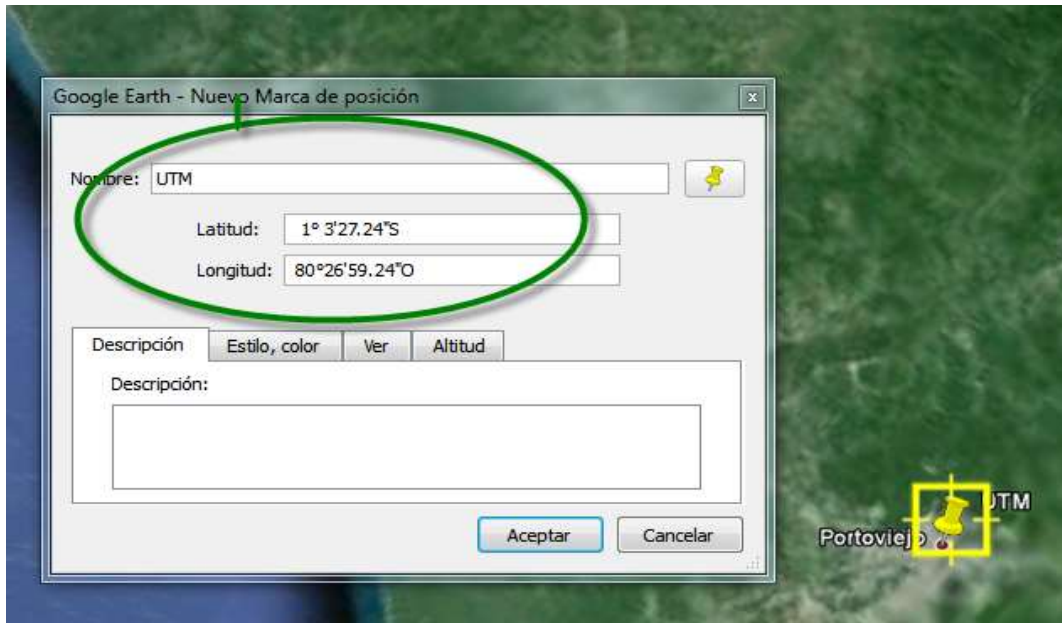


Fig. 3.5 Coordenadas de la UTM, Portoviejo (generada mediante Google Earth)

Creación de unidades en Radio Mobile desde las ubicaciones en Google Earth

En esta sección se procedió a importar las respectivas latitudes de la UTM, la extensión universitaria de Bahía y las unidades repetidoras, permitiendo crear las unidades sobre la aplicación *Radio Mobile*.

En este caso concreto sólo será necesario definir la ubicación de la estación base y los puntos adicionales (es indiferente su emplazamiento) para la estación suscriptora. Para ello desplegamos el menú “Unidades” desde el siguiente acceso directo de la barra de herramientas:

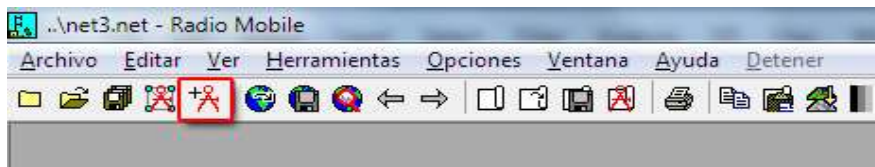


Figura 3.6 Barra para crear las Unidades

Elaborada por el autor

Radio Mobile, cuenta con tres formas diferentes de entrar los valores de las latitudes y longitudes geográficas como se muestra en el Anexo 8, pero en este caso utilizamos la variante “2” que resultó ser más práctica y rápida.

Con el botón derecho del *mouse* sobre cada uno de los marcadores existentes en el mapa (o sobre las ubicaciones situados en el panel izquierdo) de la aplicación *Google Earth*, se pudieron copiar las latitudes y longitudes de la extensión universitaria de Bahía y luego sobre la ventana: “Propiedades de las unidades” de *Radio Mobile* y a través el botón: “Pegar”, se importó la longitud y latitud de Bahía. (Fig. 3.6)

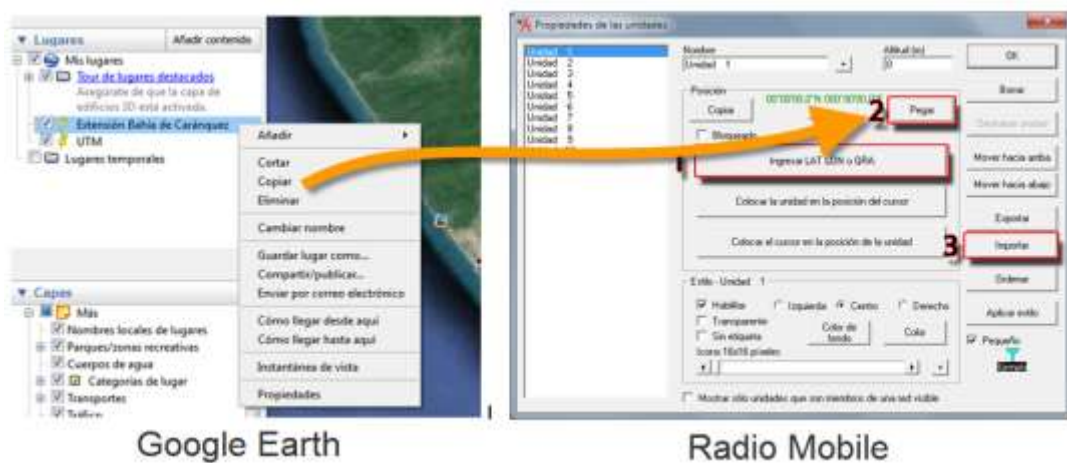


Figura 3.7 Opción para exportar la latitud y la longitud de la Extensión de Bahía de Caráquez

Elaborada por el autor

En la figura 3.7 se muestra la entrada de los valores para la unidad: “BAHÍA”. Este proceso fue necesario repetirlo cuatro veces hasta obtener las unidades restantes (VIENTOS, HOJAS Y UTM PORTOVIEJO) que soportarán el enlace inalámbrico.

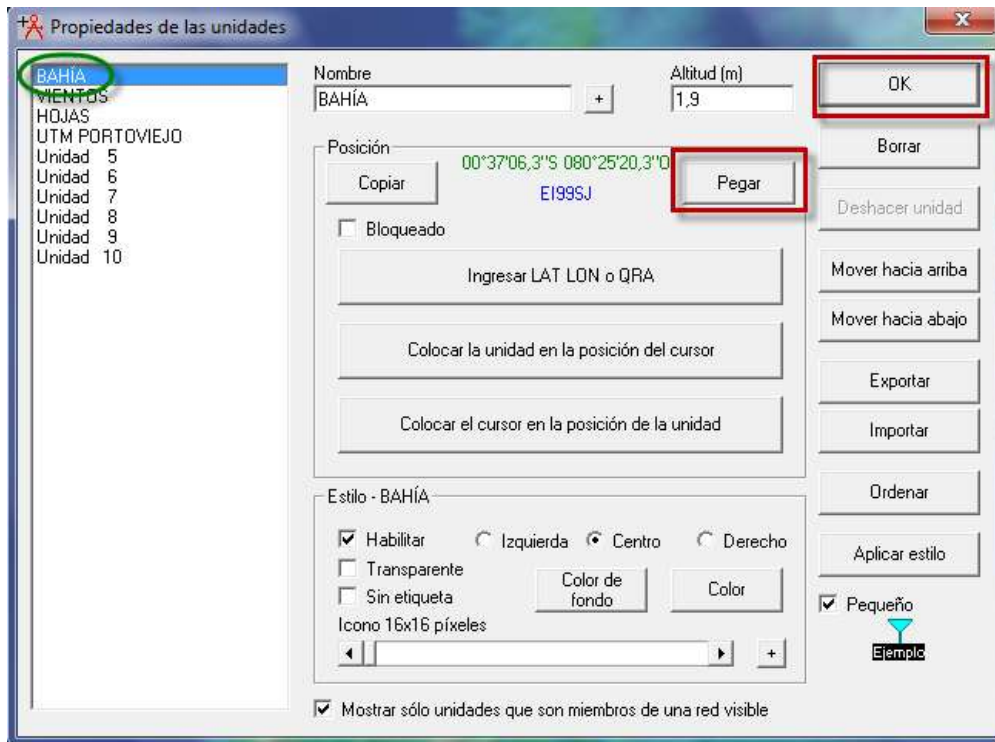


Figura 3.8 Unidad de BAHIA

Elaborada por el autor

3.4.1 Creación de la red en Radio Mobile

Una vez definida la ubicación de las estaciones base, llega el momento de definir el detalle radioeléctrico la red. Para ello se accedió al menú “Propiedades de Redes” desde la barra de herramientas (*Archivo* → *Propiedades de redes* o *Ctrl + N*) que da el acceso detallado para configurar los elementos que integran la red AIRMAX en propuesta. (Figura 3.8)

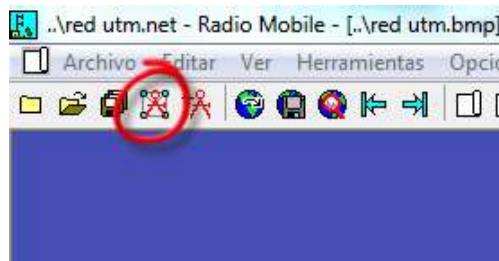


Figura 3.9 Acceso a la herramienta: Propiedades de las redes

Elaborada por el autor

Este apartado consta de cuatros pasos fundamentales que permiten predefinir los parámetros fundamentales para la simulación del radio enlace AIRMAX.

En este caso, en la ficha “Sistemas”, se definieron los parámetros como:

- Nombre del sistema: *AIRMAX*
- Potencia del Transmisor: *13 dBm*
- Sensibilidad o umbral del receptor: *-107 dBm*
- Ganancia de la antena: *13,2 dBi*
- Altura de la antena: *2 metros*

Como se puede apreciar la antena seleccionada es una antena omnidireccional, que permite comprobar el rendimiento esperado para una potencia como la configurada (*13 dBi*) correspondiente a una antena de sector en todas las direcciones. De esta forma se evita tener que orientar la antena para cada simulación concreta y poder predecir el alcance del sector independientemente de donde esté apuntando.

Los parámetros restantes se asumen por defecto. En la figura 3.9 se muestran estos valores predefinidos.

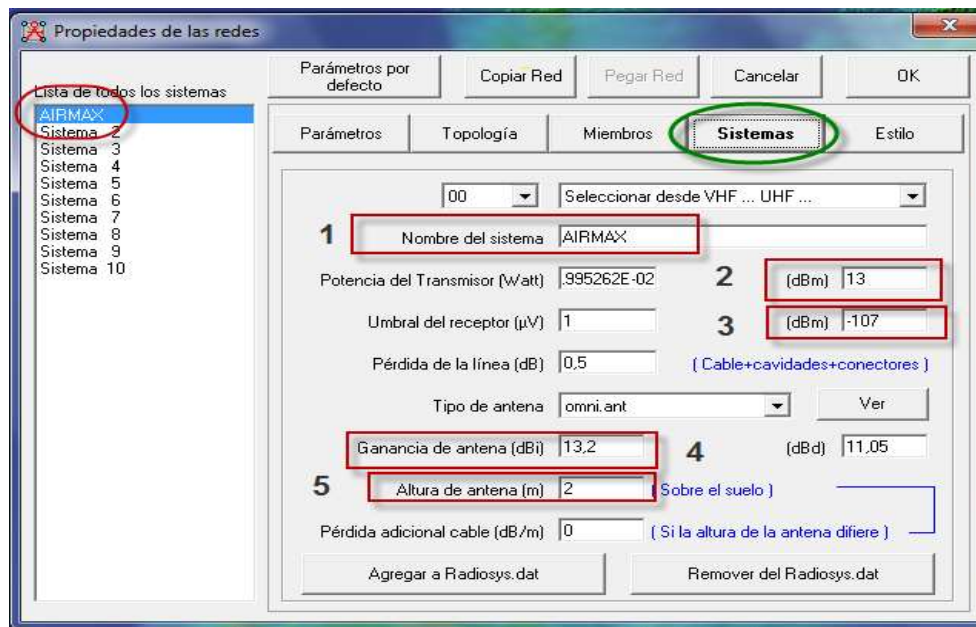


Figura 3.10 Configuración de los parámetros con la ficha “Sistemas”

Elaborada por el autor

En la opción “Topología” configuramos la red AIRMAX en el modo “Red de datos, cluster (Nodo/Terminal)”. Sucede que aunque se percibe una arquitectura de red punto – multipunto, es necesario analizar el enlace de forma independiente compuesto por tres grupos de sub redes. En la figura 3.10 se muestra esta configuración.

