UNIVERSIDAD CENTRAL "MARTA ABREU" DE LAS VILLAS

FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA

DEPARTAMENTO DE TELECOMUNICACIONES Y ELECTRONICA

Proyecto de Tesis para obtener el grado de Master en Telemática

Red de acceso inalámbrica para la provincia Mayabeque

Autor: Ing. Abelino Ruiz Estopiñan

Tutor: MSc. David Beltrán Casanova

Abril de 2012

"Año 54 de la Revolución"

Agradecimientos

Quisiera expresar mis agradecimientos a todas las personas que han dado el aliento necesario para continuar con mi superación profesional y que me han apoyado en la culminación de la maestría y la presentación de la Tesis.

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

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

A mi hijo por constituir mi razón de ser.

A mi tutor David Beltrán Casanova por su valiosa ayuda y guía.

A mis compañeros de grupo con los que compartí durante todo el tiempo de la maestría y llegamos a ser una gran familia, en especial a Yovani por su amistad y apoyo incondicional.

A mis compañeros de trabajo del Departamento de Desarrollo que supieron confiar en que podía terminar, en especial a Irán que sin su ayuda me habría sido casi imposible culminar.

Al claustro de profesores tan valioso que tuvimos, en especial a la Dra Ileana Moreno Campdesuñer.

A mi amigo Zenén por darme la confianza en todo momento de que sí podía lograr mi objetivo.

A mi amigo Alberto por su valiosa ayuda en la culminación del trabajo.

A los compañeros del Centro Regional de Villa Clara que nos dieron la mejor de las atenciones.

A todos muchas gracias.

Dedicatoria

A mis padres…

A mi esposa…

A mi hijo…

Resumen

Desarrollar una red de acceso, que satisfaga las necesidades de conectividad y servicios de banda ancha, es uno de los objetivos estratégicos que cualquier nación debe plantearse hoy, pues el empleo y aplicación masiva de las nuevas tecnologías van de la mano del desarrollo socio-económico. Las inversiones en infraestructura tienen un costo, pero el costo social de no hacerlas es mucho mayor.

En Cuba se carece de una infraestructura de acceso que satisfaga las demandas de conectividad y servicios de banda ancha que las empresas y la sociedad necesitan. La red de cables es insuficiente y tiene gran deterioro. Las redes inalámbricas de banda ancha han tenido un amplio desarrollo a nivel mundial. Es por ello que en el país, con el desarrollo de la informática y las comunicaciones, se trazan nuevas metas para el desarrollo de esta tecnología.

En este contexto desarrollar una red de acceso inalámbrica en la provincia Mayabeque se torna estratégico y hacia allí se dirige el objetivo fundamental del presente trabajo como solución viable, rápida y efectiva que permita el despliegue de servicios de banda ancha en la provincia y garantice la conectividad que demanda la sociedad y la economía, brindando un acercamiento a la red inalámbrica del territorio y la migración al estándar inalámbrico de banda ancha IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) 802.16e, también llamado WiMAX móvil.

En esta investigación se realiza el diseño de una red de acceso inalámbrica en la provincia de Mayabeque, para sustituir el sistema existente por otro de mayor capacidad y mejores prestaciones de servicios, obteniendo los resultados mediante la simulación de los enlaces radioeléctricos. La red obtenida brinda mayor capacidad de usuarios y nuevas prestaciones con un costo de implementación aceptable, tomando en cuenta las mejoras tecnológicas que se obtienen, el tamaño de la red y el impacto económico social que representa.

Summary

To develop an access net that satisfies the connectivity necessities and services of wide band, is one of the strategic objectives that any nation should think about today, because the employment and massive application of the new technologies go of the hand of the socio-economic development. The investments in infrastructure have a cost, but the social cost of not making them it is much bigger.

In Cuba you lacks an access infrastructure that satisfies the connectivity demands and services of wide band that the companies and the society need. The net of cables is insufficient and he/she has great deterioration. The wireless nets of wide band have had a wide development at world level. It is hence that in the country, with the computer science's development and the communications, new goals are traced for the development of this technology.

In this context to develop a wireless access net in the county Mayabeque you strategic restitution and toward there he/she goes the fundamental objective of the present work as viable, quick and effective solution that allows the unfolding of services of wide band in the county and guarantee the connectivity that demands the society and the economy, offering an approach to the wireless net of the territory and the migration to the wireless standard of wide band IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) 802.16e, also called WiMAX motive.

In this investigation he/she is carried out the design of a wireless access net in the county of Mayabeque, to substitute the existent system for another of more capacity and better benefits of services, obtaining the results by means of the simulation of the links radiate electrics. The obtained net offers bigger capacity of users and new benefits with a cost of acceptable implementation, taking into account the technological improvements that are obtained, the size of the net and the economic social impact that it represents.

Indice

Introducción **1**
Capítulo 1 Generalidades del estándar WiMAX **7**
1.1 Estándar 802.16 ..... **7**
1.1.1 Evolución 7
1.1.2 Características del estándar 802.16 9
1.1.3 Categorías 11
1.1.4 Estructura general 11
1.1.5 Multiplexación por División en Frecuencias Ortogonales 13
1.1.6 Acceso Múltiple por División de Frecuencia Ortogonal 14
1.2 Capa física **15**
1.3 Capa de Control de Acceso al Medio **16**
1.4 Propagación LOS versus NLOS **16**
1.5 Modulación Adaptativa **17**
1.6 Técnicas de múltiples antenas **18**
1.6.1 Sistemas MIMO 19
1.6.2 Configuración de Haz 20
1.6.3 Multiplexación espacial 20
1.6.4 Diversidad de código 20
1.7 Soporte de la calidad de servicio **21**
1.8 Manejo de la potencia **22**
1.9 Modelos de propagación aplicados a WiMAX **23**
1.9.1 Modelo de propagación NLOS – Erceg 24
1.9.2 Modelo ECC – 33 26
1.10 Conclusiones parciales **27**
Capítulo 2 Caracterización de la Red de acceso inalámbrica en Mayabeque. Comparación de resultados en las pruebas de campo **28**
2.1 Características principales del territorio **28**
2.2 Sistemas de acceso existentes en el territorio **29**
2.2.1 Sistemas Monocanales 30
2.2.2 Sistemas Bicanales 31
2.2.3 Sistema Trasa 31
2.3 Análisis comparativo de los suministradores de soluciones WiMAX **32**
2.3.1 Características técnicas del equipamiento del proveedor Alvarion 32
2.3.2 Características técnicas del equipamiento del proveedor Huawei 36
2.4 Prueba de campo realizada con Alvarion en Artemisa **41**
2.4.1 Especificaciones de Radio 41
2.4.2 Pruebas realizadas 42
2.4.3 Resultados preliminares y otras aplicaciones 46
2.5 Conclusiones parciales **48**
Capítulo 3 Diseño de la red de acceso WiMAX **49**