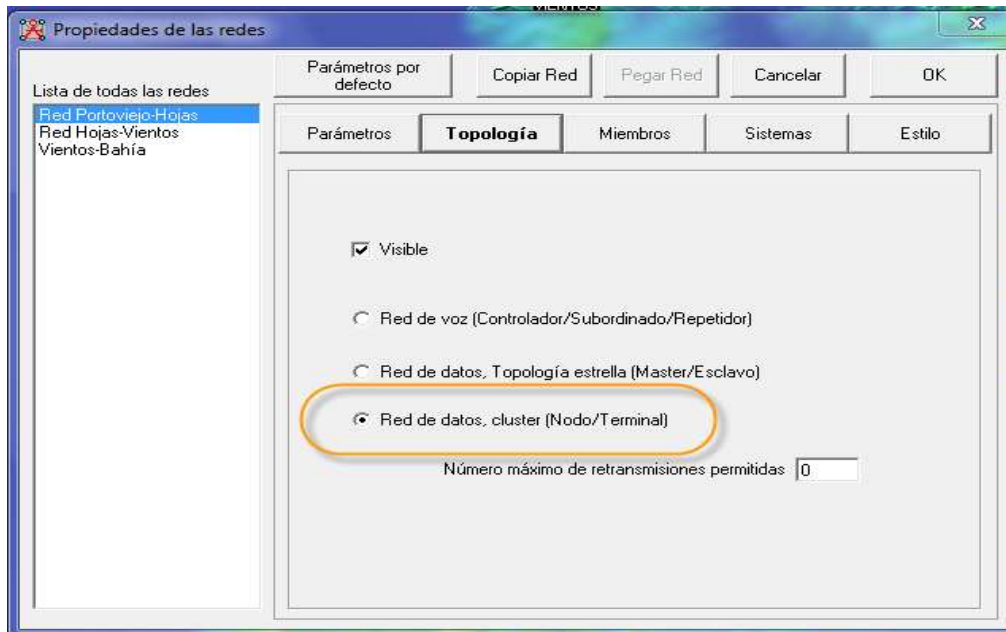


Figura 3.11 Definición de la Topología a utilizar

Elaborada por el autor

En la opción “Miembros” se configuró la red AIRMAX de la siguiente manera. Inicialmente asumimos la idea de implementar una red punto a multipunto como ya se explicó en el párrafo anterior, pero por características propias de *Radio Mobile*, definimos primero tres sub redes para luego obtener la simulación como una sola red.

Para crear la primera sub red: *Portoviejo-Hojas* fue necesario activar las casillas de: UTM PORTOVIEJO y HOJAS como se muestra en la figura 3.11. Declarando el rol de cada uno de los dos miembros de la sub red. En este caso a UTM PORTOVIEJO se le declaró como el nodo y a HOJAS como el terminal.

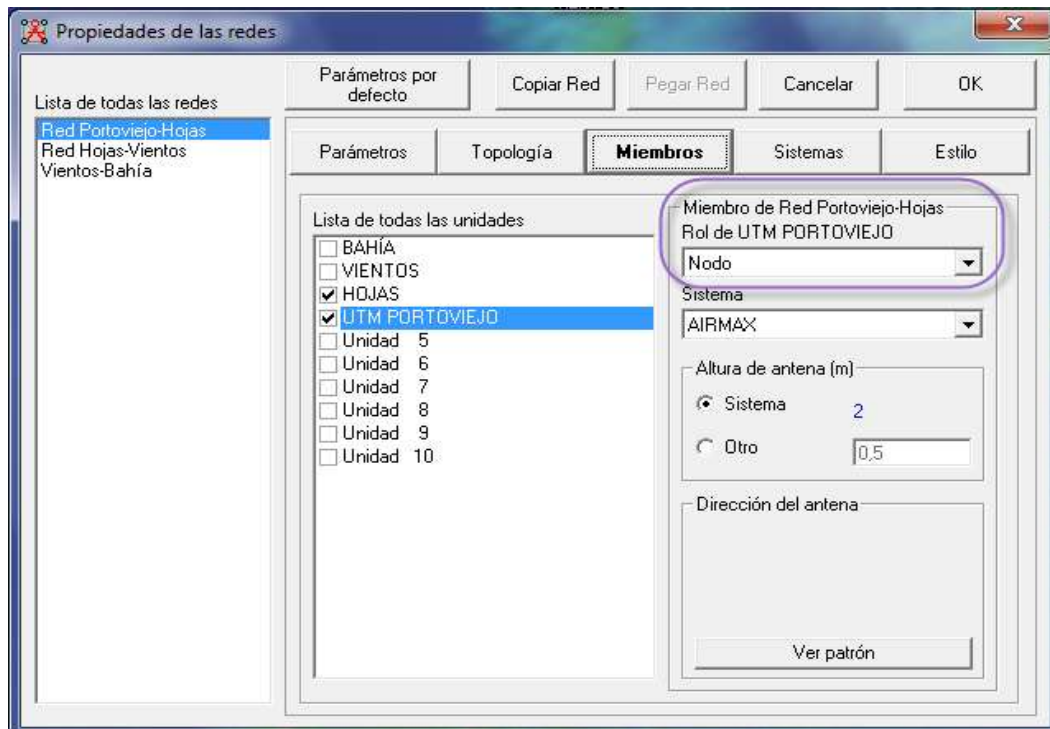


Figura 3.12 Definición de los miembros: Red Portoviejo – Hojas

Elaborada por el autor

Para la declaración de los otros miembros de las sub redes restantes, se procedió de forma similar. Esta secuencia de roles se muestra en los Anexos 9 y 10.

El resultado fue el siguiente:

- Red Hojas (nodo) – Vientos (terminal)
- Red Vientos (nodo) – Bahía (terminal)
- Cálculo e interpretación del enlace

En este apartado se puede empezar a configurar la forma en la que serán visualizados los resultados. Para ello vamos a las “Propiedades del Mapa” (*Archivo* → *Propiedades del Mapa* o *F8*). En la ventana que aparece debemos configurar los siguientes parámetros:

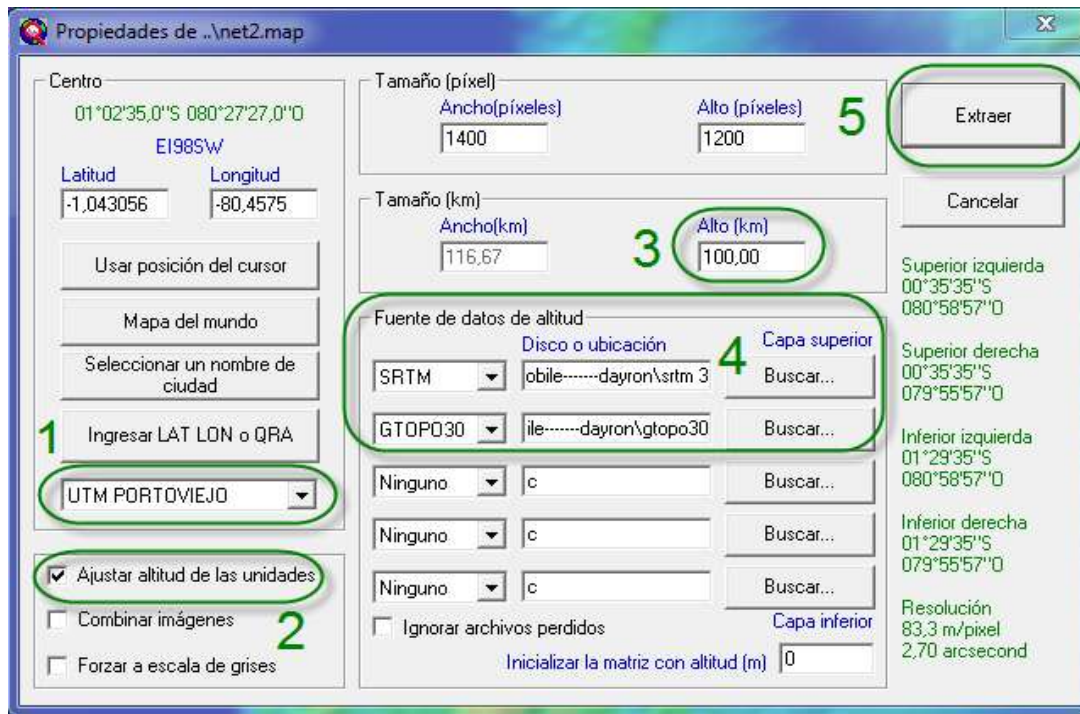


Figura 3.13 Ventana “Propiedades del Mapa”

Elaborada por el autor

Centro de la imagen. Corresponder con la ubicación de la estación base.

Se activa para que la altura sobre el nivel del mar se adecúe a la incluida en la cartografía.

Directorio donde está la base de datos de los mapas.

La altura del mapa.

Para extraer el mapa sobre la pantalla donde se realizará la simulación.

Por último se debe parametrizar el área de cobertura de cada sub red al efectuarse la simulación, para lo que accedemos al menú que se recoge en la siguiente imagen a través de F3.

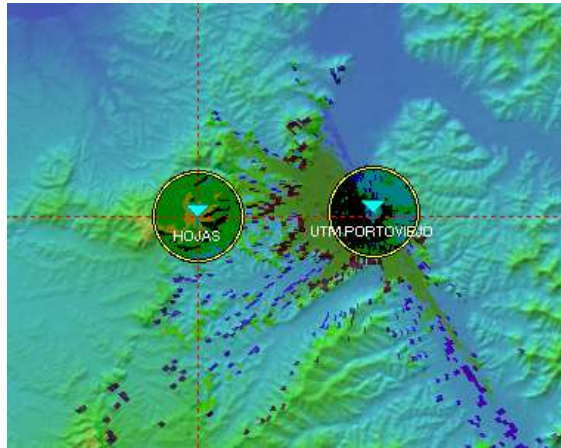


Figura 3.14 Área de cobertura entre UTM y Hojas

Elaborada por el autor

De esta forma se puede definir el color del área de cobertura de todo el radio enlace AIRMAX. (Fig. 3.15 y 3.16)

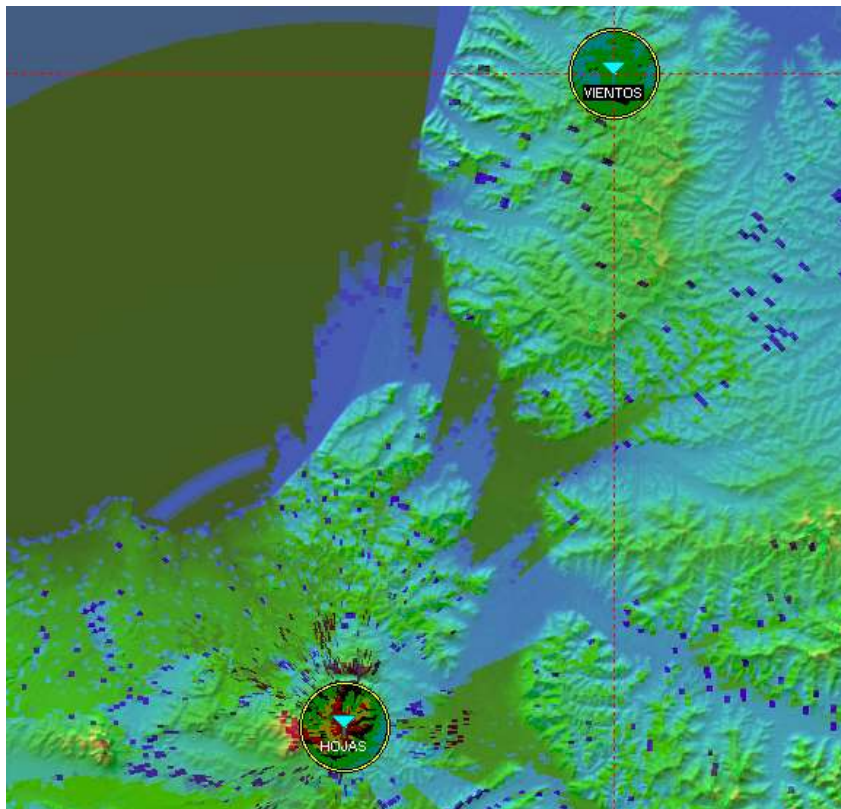


Figura 3.15 Área de cobertura del enlace Hojas – Vientos

Elaborada por el autor

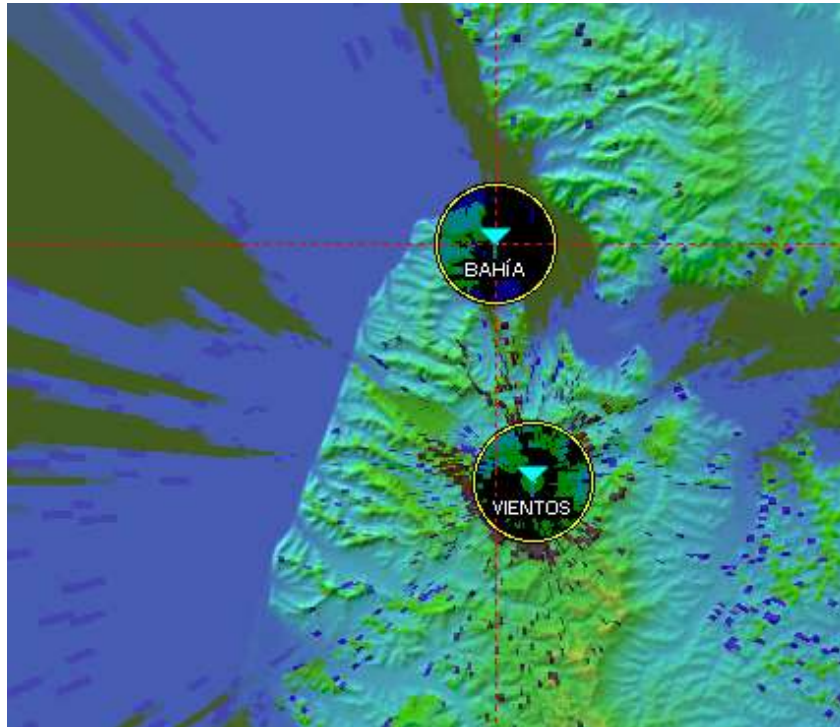



Figura 3.16 Área de cobertura del enlace Vientos – Bahía

Elaborada por el autor

3.4.2 Cálculo e interpretación del enlace AIRMAX

Una vez configurado todos los parámetros, se realizó el cálculo e interpretación del radio enlace, para ello se seleccionó el icono  en la barra de herramientas del software.

En la ventana que surge aparece la elevación del terreno, así como la distancia entre los dos radios, la primera interpretación que podemos hacer es que es viable el enlace, ya que el verde de la línea vista muestra la posibilidad del enlace, caso contrario, la línea vista sería roja y de haber problemas por la zona de *Fresnel* o reflexiones, se mostraría de manera segmentada. Se muestra que los cuatro enlaces planteados son posibles de ejecutar sin interrupciones ni obstáculos en la línea vista.

Uno de los valores más importantes es el Nivel RX en *dBm*, cuanto menor sea mejor calidad tendrá el enlace. En nuestro caso tenemos $-98,1 \text{ dBm}$ por lo que el enlace es viable su implementación. (Ver Figura 3.17)

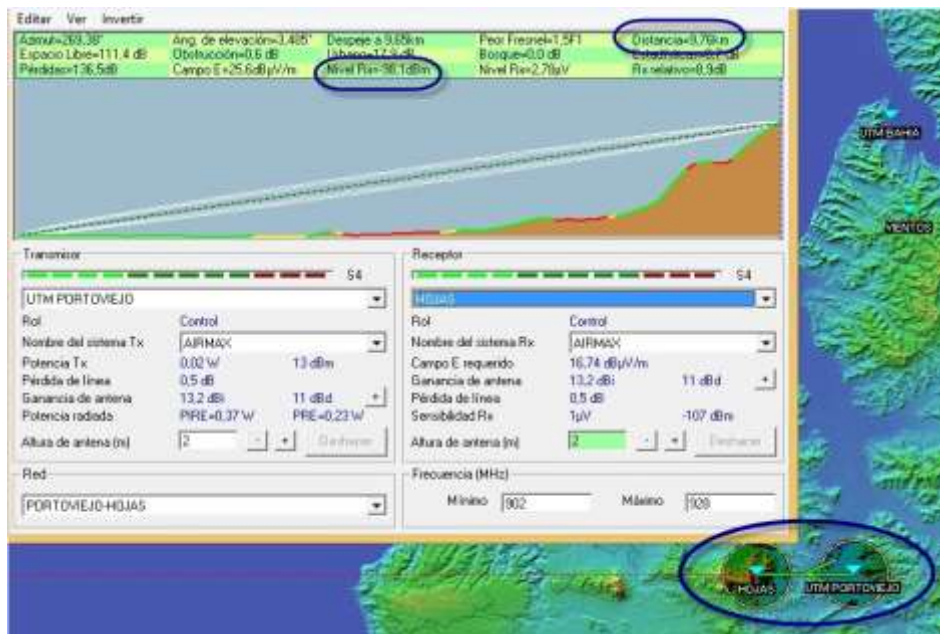


Figura 3.17 Simulación entre Portoviejo y Hojas

Elaborada por el autor

En los Anexos 11 y 12 aparecen los esquemas restantes entre los otros tramos de redes, corroborándose la factibilidad de implementar el enlace AIRMAX, debido a que también están marcados con flechas de color verde.

3.4.3 Exportar el enlace a la aplicación: Google Earth

Finalmente, se procede a exportar el enlace a la aplicación *Google Earth*, para ello buscamos en la ventana del enlace en el menú “Editar” la opción “Exportar a... (Ctrl + F9)”. Se activa la opción *Google Earth* y luego presionamos el botón *OK*. (Figura 3.18)



Figura 3.18 Enlace exportado a Google Earth

Elaborada por el autor

El resultado final de la exportación se muestra en el Anexo 13 Aquí se obtiene la simulación del enlace AIRMAX pero con la herramienta de *Google Earth*. En la figura 3.19 se observa la estructura de red adoptada para el enlace inalámbrico AIRMAX.

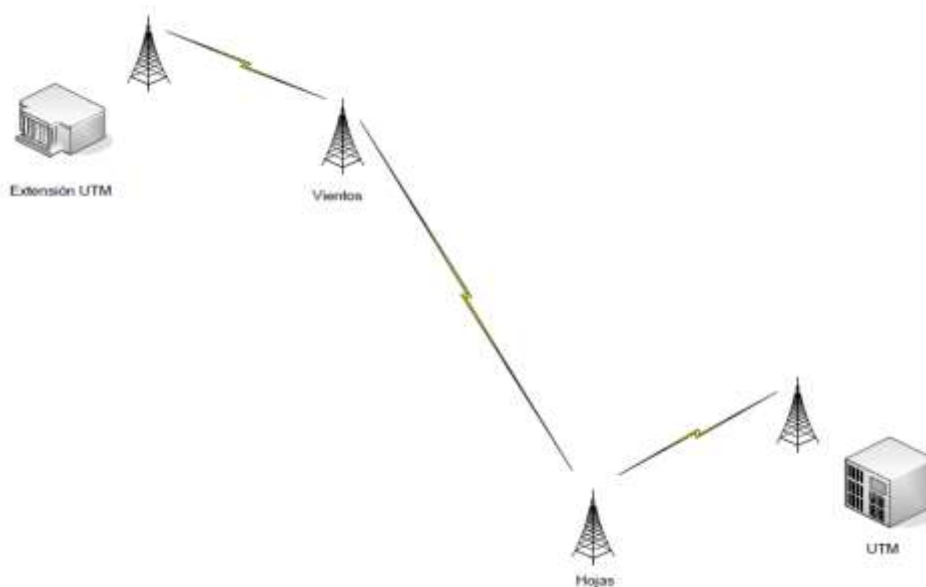


Figura 3.19 Estructura de red propuesta para el enlace AIRMAX

Elaborada por el autor

3.4.4 Cálculo del presupuesto de potencia del enlace

El elemento principal al instalar un enlace de red a larga distancia es la presencia de línea visual (LOS: *Line of Sight*). Las técnicas de microondas terrestres no permiten cerros elevados, bosques u otros impedimentos en el trayecto de un enlace a larga distancia. Debe considerarse la altura de la tierra entre dos lugares antes de establecer si un enlace es factible.

En el caso de existir alturas entre dos sitios, como ocurre en el enlace entre la UTM y su extensión de Bahía, hay que considerar que los impedimentos pueden ser convertidos en activos. Los cerros pueden obstruir la señal, pero también podrían intervenir como repetidoras, estas son nodos dispuestos para transferir el tráfico no consignado al nodo. Para el caso que nos ocupa se destinó colocar dos estaciones repetidoras en las locaciones de “Hojas” y “Viento”, como ya se explicó anteriormente, para garantizar un enlace permisible entre la UTM y su extensión de Bahía. (Fig. 3.20)

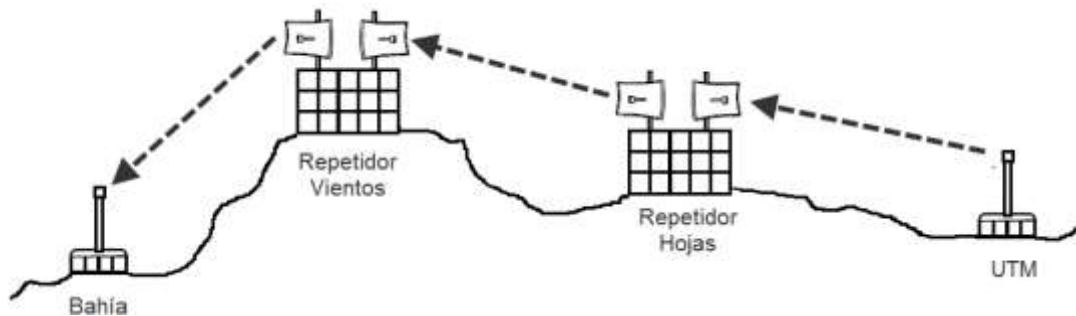


Figura 3.20 Configuración de los radio enlaces

Elaborada por el autor

Cada estación con su antena relacionada, distanciados por el trayecto a cubrir. Para establecer una transmisión entre los dos, los equipos necesitan que la señal de la antena tenga una potencia sobre un mínimo establecido.

Para determinar si el enlace es viable en teoría, se llevará a cabo el cálculo del presupuesto de potencia. La factibilidad de que las ondas puedan ser transmitidas o no entre los equipos obedece a la calidad de los radios que se esté empleando y de la atenuación de la señal, conocida como **pérdida en la trayectoria**.

El presupuesto o balance de potencia es una manera de cuantificar las características del enlace, donde la potencia recibida en un enlace está determinada por tres factores: la **potencia de transmisión**, la **ganancia de la antena transmisora** y la **ganancia de la antena receptora**.

Si esa potencia, menos las pérdidas de trayectoria es mayor que el nivel mínimo de señal recibida del receptor tendremos un enlace viable. La diferencia entre el nivel de la señal recibida y el nivel mínimo de señal recibida (también llamado **sensibilidad del receptor**) es el **margen del enlace**.

Otra variable que se debe tener en cuenta para el cálculo planteado es las **pérdidas en los cables**, producido fundamentalmente por la clase de cable empleado y su extensión.

En cables coaxiales pequeños la pérdida de señal incluidos los conectores es muy baja, entre 2 y 3 dB. Se recomienda utilizar cables que sean lo más corto posible.

La gráfica que se observa en la Figura 3.21, muestra el nivel de potencia a lo largo de la trayectoria en un radioenlace. El transmisor produce una cierta potencia P_t . Una pequeña

cantidad se pierde en la atenuación A_t del cable entre el transmisor y la antena. La antena transmisora enfoca la potencia hacia la dirección deseada, sumando una ganancia G_t . A la salida de la antena transmisora tenemos el nivel máximo de potencia en todo el enlace. Este nivel se denomina PIRE (Potencia Isotrópica Irradiada Equivalente) y se expresa en dBm . En inglés se llama EIRP (*Equivalent Isotropic Radiated Power*).