3.1 Diseño de una Red WiMAX 49
3.2 Generalidades del Software Radio Mobile 49
3.3 Modelación del diseño de Red WiMAX propuesto 53
3.3.1 Selección de la ubicación de los sitios 54
3.3.2 Parámetros de configuración en el Radio Mobile 58
3.4 Cálculo de los enlaces por radio entre las estaciones bases. 59
3.5 Resultados de la modelación 61
3.6 Análisis de los resultados. 67
3.7 Análisis económico 67
3.8 Impacto Medio Ambiental 68
3.9 Reubicación de los sistemas 69
3.9.1 Reubicación de los monocanales y bicanales 69
3.9.2 Trasa 69
Conclusiones 70
Recomendaciones 71
Referencias Bibliográficas 72
Anexos 74

Introducción

El desarrollo acelerado de la economía nacional, la incorporación de capital extranjero y la constitución de empresas mixtas, así como las necesidades de la sociedad en general, hacen que la Empresa de Telecomunicaciones de Cuba S.A. (ETECSA) vea la necesidad de brindar mayores y mejores servicios de telecomunicaciones a todas las esferas del país.

La Informatización de la Sociedad se define en Cuba como el proceso de utilización ordenada y masiva de las tecnologías de la información y la comunicación (TIC) para satisfacer las necesidades de información y conocimiento de todas las personas y esferas de la sociedad.

Las distintas técnicas de telecomunicaciones que posee el territorio de la provincia Mayabeque en la última milla para las localidades más apartadas, donde las redes de cobre no llegan ni son factibles económicamente de instalar, solamente permiten transportar servicios de voz. Está demostrado prácticamente que los costos de instalación y mantenimiento de estas redes de acceso se elevan extraordinariamente cuando exceden los 4 Km desde los nodos de comunicación o cuando se implementan en ambientes suburbanos y rurales, por lo que las soluciones inalámbricas pueden convertirse en la solución técnica y económica de mayor factibilidad.

Las demandas de servicios inalámbricos en nuestro territorio se remontan a los primeros años de la Revolución. Cumpliendo el principio de vincular el estudio y el trabajo en la formación de nuestros jóvenes, fueron inaugurados los centros internos (Secundarias y Preuniversitarios en el campo) que llegaron a ser más de cien en la antigua provincia La Habana. En este primer momento se requería solamente de uno o dos servicios de voz para garantizar la administración y la seguridad de las instalaciones educacionales, los cuales se comenzaron a dar en algunas instalaciones a través de largas rutas de alambre de cobre que tenían un elevado costo de instalación y mantenimiento. Con el paso de los años y la acción de los ciclones fueron desapareciendo estas rutas y surgen de esta manera la instalación de los primeros sistemas inalámbricos monocanales y bicanales en la provincia.

En la década de los años 90, producto del desarrollo de la agricultura y la ganadería en la franja sur de la provincia, se reciben demandas de servicios de voz en el sector estatal asociados a estos programas. Simultáneamente pero en el litoral norte comienzan tres sectores importantes a generar demandas: el turismo, el campismo popular y la explotación de petróleo. En ambos escenarios se requerían servicios en puntos dispersos. Esto conllevó

a la instalación de dos sistemas punto – multipunto, de multiacceso inalámbrico Trasa, de procedencia argentina, que garantizan únicamente los servicios de voz.

En los años 2000 se potencia el desarrollo de los programas priorizados de la Revolución y de la Batalla de Ideas, en los cuales las demandas se caracterizan por necesidad de servicio de voz y datos con máxima calidad y fiabilidad, instalados en un corto plazo y reduciendo al máximo los costos. Este nuevo concepto requiere de una solución de comunicaciones mediante el empleo de tecnologías de acceso modernas que garanticen el ancho de banda requerido para el desarrollo de dichos programas.

En el orden mundial las redes inalámbricas han evolucionado de redes de menor a mayor alcance. En 1985 comienza el desarrollo de las redes inalámbricas personales (WPAN) (Wireless Personal Area Network**)**. Esta es una red personal de poco alcance, se caracteriza por comunicaciones seguras con tasas bajas de transmisiones de datos y bajo consumo. En este tipo de red se utiliza varias tecnologías entre ellas Bluetooth como la de mayor aceptación, la cual posibilita la transmisión de voz y datos entre diferentes dispositivos mediante un enlace por radiofrecuencia. Está diseñado especialmente para dispositivos de bajo consumo, con una cobertura baja y basada en transceptores de bajo costo. La especificación de Bluetooth define un canal de comunicación de máximo 720 Kb/s (1 Mbps de capacidad bruta) con rango óptimo de 10 m (opcionalmente 100 m con repetidores) [1].

En 1991 se publicaron los primeros trabajos de redes inalámbricas locales (WLAN) (Wireless Local Area Network) las cuales dan cobertura inalámbrica a instalaciones como industrias, edificios a través de puntos de acceso. En las redes de área local podemos encontrar tecnologías inalámbricas basadas en HiperLAN (High Performance Radio LAN), o tecnologías basadas en Wi-Fi (Wireless-Fidelity). Wifi se utiliza como denominación genérica y es un conjunto de estándares para redes inalámbricas basados en las especificaciones IEEE 802.11. La versión original del estándar IEEE 802.11 publicada en 1997 especifica dos velocidades de transmisión teóricas de 1 y 2 mega bit por segundo (Mbit/s) que se transmiten por señales infrarrojas (IR) en la banda ISM a 2,4 GHz [2].