Luego tendremos las pérdidas en el espacio (que aumentan cuadráticamente con la distancia entre los extremos del enlace) y las debidas a la absorción, cuya suma es la pérdida en el trayecto (*path loss*). La antena receptora suministra la ganancia G_r , mientras que el cable entre la antena receptora y el receptor induce la atenuación A_r . Si la potencia P_t que llega a la entrada del receptor es mayor que la sensibilidad del receptor por un cierto margen M , el enlace es viable.

El margen del enlace se refiere a un margen de seguridad que toma en cuenta diversos factores que no son posibles de considerar en los diferentes modelos de propagación. Al restar el margen se está considerando como una pérdida, es decir estamos tomando el escenario más pesimista, dicho de otra manera, si el enlace se da con el peor de los casos también debe darse en otras situaciones más favorables.

El valor de M determina el grado de confiabilidad del enlace. Este valor debe ser al menos 10 dB y para enlaces críticos es mejor apuntar a un margen de 20 dB .

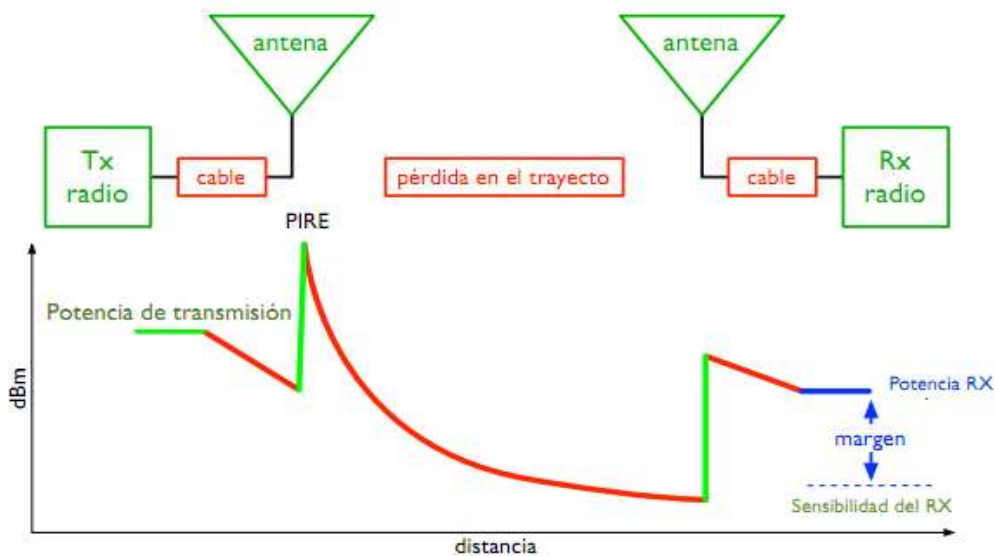


Figura 3.21 Cálculo del Presupuesto de Potencia del Enlace

Fuente: (ITU-T, 2006)

Para el cálculo del presupuesto de potencia partimos de la idea que aunque los cálculos son teóricos existen algunos elementos que no se han considerado como: interferencias de otras redes (WLAN, *bluetooth*¹¹), ruido industrial (hornos de microondas), pérdidas atmosféricas (humedad del aire, dispersión, refracción) que afectarán el rendimiento y hacen que el resultado sea una aproximación.

Los datos iniciales se dan a continuación:

$$f = \sqrt{902 \cdot 928} = 914,9 \text{ MHz} \quad (2.14)$$

$$Lfs = 32,45 + 20 \cdot \log(D) + 20 \cdot \log(f) \quad (2.15)$$

Lfs : Pérdida en el espacio libre (dB)

f : Frecuencia (MHz)

D : Distancia (Km)

Enlace UTM Portoviejo – Hojas: $D = 9,76 \text{ Km}$

Enlace Hojas – Vientos: $D = 40,39 \text{ Km}$

Enlace Vientos – Bahía: $D = 9,91 \text{ Km}$

Tabla 3.5: Cálculo del Presupuesto de Potencia para el Enlace UTM Portoviejo-Hojas.

Elaborada por el autor

Cálculo del Presupuesto de Potencia para el Enlace UTM Portoviejo-Hojas	
13	Potencia del Transmisor P_t
13,2	Ganancia de Antena Transmisora G_t
-2	Pérdida del Cable dela lado del Tx A_t
13,2	Ganancia de Antena Receptora G_r
-2	Pérdida del Cable dela lado del Tx A_r

¹¹ Bluetooth es una especificación industrial para Redes Inalámbricas de Área Personal

35,4	Ganancia Total G
-111,47	Pérdida en el espacio libre Lfs
-76,07	Nivel de señal esperado N
-107	Sensibilidad del Rx Sr
30,93 dB	Margen del Enlace $M = N - Sr$

Tabla 3.6: Cálculo del Presupuesto de Potencia para el Enlace Hojas-Vientos

Elaborada por el autor

13	Potencia del Transmisor Pt
13,2	Ganancia de Antena Transmisora Gt
-2	Pérdida del Cable dela lado del Tx At
13,2	Ganancia de Antena Receptora Gr
-2	Pérdida del Cable dela lado del Tx Ar
35,4	Ganancia Total G
-123,8	Pérdida en el espacio libre Lfs
-88,4	Nivel de señal esperado N
-107	Sensibilidad del Rx Sr
18,6 dB	Margen del Enlace $M = N - Sr$

Tabla 3.7: Cálculo del Presupuesto de Potencia para el Enlace Vientos-Bahía

Elaborada por el autor

13	Potencia del Transmisor Pt
13,2	Ganancia de Antena Transmisora Gt
-2	Pérdida del Cable dela lado del Tx At

13,2	Ganancia de Antena Receptora G_r
-2	Pérdida del Cable del lado del Tx A_r
35,4	Ganancia Total G
-111,6	Pérdida en el espacio libre L_{fs}
-76,2	Nivel de señal esperado N
-107	Sensibilidad del Rx S_r
30,8 dB	Margen del Enlace $M = N - S_r$

Se puede razonar que las pérdidas promedio dependen sólo de las características del transmisor, del receptor y del ambiente de propagación. Es decir que podemos calcular la potencia recibida sin considerar parámetros como: ancho de banda del canal, relación señal a ruido, tasa de bits, entre otros.

Obsérvese que para los tres casos tanto la ganancia de la antena transmisora como la de la antena receptora tienen el mismo valor, los mismos corresponden con la ficha técnica del equipamiento propuesto. (Ver Anexo 14)

Por otra parte, si comparamos los valores obtenidos en cuanto al margen del enlace M , notaremos que están por encima de los 20 dB, por lo que una vez más se corrobora que el enlace en general funcionará.

3.4.5 Resultados de la simulación

La figura 3.21 es una imagen topográfica obtenida de la base de datos SRTM3, contiene información de altura de terreno con la que Radio Mobile establece la variable de terreno irregular Δh , para evaluar las pérdidas de transmisión de cada enlace. En la figura 3.22 se aprecia una imagen aérea del área. Las dos figuras muestran la ubicación de los puntos que constituyen la red y el color del enlace muestra si hay línea vista y si se satisfacen las exigencias del rango de recepción de la tabla 3.8

Tabla 3.8: Tabla 10: Resumen de datos de cada terminal

Elaborada por el autor

Nº Enlaces	Terminal	Ganancia Ant. (dBi)	Altura (m)	Azimut (°)	Potencia (mW)	Nivel de Rx (dB)	Dist. (Km)	Pérdidas (dB)	Pérdidas (dB/m)
1	Portoviejo-Hojas	13,2	2	269,38	13	-98,1	9,76	0,5	0,2
2	Hojas-Vientos	13,2	2	22,26	13	-99,0	40,39	0,5	0,2
2	Vientos-Bahía	13,2	2	349,53	13	-91,9	9,91	0,5	0,2

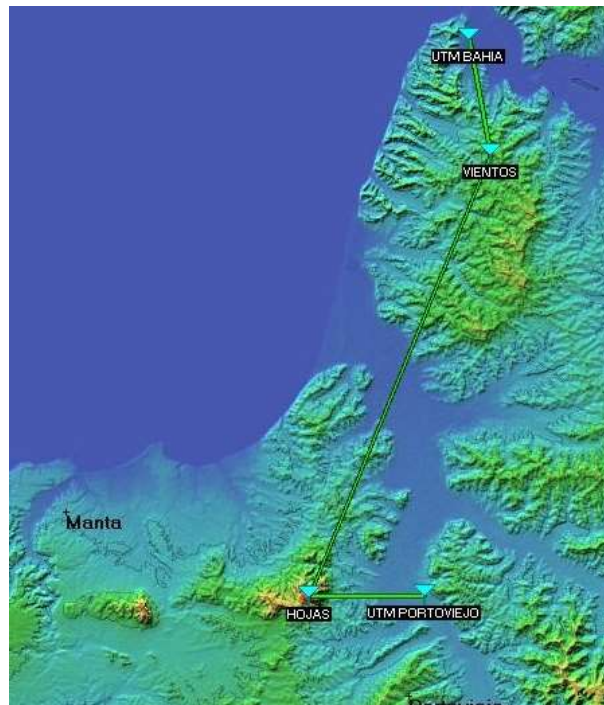
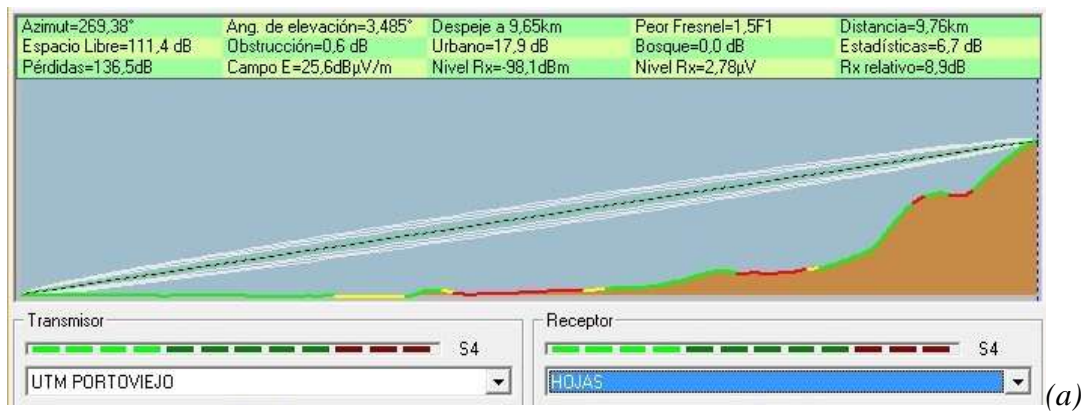


Figura 3.22 Proyección de los enlaces de la red AIRMAX: vista SRTM3



Figura 3.23 Vista aérea del enlace AIRMAX desde Google Earth

En la figura 3.24 (a), (b) y (c) se aprecian los perfiles topográficos de la zona de cada enlace. En las figuras se muestran también las pérdidas de propagación, trayecto entre terminales, rango de recepción calculado en el receptor y la peor zona de *Fresnel* perturbada por las anomalías del área. Estos valores y la línea vista verde muestran la posibilidad del enlace, si no fuera factible un enlace el color sería rojo y la presencia de problemas por la zona de *Fresnel* o reflexiones, se muestra en forma segmentada. Todos los enlaces planteados son posibles de efectuar sin interferencias ni obstrucciones en la línea vista.