Las redes de acceso Wi-Fi en general están diseñadas para cubrir solo pequeñas áreas. Presenta un área de cobertura de aproximadamente 150 m, lo que hace a la tecnología ideal para entornos de oficinas, hogares y zonas públicas como cafeterías, hoteles, aeropuertos, terminales de trenes e instituciones educativas. Su empleo en zonas rurales es costoso ya que requiere la instalación de un número elevado de puntos de acceso. Otra desventaja está relacionada con la baja calidad de servicio (QoS) en la comunicación [2].

En el año 2000 se introducen las redes de inalámbricas de área metropolitana (WMAN) (Wireless Metropolitan Area Network). La tecnología más popular que utiliza esta red es WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access), un estándar de comunicación inalámbrica basado en la norma IEEE 802.16. Este estándar tiene similitud con Wi-Fi, pero tiene más cobertura y ancho de banda [3].

En redes inalámbricas metropolitanas no hay comparación posible de capacidad con redes cableadas, son pioneras y han abierto grandes posibilidades. Un ejemplo claro lo encontramos en la gran evolución de los teléfonos móviles en los últimos años. Las facilidades de instalación, mantenimiento y desarrollo de las redes inalámbricas son también incuestionables [3].

El análisis preliminar de nuestro escenario de estudio y la evolución de las redes inalámbricas desplegadas en el mundo nos señalan al sistema WiMAX como tecnología óptima para la solución de las comunicaciones de acceso inalámbrica en la provincia Mayabeque.

Como Situación Problémica de este trabajo se tiene que en la actualidad ETECSA cuenta con una red de acceso inalámbrica en la provincia Mayabeque con varias tecnologías que presta servicios para los clientes comerciales y residenciales. Esta red de acceso brinda fundamentalmente servicios de voz, ya que posee capacidad limitada en cuanto a la velocidad de transmisión de datos, lo cual impide brindar servicios de comunicaciones de banda ancha en esta provincia, que son ampliamente demandados. Con el objetivo de incrementar la capacidad de la Red e introducir nuevos servicios de banda ancha, ETECSA solicitó realizar una investigación de las tecnologías de acceso de banda ancha para ofrecer una solución a corto plazo.

Con las prestaciones de los sistemas monocanales, bicanales y Trasa existentes, el territorio no puede garantizar el ancho de banda requerido para el desarrollo de la informatización de la sociedad. De aquí que el Problema Científico de esta investigación sea: ¿Cómo garantizar los servicios de telecomunicaciones requeridos por el Programa de Informatización de la Sociedad Cubana, utilizando alguna de las tecnologías actuales de acceso de banda ancha inalámbrica en la provincia de Mayabeque?

El Objeto de Estudio de este trabajo será las redes de acceso de banda ancha inalámbricas para la transmisión de voz y datos y los estándares de redes WiMAX.

El campo de acción será: Red de acceso inalámbrica WiMAX para la transmisión de voz y datos de la provincia Mayabeque.

El objetivo general del trabajo es proponer una solución WiMAX a la red de acceso inalámbrica de la provincia Mayabeque que garantice la actual demanda de servicios de voz y datos.

Para lograr el objetivo general se requiere alcanzar los siguientes objetivos específicos:

1. Identificar las redes de acceso de banda ancha inalámbrica más empleadas a nivel mundial que se ajusten a la realidad cubana.
2. Diagnosticar el sistema de acceso por radioenlace que se encuentra en explotación en el territorio que comprende la provincia Mayabeque.
3. Analizar los resultados en las pruebas de campo de la tecnología WiMAX realizadas en Artemisa con el equipamiento del suministrador Alvarion.
4. Proyectar el sistema WiMAX a emplear.
5. Simular los escenarios propuestos.

Se parte de la hipótesis de que es posible dar solución a las necesidades de comunicaciones de banda ancha inalámbrica de la provincia de Mayabeque, convirtiendo la madeja de técnicas por radioenlaces instalados, en un sistema armónico e integrado, sustituyendo el equipamiento obsoleto y reubicando los sistemas teniendo en cuenta sus prestaciones y los requerimientos de cada lugar, con una alta relación costo-beneficio y disponibilidad de los sistemas para la transmisión de datos a alta velocidad.

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

- El histórico lógico mediante el cual se contextualiza el problema de investigación, sus antecedentes y desarrollo.
- El analítico sintético ya que es necesario analizar todos los componentes del sistema a emplear y determinar los elementos a utilizar, así como la interrelación de sus partes.
- El inductivo – deductivo que logra establecer generalidades en cuanto al diseño de la red a partir de las experiencias particulares de los técnicos y especialistas que participan en la misma.
- La modelación, mediante la cual se crean abstracciones con vistas a explicar la realidad. El modelo como sustituto del objeto de investigación. Opera en forma

práctica o teórica con un objeto, no en forma directa, sino utilizando cierto sistema intermedio, auxiliar, natural o artificial, en este caso, la simulación.

Como resultado de la presente tesis se espera obtener:

- La caracterización de las necesidades actuales y futuras en cuanto a servicios de telecomunicaciones en La provincia Mayabeque.
- Una propuesta de red de acceso inalámbrica técnicamente viable y económicamente factible, que posibilite el incremento en las zonas rurales y suburbanas de la provincia, tanto la cantidad de servicios como las prestaciones.

El impacto social que se lograría al implementar la red de acceso inalámbrica de banda ancha propuesta es que se podría llevar a cabo el Programa de Informatización de la Sociedad Cubana lo cual elevaría en general el nivel de vida y satisfacción de la población, creando condiciones para un mejor desempeño en sus relaciones personales y laborales garantizando el acceso a la información.

El impacto económico, de instalarse esta tecnología, es que se lograría una mayor eficacia y eficiencia por la optimización de recursos, pues se lograría incrementar los servicios prestados, una mayor productividad en todas las esferas y sectores de la sociedad y se incrementarían los ingresos globales y además se sustituirán redes obsoletas cuyos costos de explotación son enormes.

El impacto científico que se deriva de este trabajo es la sistematización de la teoría sobre la tecnología escogida, recopilando datos técnicos y el análisis de las diferentes topologías posibles.

El impacto cultural que se lograría es que al ejecutarse el Programa de Informatización de la Sociedad Cubana se pondría medios de comunicaciones a disposición de la población mediante el uso de las TIC, que posibilitan el enriquecimiento de los conocimientos y una cultura general integral, que ayudan a mejorar la calidad de vida de la población.