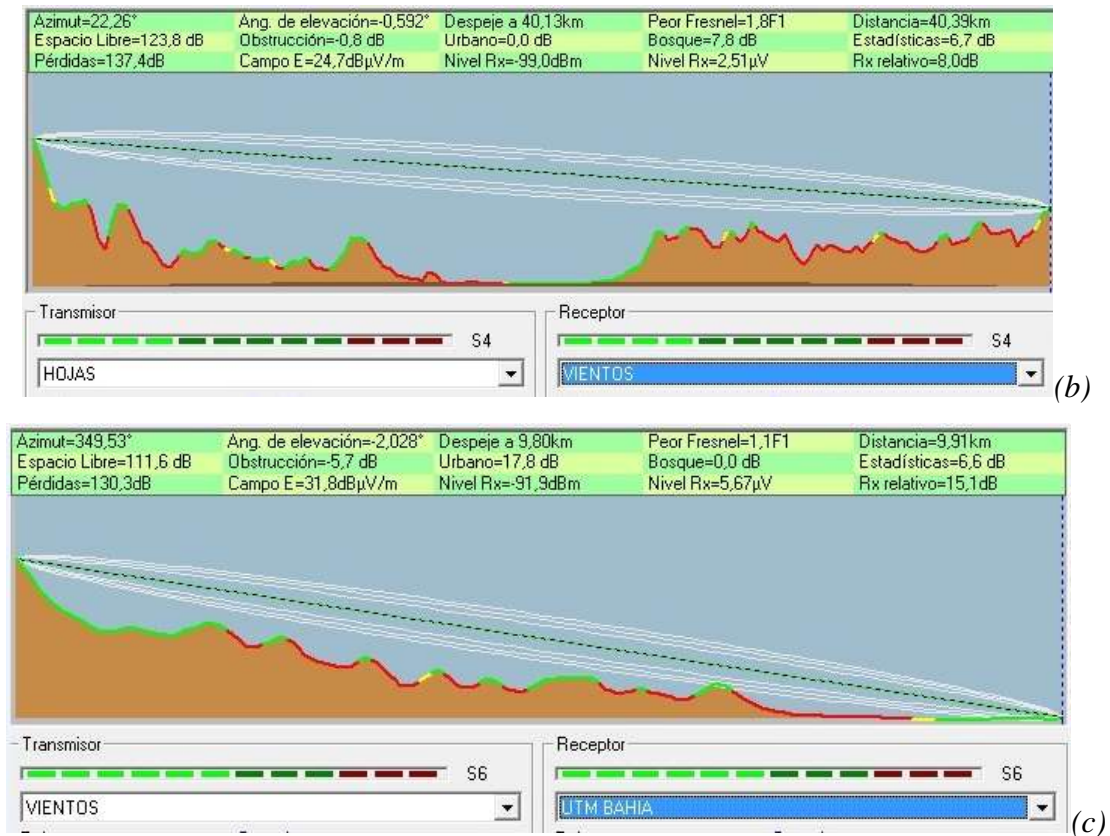


Figura 3.24 Perfil topográfico de los enlaces implementados. (a) UTM PORTOVIEJO – HOJAS; (b) HOJAS – VIENTOS; (c) VIENTOS – UTM BAHIA

3.5 Descripción de los equipos propuestos

Como WiMAX es una tecnología completamente diferente de WiFi pero que también puede operar tanto en bandas licenciadas como exentas de licencia. Por tanto se sugirió utilizar la banda ISM no licenciada (libre de pago).

Los equipos propuestos para los cuatro terminales que forman cada enlace, pertenecen al grupo de fabricantes de equipos de redes *Ubiquiti*, específicamente *airMax*. Se pretender utilizar equipos repetidores con dos tarjetas de radio para poder operar con todos los radios a toda capacidad y estén actos para su funcionamiento en exteriores en la banda de frecuencia de los 900 Mhz siguiendo el estándar IEEE 802.16 fijo; el *chipset* interno permitirá hasta 13 dBm de potencia de salida.

Las antenas instaladas en los equipos de los nodos y en los clientes son todas del rango de frecuencias de 902 MHz a 928 MHz con polarización dual.

Las antenas seleccionadas para los equipos de los nodos son antenas sectoriales modelo AM-9M13-120 de 13,2 dBi, *VSRW* típica de 1.5: 1, polarización horizontal con un

ángulo de apertura horizontal de 109° y un ángulo de apertura vertical de 120°. (Figura 3.25)



Figura 3.25 Antena modelo AM-9M13-120 para Rocket M

Fuente: www.ds3comunicaciones.com

La gráfica del patrón de radiación de esta antena se muestra en el Anexo 14.

3.5.1 Área de cobertura

El área de cobertura como se explicó anteriormente, depende de la topografía y las relaciones señal a ruido entre el nodo y las estaciones terminales. El área de cobertura de la zona en mención es considerablemente amplia debido principalmente a que se ha aumentado el alcance utilizando como estaciones repetidoras a las localidades de Hojas y Vientos, por estar enclavadas en lugares elevados, permitiendo tener línea de vista con la gran mayoría del terreno a cubrir. En las figuras 3.14 y 3.15 muestran el área marcada correspondiente a la zona de cobertura del último tramo de la red AIRMAX.

El problema de la cobertura a distancias grandes puede ser solucionado colocando un repetidor en un punto estratégico de la zona que se desea cubrir.

Existen dos formas de crear un repetidor: la primera es crear una “extensión” del nodo original, sumando al tráfico que se tiene en el nodo el generado por el repetidor. El segundo es crear un enlace inalámbrico con todo el tráfico corriendo hacia el *backbone*. La forma correcta de implementar éstos repetidores permitirá evitarse muchos dolores de

cabeza cuando el número de usuarios y tráfico crezcan. Se sugiere que se sea implementada la primera variante por ser la más económica, por lo que esta configuración es la adoptada para los puntos de “Hojas” y “Vientos”.

CONCLUSIONES

En este proyecto se ha presentado un estudio de las principales tendencias en el diseño y planificación de sistemas de acceso inalámbrico de banda ancha así como un conjunto de pasos que organiza el diseño de este tipo de redes y su aplicación a un contexto rural, específicamente en la UTM de Portoviejo.

La sistematización del estado del arte de las redes de acceso inalámbricas permitió:

Seleccionar la tecnología WiMAX dada sus características de asegurar largos alcances, robustez frente a las interferencias en ambientes de reducida o ninguna visibilidad y superar el empeoramiento de las condiciones del canal de radio. Esta tecnología ofrece una solución ventajosa frente a alternativas como VHF, HF, VSAT y WiFi para el acceso inalámbrico de banda ancha en entornos rurales.

Durante el proceso de simulación se pudo observar que las pérdidas promedio dependen sólo de las características del transmisor, del receptor y del ambiente de propagación. Es decir que podemos calcular la potencia recibida sin considerar parámetros como: ancho de banda del canal, relación señal a ruido, tasa de bits, entre otros.

Los cálculos del presupuesto de potencia permitieron tener una aproximación de los resultados, aunque no se consideraron otros elementos como: interferencias de otras redes (WLAN), ruido industrial (hornos de microondas), pérdidas atmosféricas (humedad del aire, dispersión, refracción) que afectarán el rendimiento y hacen que el resultado sea una aproximación.

RECOMENDACIONES

De acuerdo a los resultados d este trabajo, se recomienda lo siguiente:

- Validar la propuesta de diseño con la evaluación de los parámetros de desempeño de la red (demora, tasa de paquetes con errores (BER), tasa de paquetes perdidos (PLR), *jitter*) mediante el empleo de simuladores de redes inalámbricas como el OPNET.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Araujo, G., & otros. (2008). *Redes Inalámbricas para Zonas Rurales*. Lima: Grupo de Telecomunicaciones Rurales, GTR-PUCP.
- Barbán, M. (2010). *Propuesta para realizar Ingeniería de Tráfico en el dorsal nacional IP/MPLS*. Universidad de Oriente.
- Belmonte, P. (2008). *LA TECNOLOGÍA WIMAX*. Recuperado el Abril de 2011, de <http://www.pedrocores.com/wimax.pdf>
- Calero, N. (2009). *Análisis comparado de las diferentes alternativas tecnológicas de conectividad*. Recuperado el Mayo de 2013, de <http://www.itu.int/osg/spu/spunews/tecnologia/comparativa.html>
- Caroline, G. (2010). *Research Report, Lead Analyst*. Recuperado el Junio de 2011, de <http://www.arcchart.com>,
- Carpenter, R. (2002). *Lightning Strike Protection, Lightning Eliminators & Consultants*. Obtenido de [/www.lightningeliminators.com](http://www.lightningeliminators.com): <http://www.lightningeliminators.com>
- Carpenter, R. B. (2000). *Designing for a low resistance earth interface (Grounding), Lightning Eliminators & Consultants*. Obtenido de www.lightningeliminators.com: <http://www.lightningeliminators.com>
- Congling, Z. (2008). Refined WiMAX 16e network planning. *COMUNICATE- Huawei Magazine*, p. 31-33.
- Estrada, Y., & Camacho, C. (2009). *Estudio y diseño de una red WiMAX caso práctico Fastnet-Riobamba*. Riobamba: Escuela Superior Politécnica del Chimborazo.
- Finneran, M. (2004). *WiMax versus Wi-Fi. Una comparación de Tecnologías, mercados, y Planes de Negocios*. Recuperado el Noviembre de 2013, de DBRN Asociados, Inc.: <http://ocw.upm.es/ingenieriatelematica/redesy serviciosderadio/contenidos/rsrdO CW/web-05-06/Finneran.pdf>
- Fonseca, F. (2008). *Acceso inalámbrico de banda ancha, propuesta para Cuba*. Facultad de Ingeniería Eléctrica, Universidad Central “Marta Abreu” de las Villas.
- Fonseca, F. (2008). *Conferencia sobre Redes Inalámbricas de Acceso de Banda Ancha, WiFi y WiMAX*. La Habana: Centro de Preparación Nacional de ETECSA.

- Fonseca, F. (2008). *Cuba y los sistemas BWA. Conferencia del Curso de Redes Inalámbricas de Acceso de Banda Ancha WiFi y WiMAX*. La Habana: Centro Nacional de Preparación de ETECSA.
- Forado, R. (2008). *Seguridad en redes WiMAX*. Recuperado el Diciembre de 2013, de Country Manager de Alvarion Iberia,: <http://www.borrmart.es>
- García, A. (2009). *Contribución al Desarrollo de Herramientas Estratégicas para el Diseño, Dimensionado y Evaluación de Redes de Telecomunicación de Banda Ancha*. Santander: Universidad de Cantabria.
- García, R. (2000). *Seminario Entrenamiento en pararrayos, sistemas de tierra y protección eléctrica*. Monterrey: GRUPO JAR.
- González, P. (2006). *Diseño de una herramienta de planificación de sistemas WiMAX*. Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya.
- Gütter, D. (2010). *Planning and Modelling of WLAN/WiMAX Networks*. Research Paper, Technische Universität Dresden Fakultät Informatik, Institut für Systemarchitektur , Professur Rechnernetze.
- Horak, R. (2008). *Webster's New World Telecom Dictionary*. Indianapolis: Wiley Publishing, Inc.
- Huawei. (2010). FIFA 2010: free from worries. *COMUNICATE- Huawei Magazine*, p. 17-18.
- Hufford, G., Longley, A., & Kissick, W. (1982). *A guide to use of the ITS irregular terrain model in the area prediction mode*. U.S. DEPARTMENT OF COMMERCE.
- IEEE. (2006). *IEEE Standard for Local and metropolitan area networks Part 16: Air Interface for Fixed and Mobile Broadband Wireless Access Systems, IEEE Computer Society and the IEEE Microwave Theory and Techniques Society*.
- Intel. (2003). *IEEE 802.16 and Wimax Broadband Wireless Access for Everyone*. Recuperado el Febrero de 2013, de www.intel.com/ebusiness/pdf/wireless/intel802.16_wimax.pdf
- ITU-T. (2006). *ITU-T Recommendation Y.1541, Series Y: Global Information Infrastructure, Internet Protocols aspects and next-generation networks - Internet protocol aspects - Quality of service and network performance - Network performance objectives for IP-based service*. UIT-T.
- López, F. (2009). *Red de Acceso de Banda Ancha mediante WiMAX en zonas rurales y costeras*. Madrid: Universidad Autónoma de Madrid.

- López, G. (2006). WiMAX banda ancha para todos. *Revista Técnica de la Empresa de Telecomunicaciones de Cuba. SA.*, P.26-32.
- Mate, A. (2007). *Modernización de los servicios públicos*. Huelva: Congreso de los servicios de administración pública de Andalucía. .
- Motorola. (2008). *WLAN Design Guide*. Recuperado el Octubre de 2013, de Enterprise Motorola:
<http://www.scantexas.com/asset/suport/motorola%20enterprice%20wlan%20design%20guide.pdf>
- Ohrman, F. (2005). *WiMAX Handbook Building 802.16 Wireless Networks*. Osborne: MCGraw-Hill.
- Okumura, Y., Ohmori, E., Kawano, T., & Fukuda, F. (1968). Field strength variability in VHF and UHF land mobile services. *Rev. Elec. Comm. Lab.*, p. 825-873.
- Oppenheimer, P. (2010). *Top-Down Network Design, 3rd Edition*. Publisher Cisco Press.
- Paggi, H. (2003). *Predicción De Series Temporales Usando Redes Neuronales: Un .* Motevideo: Universidad de la República de Uruguay.
- Rodrigues, A., Velez, F., & Sebastiao, P. (2006). *Design and Planning of WiMAX*. Recuperado el Octubre de 2013, de <http://www.e-projects.ubi.pt/>: <http://www.e-projects.ubi.pt/crossnet/presentations/Design%20and%20Planning%20of%20WiMAX%20Networks.pdf>
- Sánchez, H. (2010). *Conferencia de Asignatura Sistemas de Radiocomunicaciones*. Santiago de Cuba: Universidad de Oriente Santiago de Cuba.
- Sauter, M. (2006). *Communication Systems for the Mobile Information Society*. Wiley.
- Technologies, H. (2008). STC: boosting network convergence. *COMUNICATE-Huawei Magazine*, p.15-16.
- Torres, C. (2010). *Modelo de Longley-Rice*. Belo Horizonte: Postgrado de Ingeniería Eléctrica, Brasil.
- UIT. (Septiembre de 2003). *Birth of broadband, Resumen*. Recuperado el Mayo de 2013, de UIT: www.itu.int/osg/spu
- UIT. (2010). *IEEE 802.11*. Recuperado el Mayo de 2013, de UIT, Estándares: <http://standards.ieee.org/getieee802/802.11.html>
- UIT-R. (2005). *Modelo de la atenuación específica debida a la lluvia para los métodos de predicción (Cuestión UIT-R 201/3)*. UIT, RECOMENDACIÓN UIT-R P.838-3,.

- UIT-T. (2006). *ITU-T Recommendation Y.1541, Series Y: Global Information Infrastructure, Internet Protocols aspects and next-generation networks - Internet protocol aspects - Quality*. UIT.
- Vilki, J. (2010). *Planning Tolls for MPLS Networks*. Tampere University of Technology.
- Wiener, M. (1986). Use of the Longley-Rice and Johnson-Gierhart Tropospheric Radio Propagation,. *IEEE Journal on selected areas in Comm*, p.297-307.
- wndw. (2007). *Redes Inalámbricas en los Países en Desarrollo*. Recuperado el Mayo de 2013, de <http://wndw.net/>: wndw.net/pdf/wndw2-es/wndw2-es-ebook.pdf
- Zhenzhen, G., & Zhonglin, L. (2008). Summa Telecom: a preemptive strike. *Huawei Technologies Co. Ltd.*, p.13-14.

GLOSARIO DE TÉRMINOS

AES: Advanced Encryption Standard

AAS: Advanced Antenna Sistem. Sistema de Antena Avanzado.

AES: Advanced Encryption Standard

AMC: Adaptive Modulation and Coding, Modulación y Codificación Adaptativa

AMC: Automatic Modulation and Coding, Modulación y codificación automáticas

ANSI: American National Standards Institute

ARPU: Average Revenue Per User: Ingresos medios por usuario

ARQ: Automatic Repeat Request, retransmisión de pedido automática

ARQ: retransmisión de pedido automática

BPSK: Binarios Phase Shift Keying

BPSK: Binary Phase Shift Keying

BS: Base Etation

BTS: Base Terminal Station

BWA: Broadband Wireless Access

CAPEX: Decrease capital expenditu - Disminución de los gastos de capital

CCK: Código de claves complementarias

CCK: Complementary Coded Keyin

CM: Conmutador (Swicth).

CPE: Customer Premise Equipment

CSMA / CA: Carrier Sense Multiple Access con Collision

CSMA/CA: Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance

CSMA/CD: Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection (Ethernet)

CTC: Convolutional Turbo Codes

DES: Data Encryption Standard

DES: Digital Encryption Standard

DFS: Dinamic Frequency Selection, Selección Dinámica de Frecuencias.

DSL: Digital Subscriber Line

DSSS: Direct Sequence Spread Spectrum

E. Bajada: Enlace de Bajada

E. Subida: Enlace de Subida

E1: Flujo de datos de 2.048 Mbps. Norma ETSI

EAP: Extensible Authentication Protocol, Protocolo de Autenticación Extensible

EB: Estación Base

ET: Estación Terminal

ETSI: European Telecommunications Standards Institute

FCC: Federal Communications Commission

FDD: Frequency Division Duplexing, Duplexación por División de Frecuencia

FEC: Forward Error Correction – Codificación por Predicción de Errores

FEC: Forward Error Correction , Codificación por Predicción de Errores

FFR: Fractional Frequency Reuse

FFT: Fast Fourier Transformer

FHSS: Frequency Hopping Spread Spectrum

FO: Fibra Óptica

FTP: Files Transfer Protocol

GTR-PUCP: Pontificia Universidad Católica del Perú Grupo de Telecomunicaciones Rurales

IEEE: Institute of Electrical and Electronic Engineers

IPDV: fluctuación del retardo de paquetes IP

IPER: tasa de errores en los paquetes IP

IPLR:tasa de pérdida de paquetes

IPTD: Retardo de paquetes IP

ISM: Industrial, Scientific, and Medical

ITS: Instituto de Ciencias y Telecomunicaciones

ITU-T: International Telecommunication Union

LAN: Local Area Network

LOS: Line of Sight-Aplicaciones que requieren línea de vista

MAC (CS): Subcapa de Convergencia de MAC

MAC: Media Access Control

MIMO: Multiple Input-Multiple Output

MOS: Mean Opinion Rate,

MPEG: Motion Picture Experts Group. Grupo de Expertos de Imagen en Movimiento

NLOS: Non Line of Sight - Aplicaciones que no requieren línea de vista

NMS: Network Management Systems

OECD: Organisation for Economics Co-operation and Development

OFDM TDD

OFDM: Orthogonal Frequency Division Multiplexing

OFDMA: Orthogonal Frequency Division Multiplex Acces

OPEX: Operation expenditure - Gastos de operación

p.i.r.e: Potencia Isótropa Radiada Equivalente

PER : Packet Error Rate

PLR: Packet Lost Rate

PoP: Point of Precense, Punto de presencia

PoP: Point of Precense, Punto de presencia

Prp: Pérdidas por radiopropagación.

PSUC: Partiallly Used Subchannel

QAM: Quadrature Amplitude Modulation. Modulación por Amplitud en Cuadratura

QoS: Quality of Service

QPSK: Quadrature Phase Shift Keying

RF: Radio frequency

RRU: Remote Radio Unit, Unidad Remota de Radio

Rx: Receptor, recepción

SDH: Synchronous Digital

SLA: Service Level Agreement

SOFDMA TDD

SOFDMA: Orthogonal Frequency Division Multiplex Acces

SOFDMA: Orthogonal Frequency Division Multiplex Acces, Acceso Múltiple

SRTM: Shuttle Radar Topography Mission

STC: Space Time Coding, Codificación Espacio Temporal

SUI: Stanford University Interim

TDD: Time Division Duplexing, Duplexación por División en Tiempo

Tx: Transmisor, transmisión

UIT-T: International Telecommunications Union, Unión Internacional de Telecomunicaciones

VoIP: Voice over IP. Voz sobre IP.

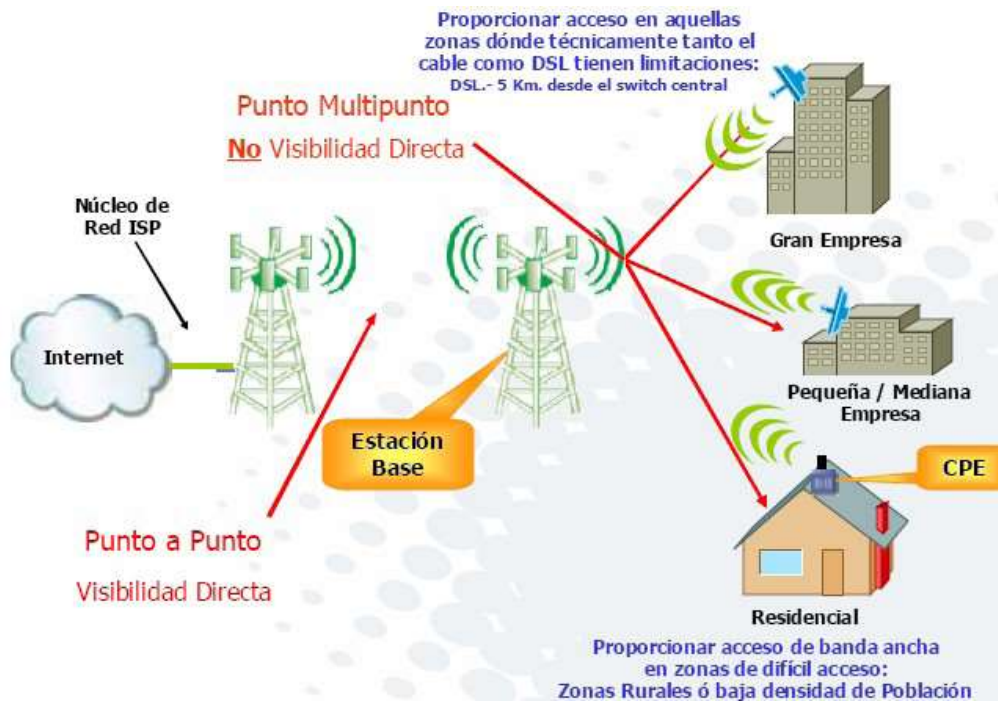
VPN: Virtual Private Network

WAN: Wide Area Network

ANEXOS

Anexo 1: Escenario de Aplicaciones de los estándares IEEE 802.16

Fuente: (López G. , 2006)



Anexo 2: Expresión para el cálculo de la Sensibilidad mínima requerida en el receptor.

$$S(\text{dBm}) = -102 + SNR_{Rx} + 10 \log \left[\frac{F_s \cdot N_u}{N_{FFT}} \cdot \frac{N_{\text{subcanales}}}{16} \right] \quad (1)$$

Donde:

- S: Sensibilidad mínima requerida [dBm]
- SNRRX: Relación señal a ruido que depende del tipo de codificación y modulación
- F s: Frecuencia de muestreo
- Nu: Número de portadoras útiles OFDM
- N FFT: Número de portadoras de la FFT
- N subcanales: Número de subcanales

Anexo 3: Parámetros de SOFDMA, para los distintos anchos de bandas.
Fuente: (Horak, 2008) (Fonseca, Conferencia sobre Redes Inalámbricas de Acceso de Banda Ancha, WiFi y WiMAX, 2008)

Parámetros	Enlace de bajada	Enlace de subida	Enlace de bajada	Enlace de subida
Ancho de banda de canal	5 MHz		10 MHz	
Tamaño de la FFT	512		1024	
Subportadoras nulas	92	104	184	184
Subportadoras pilotos	60	136	120	280
Subportadoras de datos	360	272	720	560
Subcanales	15	17	30	35
Período del símbolo: $T_s = T_b + T_g$	102.9 μ s			
Tiempo de guarda $T_g = T_b/8$	11.4 μ s			
Duración de la trama	5 ms			
Símbolo OFDM por trama	48			
Símbolo de datos OFDM	44			

Anexo 4: Clases de Calidad de servicio QoS (Horak, 2008)

Clase 1: Aplicaciones en tiempo real. (Esta clase incluye aplicaciones como VoIP y videoconferencia con una calidad menor percibida en los extremos).

Clase 2: Transacciones de datos muy interactivas (Tráfico de señalización.)

Clase 3: Transacciones de datos. (Tráfico de señalización menos rígido).

Clase 4: Exclusivo para aplicaciones de bajas pérdidas. (Transferencias de breve duración, datos en gran volumen y distribución de video (*videostreaming*)).

Clase 5: Aplicaciones tradicionales en redes IP. (Aplicaciones SMTP, FTP, http, que trabajan con el modelo “mejor esfuerzo”, *Best Effort*).

Clase 6: Emulación de circuitos TDM con alta interacción. (Aplicaciones de transferencia de televisión de alta calidad sobre IP).

Clase 7: Emulación de circuitos TDM. (Aplicaciones de televisión de alta calidad sobre IP, y alta capacidad pero con menor interacción y sensibilidad respecto a la Clase 6.

En la Tabla 1 se especifica los valores tolerables para cada clase de servicio.

Tabla 1: Clases de QoS para transferencia de comunicaciones.