El trabajo está estructurado en tres capítulos: En el primer capítulo se realiza un estudio de las tecnologías para redes de acceso de banda ancha inalámbricas más usadas en el mundo y que se adecuan a la realidad cubana.

En el segundo capítulo se realiza una caracterización de la red inalámbrica en el territorio y se muestran los resultados de las pruebas de campo de la tecnología WiMAX realizadas con el equipamiento Alvarion y Huawei.

En el último capítulo se plasma la propuesta de migración a WiMAX y un análisis de los resultados de la simulación. Del mismo modo se define el equipamiento que se propone, realizando una valoración económica general.

En las conclusiones del trabajo se abordan los resultados obtenidos en la investigación y posteriormente se realizan recomendaciones derivadas de la propuesta de implementación escogida.

En los anexos del trabajo se podrá consultar información adicional sobre el equipamiento propuesto para la futura implantación de la tecnología escogida en el escenario elegido.

Capítulo 1 Generalidades del estándar WiMAX

En este capítulo se hace un estudio sobre la evolución que han tenido los estándares 802.16. En el marco del mismo se han analizado las principales características de los sistemas WiMAX para, entre otras cosas, validar el por qué de proponer el estándar 802.16e para ofrecer servicios de banda ancha en lugares donde llevar la fibra óptica no es la solución más factible. Se evalúan también algunas herramientas matemáticas que se emplean para demostrar el uso adecuado de WiMAX en estos entornos.

1.1 Estándar 802.16

WiMAX, que según sus siglas en Inglés es *World Wide Interoperability Microwave Access*, y en español significa Interoperabilidad Mundial para Acceso por Microondas; es una norma de transmisión por ondas de radio de última generación, basada en los Estándares IEEE 802.16x y su función es la de proveer servicio inalámbrico de banda ancha a nivel metropolitano, como una alternativa a los servicios de banda ancha tradicionales por cable, ya sea ADSL o cualquier otra tecnología alámbrica. Permite la recepción de datos por microondas y retransmisión por ondas de radio, proporcionando acceso compartido con varios repetidores de señal superpuestos, ofreciendo cobertura en áreas del orden de los 50 kilómetros de radio y a velocidades de hasta 70 Mbps, utilizando una tecnología que no requiere visión directa con la estación base [4].

El Grupo IEEE 802.16 se puso en marcha en el año 1998 con el objeto de desarrollar este estándar. Inicialmente estaba enfocado en el desarrollo de un sistema fijo, punto – multipunto, con línea de vista, para operar en la banda de 10 a 66 Ghz [4].

Existen dos tipos de posibilidades de redes: WiMAX fija, en la que se proveen enlaces entre equipos fijos a velocidades superiores a los enlaces tradicionales de microondas, y WiMAX móvil, que permite la transmisión de datos a alta velocidad en movimiento [4].

1.1.1 Evolución

El primer estándar fue presentado en el 2001, especificaba para la Capa Física (PHY) una única portadora y para la Capa de Control de Acceso al Medio (MAC) la Multiplexación por División de Tiempo (TDM). A este estándar también se lo conoció como Wireless MAN-SC. Es un sistema FWA (*Fixed Wireless Access*), y especificaba una capa física que utilizaba una técnica de

modulación de una única portadora y una capa de acceso con una estructura de multiplexación TDM, que soportaba a su vez Duplexación por División de Frecuencias (FDD) o de Tiempo (TDD). En el año 2002, se editó una enmienda a los perfiles del Sistema WiMAX de 10-66 Ghz, que se denominó 802.16.c. En esta enmienda también hacían referencia a la Interoperabilidad y Certificación de Especificaciones [5].

Posteriormente, se comenzó a trabajar en la extensión de sus características utilizando frecuencias licenciadas y no licenciadas en el rango de 2 a 11 Ghz, permitiendo el desarrollo de sistemas sin necesidad de línea de vista (NLOS). Así en enero del 2003, se presentó la norma 802.16.a. En este estándar se pasó a operar en la banda de 2-11 Ghz, para aplicaciones punto – multipunto como acceso de última milla de banda ancha. Aquí se agregó Multiplexación por División de Frecuencias Ortogonales (OFDM) como parte de la capa física, ya utilizado en el estándar IEEE 802.11 para resolver el problema de las reflexiones múltiples, y se establecieron además opciones adicionales para la capa MAC como el soporte para Acceso por Multiplexación Ortogonal por División de Frecuencias (OFDMA) [5].

Luego de posteriores revisiones y actualizaciones, se llega en el año 2004 al estándar 802.16-2004 ó 802.16d, que reemplazó a todas las versiones anteriores y formó las bases para la primera solución WiMAX. Este estándar también fue adoptado por Europa como la base para la Red de Área Metropolitana de Alto Rendimiento (HIPERMAN). Esta norma estaba relacionada solamente con WiMAX Fijo [5].

Como consecuencia de los trabajos iniciados en el año 2003 para lograr diferentes mejoras que le permitieran lograr aplicaciones nómadas y de movilidad vehicular, en el mes de diciembre del 2005 fue publicada la norma 802.16-2005 ó 802.16e conocida como WiMAX Móvil. WiMAX Móvil proporciona servicios a velocidades de hasta 120 Km/h, combina servicios fijos y móviles en una arquitectura de red similar a la de un sistema celular, permitiendo que la estación base se comunique con terminales fijos y móviles. Tal como sucedió con la Wi-Fi Alliance (anteriormente la WECA: Wireless Ethernet Compatibility Alliance), el IEEE dejó a las industrias la responsabilidad de la interoperabilidad del estándar. Con el objeto de resolver este problema se creó el WiMAX Forum que certificó su primer producto en el año 2006. Esto obligó a muchos fabricantes con soluciones propietarias a desarrollar los planes necesarios para migrar a WiMAX Fijo o Móvil [5].

La figura 1.1 muestra la evolución de WiMAX.

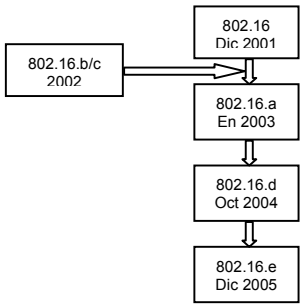


Figura 1.1 Evolución de WiMAX.