Fuente: (ITU-T, 2006)

Clase	Retardo máximo [ms]	Tasa de pérdida (PP/PT)	Tasa de error (PE/PT)	Jitter [ms]
0	100	10^{-3}	10^{-4}	< 50
1	400	10^{-3}	10^{-4}	< 50
2	100	10^{-3}	10^{-4}	–
3	400	10^{-3}	10^{-4}	–
4	1000	10^{-3}	10^{-4}	–
5	–	–	–	–
6	100	10^{-5}	10^{-6}	< 50
7	400	10^{-5}	10^{-6}	< 50
Leyenda		PP: Paquetes perdidos		
		PT: Paquetes transmitidos		
		PE: Paquetes con errores		

Anexo 5: Expresión para el cálculo de la atenuación que introduce la lluvia a la señal de los enlaces de radio (Barbán, 2010).

$$\gamma = kR^\alpha$$

Donde:

γ : Atenuación específica debido a la lluvia (dB/Km)

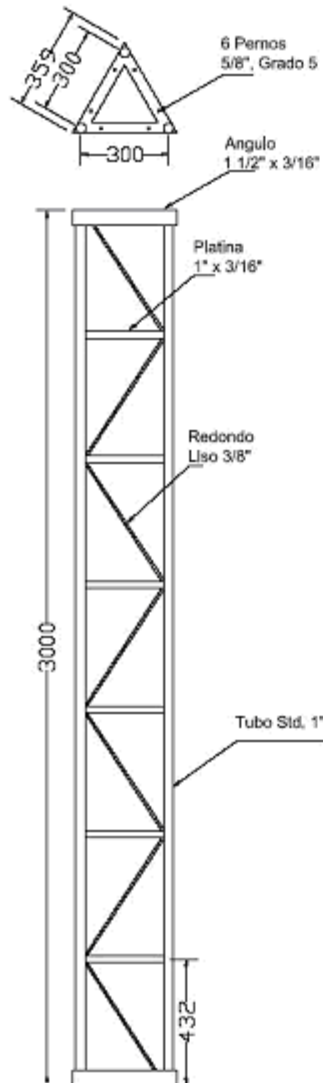
R: Intensidad de lluvia (mm/h)

K y α son unas constantes que dependen de la frecuencia, de la temperatura de la lluvia y de la polarización de la onda electromagnética.

Algunos valores de K y α para distintas frecuencias y polarizaciones (horizontal y vertical) se muestran en la Anexo 13, y la predicción de la Intensidad de lluvia promedio por zonas, Anexo 14 y 14a tomados de la Recomendación ITU 837-1.

Anexo 6: Composición de la Torre tipo AT-20.

Tramo de Torre AT-20 Tipo A



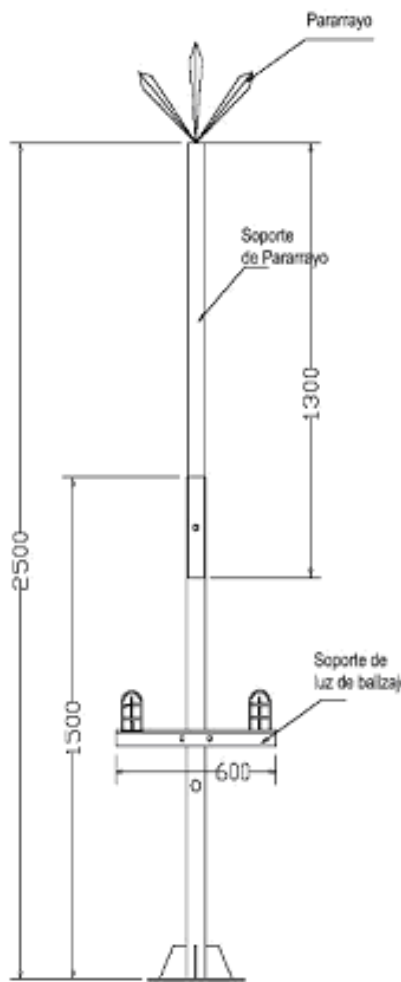
Características:

- Altura: 3 metros
- Sección: triangular
- Distancia entre centros: 300mm.
- Número de pasos por tramo: 7 pasos
- Unión entre tramos: mediante 6 pernos galvanizados de 5/8"x2.5", grado 5 (ASTM A325)
- Material base: acero ASTM A36
- Acabado: galvanizado en caliente ASTM A 123, 550 gr/m²

Cada tramo de torre de 30 m está constituido por los siguientes elementos:

- Tubo redondo estándar de $\phi 1"$ (33.7mm de diámetro exterior y 2.9mm de espesor).
- Cartelas horizontales: platinas de 1"x3/16"
- Cartelas diagonales: redondo liso de $\phi 3/8"$
- Base (sup e inf): ángulo 1.5"x3/16"

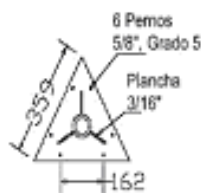
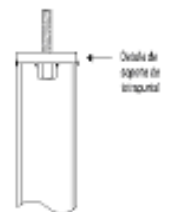
Soporte de pararrayos y balizaje para tramo tipo A



Compuesto por:

- Tubo inferior de acero ISO 65 de $\phi 1.5''$ (serie liviano, de 48.3mm. de diámetro exterior y 2.65mm de espesor). 1.5 metros de longitud.
- Ángulo de $2'' \times 3/16'' \times 600\text{mm}$ para soporte de luces de balizaje (incluye abrazadera U-bolt para tubo de $\phi 1.5''$).
- Plancha base triangular de 359mm. de lado, soldado a tubo inferior (reforzado con 4 cartelas fabricados a partir de plancha de $3/16''$). Con 6 agujeros para perno de $5/8''$ (para unión de mástil de pararrayos a tramo final de torre de 30 metros).
- Tubo superior de acero ISO 65 de $\phi 1.25''$ (serie liviano, de 42.4mm de diámetro exterior y 2.6mm de espesor). 1.3 m de longitud.
- Perno de embone de $0.5''$ galvanizado, para unión de tubo inferior y superior.
- Acabado general: galvanizado en caliente ASTM A 123, 550gr/m².

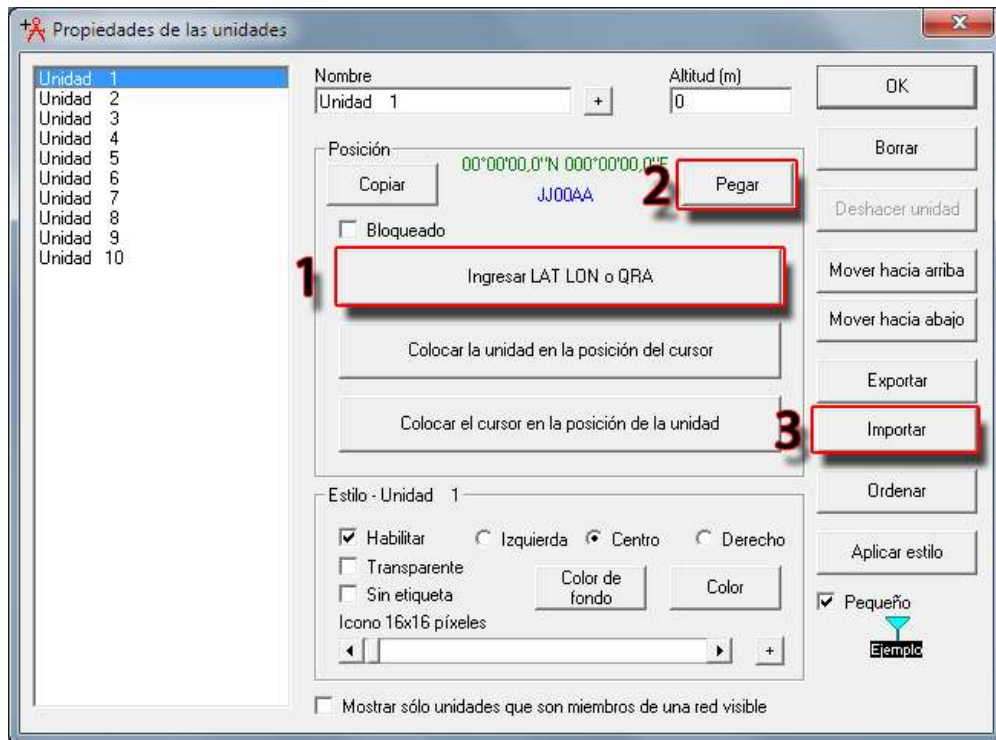
Nota: El extremo superior del tubo de 1.25'' deberá contar con un eje roscado que permita alojar al aislador para el pararrayos tetrapuntal.



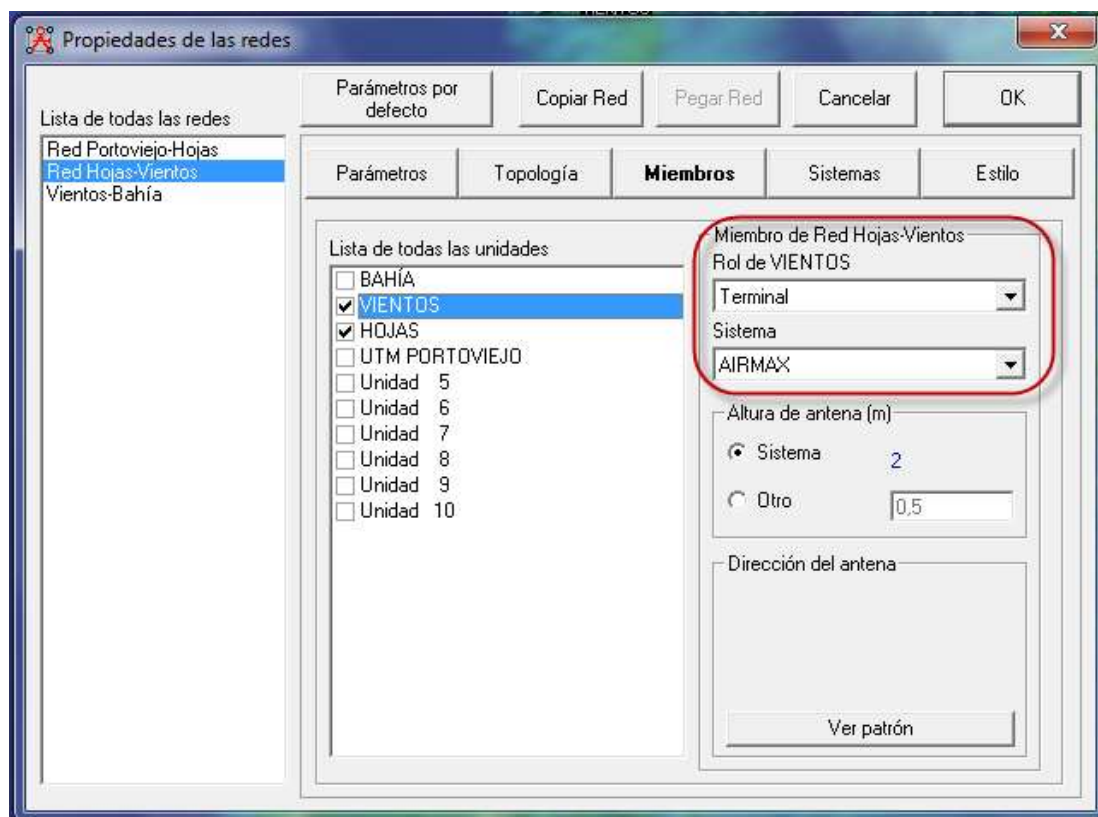
Anexo 7: Distribución de las portadoras según ancho de banda del canal con la permutación AMC.

AMC	1,25 MHz		5 Mhz		7 Mhz		8,75 Mhz		10Mhz		20Mhz	
	DL	UL	DL	UL	DL	UL	DL	UL	DL	UL	DL	UL
NULL SUB-CARRIERS	20	20	80	80	160	160	160	160	160	160	320	320
PILOTS SUB-CARRIERS	12	12	48	48	96	96	96	96	96	96	192	192
DATA SUB-CARRIERS	96	96	384	384	768	768	768	768	768	768	1536	1536
TOTAL SUB-CARRIERS	128	128	512	512	1024	1024	1024	1024	1024	1024	2048	2048
NUMERO DE SUBCANALES	2	2	8	8	16	16	16	16	16	16	32	32

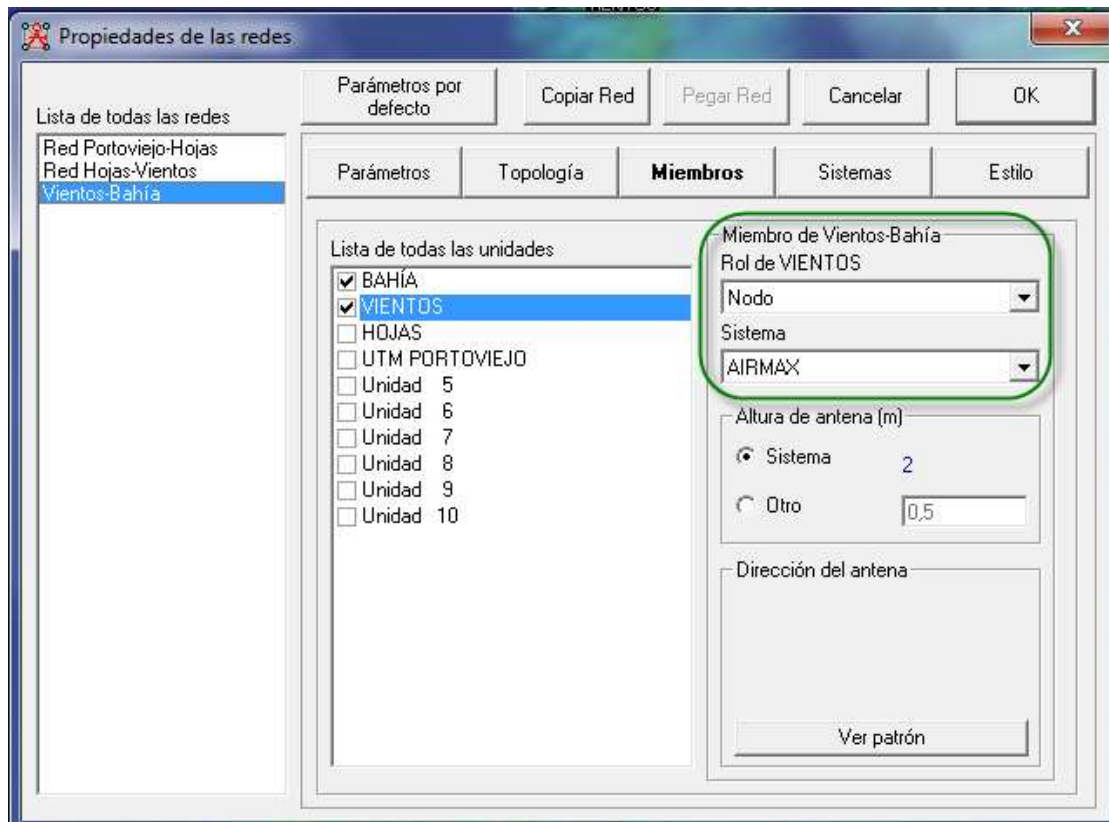
Anexo 8. Variantes crear la unidades desde



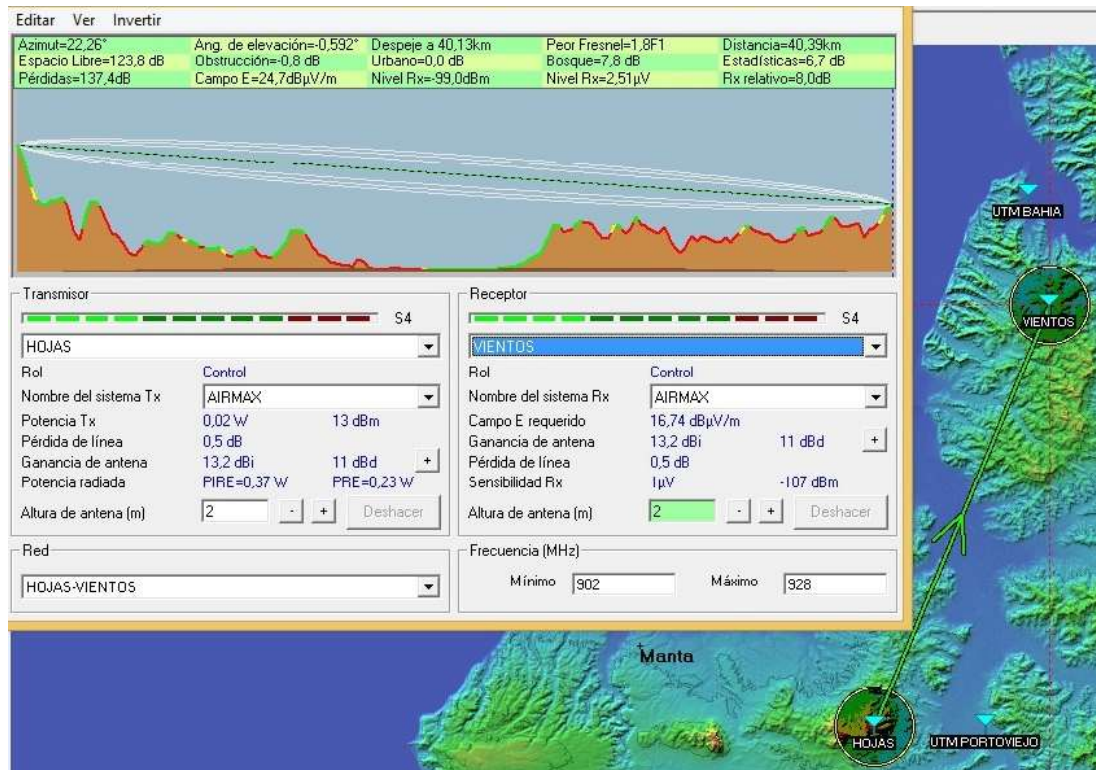
Anexo 9. Red Hojas - Vientos



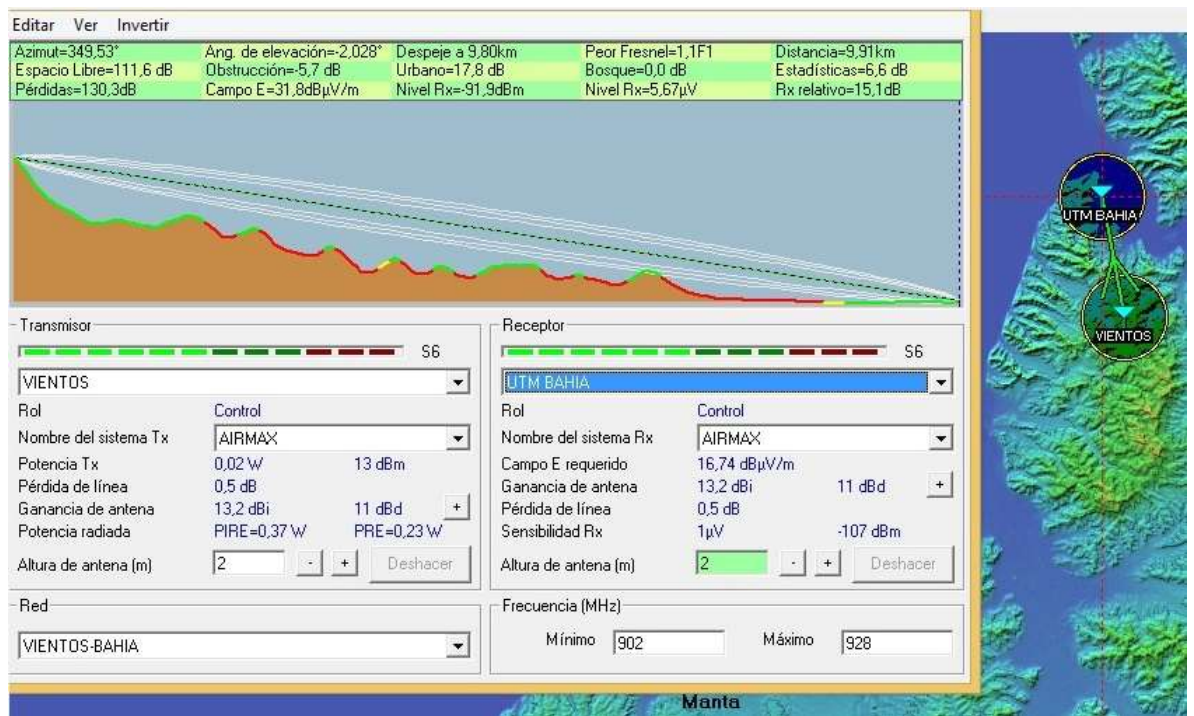
Anexo 10. Red Vientos – Bahía



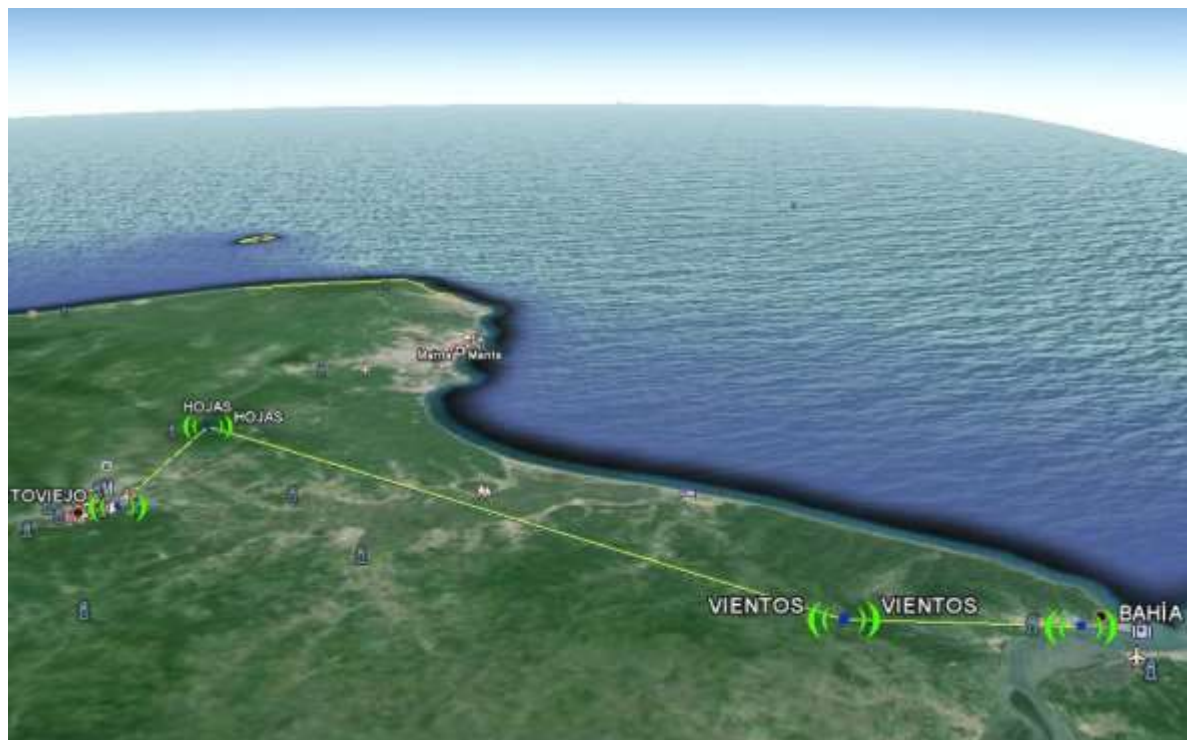
Anexo 11. Simulación entre los radios Hojas y Vientos.



Anexo 12. Simulación entre los radios Vientos y Bahía



Anexo 13. Vista aérea del enlace AIRMAX desde Google Earth



Anexo 14. Datasheet de la antena propuesta



Hi-Gain Airmax Sector 900-120-13		
Antenna Characteristics		
Frequency Range	902-920MHz	
Gain	13.7-13.8dBi	
Polarization	Dual Linear	
Cross pol Isolation	30dB min.	
Max VSWR	1.5:1	
Horizontal Beamwidth (6dB)	109 deg.	
Vertical Beamwidth (6dB)	12.6 deg.	
Elevation Beamwidth	15 deg.	
Electrical Downlink	N/A	
ETSI Application	N/A	
Dimensions	129.29x13.4cm	
Weight	12.5kg	
Windloading	160 mph	
	Return Loss	V-Pol Azimuth
	V-Pol Elevation	H-Pol Elevation
	H-Pol Azimuth	