La enmienda IEEE 802.16m o WiMAX 2 constituye el siguiente gran hito en la evolución del estándar IEEE 802.16. Su principal objetivo es proporcionar caudales de 100 Mbps en movimiento y 1 Gbps para accesos fijos, en canales que pueden tener hasta 100 MHz de ancho de banda efectivo. El estándar proveerá la base para la tecnología oficialmente denominada WiMAX Release 2 que introducirá mejoras y nuevos servicios, y que compite por clasificar entre las tecnologías de cuarta generación (4G) de las comunicaciones móviles dado las altas velocidades que maneja. Como una de las mejoras se destaca la alta movilidad; la estación móvil 802.16m podrá mantener una conexión hasta 350 km/h o más, en dependencia de la frecuencia de operación [12].

1.1.2 Características del estándar 802.16

La siguiente tabla muestra una comparación entre los principales estándares 802.16.

Tabla 1.1 Comparación entre los principales estándares 802.16 [5].

Características	**802.16**	**802.16a**	**802.16e**
Espectro	10 - 66 GHz	< 11 GHz	< 6 GHz
Funcionamiento	Solo con visión directa	Sin visión directa (NLOS)	Sin visión directa (NLOS)
Tasa de bit	32 - 134 Mbit/s con canales de 28 MHz	Hasta 75 Mbit/s con canales de 20 MHz	Hasta 15 Mbit/s con canales de 5 MHz
Modulación	QPSK, 16QAM y 64 QAM	OFDM con 256 subportadoras QPSK, 16QAM, 64QAM	Igual que 802.16a
Movilidad	Sistema fijo	Sistema fijo	Movilidad pedestre
Anchos de banda	20, 25 y 28 MHz	Seleccionables entre 1,25 y 20 MHz	Igual que 802.16a con los canales de subida para ahorrar potencia
Radio de celda típico	2 - 5 km aproximadamente.	5 - 10 km aproximadamente (alcance máximo de unos 50 km)	2 - 5 km aproximadamente

WiMAX presenta como principales características un ancho de canal entre 1,5 y 20 MHz, utiliza modulaciones OFDM y OFDMA con 256 y 2048 portadoras respectivamente, que permiten altas velocidades de transferencia incluso en condiciones poco favorables. Esta técnica de modulación es la que también se emplea para la TV digital, sobre cable o satélite, así como para la tecnología de comunicación inalámbrica mediante ondas Wi-Fi (802.11a), por lo que está suficientemente probada e incorpora soporte para tecnologías de antenas inteligentes que mejoran la eficiencia y la cobertura. Estas antenas son propias de las redes celulares de tercera generación (3G), mejorando la red espectral y llegando así a conseguir el doble que 802.11 e incluye mecanismos de modulación adaptativa, mediante los cuales la estación base y el equipo de usuario se conectan utilizando la mejor de las modulaciones posibles, en función de las características del radio enlace [5].

Soporta además varios cientos de usuarios por canal, con un gran ancho de banda y es adecuada tanto para tráfico continuo como a ráfagas, siendo independiente del protocolo; así, transporta IP, Ethernet, ATM, entre otros y soporta múltiples servicios simultáneamente, ofreciendo Calidad de Servicio (QoS) en 802.16e, por lo cual resulta adecuado para voz sobre IP (VoIP), datos y video. Permite formar redes malladas para que los distintos usuarios se puedan comunicar entres sí, sin necesidad de tener visión directa entre ellos y en cuanto a la seguridad tiene medidas de autentificación de usuarios y la encriptación de datos mediante los algoritmos triple DES (estándar de cifrado de datos) y RSA (sistema criptográfico de clave pública) [5].

Define además una capa MAC que soporta múltiples especificaciones físicas (PHY), presenta una mayor productividad a rangos más distantes (hasta 50 Km.) y mejor tasa de bits/segundo/Hz en distancias largas. Presenta un sistema escalable con fácil adición de canales maximizando las capacidades de las células y ancho de banda flexible que permiten usar espectros licenciados y exentos de licencia. En cuanto a la cobertura presenta un soporte de mallas basadas en estándares y antenas inteligentes y servicios de nivel diferenciados E1/T1 para negocios y mejor esfuerzo para uso doméstico. Presenta un alto costo y un riesgo de investigación. Los equipos WiMAX-CertifiedFF (certificación de compatibilidad) permiten a los operadores comprar dispositivos de más de un vendedor, ya que garantiza la interoperatividad [5].

1.1.3 Categorías

Las revisiones del estándar IEEE 802.16 se dividen en dos categorías que son WiMAX fijo, también denominado IEEE 802.16-2004 y WiMAX móvil, también denominado IEEE 802.16e. WiMAX fijo determina las conexiones de línea fija a través de una antena en el exterior, similar a una antena de televisión. Funciona en las bandas de frecuencia 2.5 GHz y 3.5 GHz, para las que se necesita una licencia, y en la banda 5.8 GHz para la que no se necesita tenerla, mientras que WiMAX móvil permite que los equipos móviles de los clientes se conecten a Internet y abre las puertas para el uso de teléfonos móviles por IP e incluso para servicios móviles de alta velocidad [4].

1.1.4 Estructura general

El modelo de referencia de una red WiMAX está compuesto principalmente por tres componentes interconectados mediantes interfaces estandarizadas o puntos de referencias. Los tres componentes son la estación móvil (MS), usada en el extremo de la red del usuario para acceder a la red; el servicio de acceso de red (ASN), el cual comprende una o más estaciones base y una o más pasarelas ASN para formar la red de acceso radio; y el servicio de conectividad de red (CSN) que provee conectividad IP con las funciones IP del núcleo de la red.

El modelo de arquitectura de red desarrollado por el grupo de trabajo de WiMAX Forum define una serie de entidades fundamentales e interfaces entre dichas entidades los cuales han sido definidos como puntos de referencia los cuales son la estación base (BS), la pasarela de acceso al servicio ASN-GW y el servicio de conexión a la red (CSN) [6].

La BS implementa la capa física y la capa de control de acceso al medio (MAC) tal como se define en el estándar 802.16. En una red de acceso WiMAX, una BS está definida por un sector y una frecuencia asignada. En el caso de la asignación multifrecuencia de un sector, dicho sector incluye tantas BS como frecuencias haya. La conectividad a múltiples ASN-GW debe ser requerida en el caso de carga balanceada o propósitos de redundancia. Una pasarela ASN es una entidad lógica que actúa típicamente como un punto de agregación de tráfico de la capa de enlace dentro del ASN e incluye: Funciones de control entre entidades pares y encaminamiento plano de portadora o funciones de puente [6].

Una entrada completamente redundante del ASN-GW conecta las estaciones bajas de WiMAX con la red de la base. Con una capacidad de 250 BS por unidad, el ASN-GW puede manejar las conexiones de más de 288 000 subscriptores, con 8 000 de ellos activos simultáneamente. Las

funciones fundamentales del ASN-GW son: gestión y paginación de la localización dentro del ASN, gestión de los recursos de radio, claves de encriptación, funcionalidad de cliente de AAA, establecimiento y gestión de la movilidad con la estación base, aplicaciones de calidad de servicio, funcionalidad de agente externo para Mobile IP y envío a los CSN seleccionados [6].

El CSN consiste en unas funciones y equipos que permiten la conectividad IP a los subscritores WiMAX. Por ello el CSN incluye las funciones de autorización de conexión de usuario en la capa de acceso 3, administración de la calidad de servicio (QoS), el soporte de movilidad basado en Movile IP, el tunelado (basado en protocolos IP) con otros equipos o redes, la facturación de los subscritores WiMAX y los servicios WiMAX (Acceso a internet, servicios de localización, conexión de servicios Peer to Peer, aprovisionamiento y/o conexión a gestores de base de datos o ISM) [6].

Además de las entidades anteriores, el grupo de trabajo de WiMAX Forum define varios puntos de referencias entre las distintas entidades que componen la arquitectura de esta red. Esos puntos de referencia logran puntos de interoperabilidad entre diferentes fabricantes. Hay seis puntos de referencia obligatorios (R1 – R6) y dos opcionales (R7 y R8).

El punto de referencia R1 es la interfaz radio entre el MS y el ASN. Incluye todas las características físicas y MAC de los perfiles de WiMAX. Lleva tráfico de usuarios y mensajes de control de usuarios, así como R2 es la interfaz lógica entre el MS y el CSN y contiene los protocolos y otros procedimientos para la autenticación, servicios de autorización y administración de la configuración IP.

R3 es la interfaz lógica entre el ASN y el CSN y transporta mensajes de plano de control e información del plano de datos a través de un tunelado entre el ASN y el CSN mientras que el punto de referencia R4 es el que interconecta dos ASNs (ASN perfil B) o dos ASN-GW (ASNs perfiles A y C), transporta mensajes de plano de control y de datos especialmente durante el traspaso de un usuario WiMAX entre ASNs/ASN-GWs y presenta interoperabilidad entre ASNs de diferentes fabricantes.

El punto de referencia R5 es el que interconecta dos CSNs y consiste en el juego de métodos del plano de control y de datos para la comunicación entre el CSN del NSP visitante y el NSP, mientras que R6 es específico de algunos de los perfiles del ASN. Se utiliza en aquellos en que el ASN se subdivide en BS y ASN-GW que corresponden con los perfiles A y C. Por tanto este

punto de referencia no es aplicable al perfil B. R6 se encarga de unir la BS y el ASN-GW y transporta mensajes de plano de control y de datos.

R7 es una interfaz lógica opcional entre funciones de decisión y aplicación en el ASN-GW y R8 es una interfaz lógica opcional entre estaciones base y transporta flujo de intercambio del plano de control que sirve para permitir un rápido y eficiente traspaso entre estaciones base [6].

1.1.5 Multiplexación por División en Frecuencias Ortogonales

La Multiplexación por División en Frecuencias Ortogonales (OFDM) es una técnica de modulación por multiportadora que ha encontrado una amplia adopción en los sistemas de comunicaciones con alta velocidad de datos. La popularidad de OFDM para las aplicaciones con elevada velocidad de datos ocurre principalmente debido a su manejo eficiente y flexible de la interferencia intersímbolo en canales con alta probabilidad de dispersión. En OFDM, el dispositivo cliente transmite utilizando todo el espacio de la portadora a la vez y todas las portadoras se transmiten en paralelo con la misma amplitud.

La tecnología OFDM, proporciona al operador, en términos de eficiencia, llegar a superar los retos de la propagación en entorno NLOS. La señal OFDM ofrece la ventaja de ser capaz de operar con un retardo de ensanchamiento más grande en el ambiente NLOS. Gracias al tiempo de símbolo OFDM y al uso de un prefijo cíclico, la forma de onda OFDM elimina los problemas de interferencia inter símbolo y la complejidad de la ecualización adaptativa. OFDM es muy similar a FDM (Multiplexación por División en Frecuencias) pero más eficiente. Mientras que FDM deja una banda de guarda entre canales, OFDM trata de acercar los canales lo más posible hasta superponerlos. Esto se logra con frecuencias que sean ortogonales, es decir, perpendiculares en el sentido matemático; sus espectros se superponen sin interferir.

Para mantener la ortogonalidad entre los tonos, es necesario asegurar que en el tiempo de símbolo caben exactamente uno o más ciclos de cada tono. Es decir, la frecuencia de los tonos es un múltiplo entero de 1/Tos, donde Tos es el tiempo de símbolo. Los picos de cada tono se ubican donde están los ceros de todos los otros. Cuando el receptor muestrea a la frecuencia central de cada tono, la única energía que encuentra corresponde a una sola subportadora más ruido proveniente de los otros tonos.

Los parámetros OFDM son los siguientes: [6]

- 256 portadoras OFDM (192 son utilizadas para datos, 8 son pilotos y 56 son nulas).

- Pilotos: 8 fijas (-84, -60, -36, 12, 12, 36, 60, 84). (son utilizadas como referencia para minimizar los desplazamientos de frecuencia y fase)
- Portadoras guardas: 28 izquierdas, 27 derechas. (son utilizadas para resguardo de la banda y la frecuencia DC, que corresponde a la frecuencia central del canal)
- Ancho de banda (BW) del canal: 1.5 - 28MHz.
- Variable espaciado portadoras (D_f)= (F_s)/256; donde F_s es la Frecuencia de muestreo.
- Variable tiempo símbolo útil $T_s=T_b+T_g$ ($T_g=G*T_b$).
- G puede variar entre 1/4, 1/8, 1/16, 1/32.
- Modulación portadora BPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM.

BPSK: Transmisión por desplazamiento de fase binaria.

QPSK: Transmisión por desplazamiento de fase cuaternaria.

QAM: Modulación de amplitud en cuadratura de fase.

1.1.6 Acceso Múltiple por División de Frecuencia Ortogonal

El Acceso Múltiple por División de Frecuencia Ortogonal (OFDMA) soporta acceso múltiple, lo cual permite al dispositivo cliente transmitir a través de uno o varios subcanales que le hayan sido asignados. Con 2048 portadoras y 32 subcanales, si un solo canal es asociado al cliente toda la potencia de transmisión se concentra en 1/32 partes del espectro disponible. Esto permite ganar alrededor de 15 dB sobre el sistema OFDM. El acceso múltiple es especialmente ventajoso cuando se utilizan canales de gran ancho de banda. En OFDMA, la subcanalización activa varios usuarios clientes a transmitir al mismo tiempo sobre los subcanales asignados para cada uno de ellos.

OFDMA divide el espacio de la portadora en Ng grupos, cada uno de ellos tiene Ne portadoras, y dentro de cada Ne subcanales, cada uno con una portadora por grupo. En OFDMA con 2048 portadoras, por ejemplo, se puede traducir en Ne=32 y Ng=48 en el canal de bajada, y Ne=32 y Ng=53 en el UL, utilizando el resto de portadoras como bandas de guarda y portadoras piloto. De este modo, cada subcanal lleva asignado una modulación, un código y una amplitud diferente dependiendo de las condiciones del canal de radio en cada instante, permitiendo un uso optimizado de la red [6].

Los parámetros de OFDMA son los siguientes: [6].

- Tamaño FFT (Transformada Rápida de Fourier): 2048.
- Portadoras usadas: 1536.

- Portadoras Pilotos: 166.
- Portadoras guarda: 345.
- BW del canal: 1.25 - 28MHZ.
- Modulación de la portadora: BPSK, QPSK, 16QAM, 64QAM.

En sistemas como WiMAX móvil, la OFDMA permite que los usuarios compartan las subportadoras y las ranuras de tiempo. OFDMA le brinda al estándar 802.16e mayor flexibilidad pues maneja diferentes dispositivos de usuarios con variedad de antenas. Esta técnica permite una reducción de interferencias para los dispositivos de usuarios con antenas omnidireccionales y mejora las capacidades en ambientes de NLOS, lo cual es esencial para soportar usuarios móviles. Además, realiza una división en subcanales que permite asignarlos a diferentes usuarios dependiendo de las condiciones del canal y de sus requisitos de datos.

Como puede verse en el Anexo 1A, en OFDM todas las portadoras son transmitidas en paralelo con la misma amplitud. OFDMA divide el espacio de la portadora en Ng grupos cada uno con Ne portadoras y dentro Ne subcanales. La codificación, modulación y amplitud pueden ser establecidas para cada subcanal basándose en las condiciones del canal para optimizar los recursos de la red.

1.2 Capa física

En una red, el propósito de la capa física es garantizar la entrega de los bits de información de forma confiable entre el transmisor y el receptor utilizando un medio físico ya sean frecuencias de radio o alambres de cobre. Usualmente la capa física no está informada de los requerimientos de QoS y no está enterada de la naturaleza de las aplicaciones que soporta que pueden ser: VoIP, HTTP (protocolo de transferencia de hipertexto) o FTP (protocolo de transferencia de archivos). La capa física puede ser vista como una tubería responsable del intercambio de información sobre un enlace entre transmisores y receptores [7].

La capa física de WiMAX está basada en los estándares IEEE 802.16-2004 y el IEEE 802.16e. Dicha capa puede adaptarse fácilmente, dependiendo del canal y del espectro disponible a la aplicación tecnológica que se requiera. A pesar de que los estándares sirven de guía, las opciones de los parámetros de esta capa son dejadas a la decisión de los diseñadores de los sistemas. Los fabricantes de equipamientos y los proveedores de servicios necesitan comprender los elementos básicos de estos parámetros.

Esta capa está basada en OFDM, que es una técnica elegante y efectiva para vencer la distorsión por multitrayectorias. También soporta algunas técnicas avanzadas para incrementar el rendimiento de la capa de enlace. Estas técnicas incluyen: una poderosa corrección de errores, códigos turbo y Códigos de Paridad de Baja Densidad (LDPC), Solicitud de Repetición Automática Híbrida (HARQ) y arreglos de antenas [6].

1.3 Capa de Control de Acceso al Medio

La Capa de Control de Acceso al Medio (MAC), que reside sobre la capa física, es la responsable de controlar y multiplexar varios enlaces sobre el mismo medio físico. Algunas funciones importantes de la capa MAC en WiMAX son: [6]

- Segmentar o concatenar las Unidades de Servicios de Datos (SDUs) procedentes de capas superiores en Unidades de Protocolo de Datos de la capa MAC (MAC PDU) que constituye el bloque básico de carga útil de la capa MAC.
- Seleccionar el nivel de potencia apropiado a utilizar para la transmisión del MAC PDUs.
- Retransmitir las MAC PDUs que han sido recibidas erróneamente por el receptor cuando se ha utilizado protocolo de solicitud de repetición automática (ARQ).
- Proveer un control de la QoS y gestionar con prioridad las MAC PDUs pertenecientes a diferentes datos y señalizaciones.
- Organizar las MAC PDUs sobre los recursos de la capa física.
- Proveer un soporte a las capas superiores para la gestión de la movilidad.
- Proveer seguridad, así como la gestión de claves.
- Proveer modalidades de ahorro de energía y operación en modo de inactividad.

1.4 Propagación LOS versus NLOS

El canal de radio de un sistema de comunicación inalámbrico es a menudo descrito como LOS o NLOS. En un enlace LOS, una señal viaja a través de un camino directo y sin obstáculos desde el transmisor al receptor. El enlace LOS requiere que la mayor parte de la primera zona

de Fresnell esté libre de cualquier obstrucción. Si este criterio no se cumple, entonces se produce una significativa reducción en el nivel de intensidad de la señal recibida [7].

En un enlace NLOS, una señal alcanza el receptor a través de reflexiones, difracciones y dispersiones. La señal que llega al receptor está formada por una composición de señales que llegan a través de las anteriores formas de propagación. Estas señales tienen diferentes retardos, atenuaciones, polarizaciones y estabilidad relativa frente a la señal que se transmite por el camino directo. El fenómeno de la multitrayectoria puede causar también que la polarización de la señal cambie [7].

Así la reutilización de frecuencias, que normalmente se hace en los despliegues LOS, puede ser problemática en el caso de los NLOS. Sin embargo, hay varias ventajas que hacen los despliegues NLOS deseables. Por ejemplo, estrictos requerimientos de planificación y restricciones en la altura de la antena, a menudo no permiten a la antena ser posicionada para un LOS. Para despliegues celulares contiguos a gran escala, donde la reutilización de frecuencia es crítica, bajar la antena es una ventaja para reducir la interferencia co-canal entre celdas adyacentes. Esto a menudo fuerza a las estaciones base a operar en condiciones de NLOS, ya que en los sistemas LOS no se puede reducir la altura de las antenas porque se perdería la visibilidad directa con el receptor [7].

La tecnología NLOS también reduce los gastos de instalación debido a la facilidad de ubicación de los CPE (*Equipo local del cliente*). La tecnología NLOS y las características mejoradas en WiMAX hacen posible el uso de equipos de interior “CPE”. Esto tiene dos principales retos, primeramente superar las pérdidas de penetración y segundo, cubrir distancias razonables con transmisores de baja potencia. La tecnología WiMAX, resuelve o minimiza los problemas resultantes de las condiciones NLOS mediante el uso de tecnología OFDM, Sub-Canalización, diversidad en la transmisión y en la recepción, modulación adaptativa, técnicas de corrección de errores, control de Potencia y arreglos adaptativos de antenas [7].

1.5 Modulación Adaptativa

Las técnicas de modulación adaptativa de los sistemas WiMAX permiten ajustar el esquema de modulación de la señal dependiendo de las condiciones de la relación señal ruido (SNR) que existen en el enlace de radio. Cuando el enlace de radio presenta una alta calidad, es usada la más alta modulación, dando al sistema la mayor capacidad. Durante un desvanecimiento de la señal, el sistema WiMAX puede desplazar a la señal a un esquema de modulación menor para

mantener la calidad y estabilidad del enlace. Esta característica permite al sistema superar los desvanecimientos selectivos en el tiempo [6].

Para localizaciones cercanas al emisor, la modulación 64QAM es la de mayor calidad y es la utilizada (SNR mayor). Sin embargo, a medida que el receptor se aleja de la estación base la calidad de la señal se va deteriorando y se opta por utilizar una señal de modulación más robusta pero menos eficiente, como es la modulación BPSK [6].

En las figuras 1.2 y 1.3 se muestran los diferentes tipos de modulación que se utilizan en WiMAX.

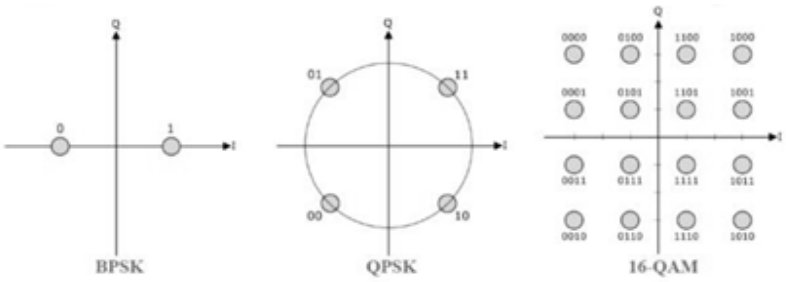


Fig. 1.2 Modulaciones digitales soportadas por WiMAX. Diagrama de constelacioes.

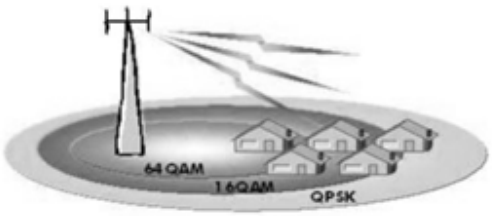


Fig. 1.3 Modulación adaptativa en WiMAX.

1.6 Técnicas de múltiples antenas

La tecnología WiMAX utiliza para su funcionamiento antenas inteligentes o "*Smart antennas*" que combinan múltiples elementos con un procesador de señal capaz de optimizar automáticamente la radiación o el patrón de recepción.

Existen dos tipos de antenas inteligentes, las de haz conmutado, con un número finito de patrones predefinidos o estrategias de combinación (antenas sectoriales) y las de arreglos adaptativos o configuración de haz, más avanzadas, que cuentan con un número infinito de

patrones de iluminación (dependiendo del escenario) y ajustan el diagrama radiante y los nulos en tiempo real. El Anexo 1B muestra estos dos tipos de antenas para su mejor comprensión.

El caso específico de WiMAX utiliza las antenas de arreglo adaptativos que mejoran la recepción de la señal y minimizan las interferencias, dando una ganancia mejor que las antenas convencionales. Este tipo de antenas permiten direccionar el haz principal, y/o configurar múltiples haces, así como generar nulos del diagrama de radiación en determinadas direcciones que se consideran interferentes. Con ello se aumenta la calidad de la señal y se mejora la capacidad por la reutilización de frecuencias. Son aplicables a casi todos los protocolos y estándares inalámbricos (comunicaciones móviles, bucle local inalámbrico (WLL), red de área local inalámbrica (WLAN), satélite, etc.) [8].

Esta tecnología tiene un excelente potencial para aumentar la eficacia del uso del espectro en comparación con los sistemas radiantes tradicionales. Con un control inteligente de la iluminación de la antena se puede ampliar la capacidad y la cobertura de las redes móviles.

1.6.1 Sistemas MIMO

Las llamadas MIMO (múltiples entradas, múltiples salidas) son una tecnología de antenas inteligentes de arreglos adaptativos empleada en WiMAX que aprovecha el fenómeno de multipropagación y radiocomunicaciones en diversidad de espacio para conseguir una mayor velocidad y un mejor alcance del que se consigue con la tecnología de antenas SISO (una entrada, una salida) [9], [10].

La tecnología MIMO emplea varias antenas tanto en el transmisor como en el receptor, y para un mismo ancho de banda y potencia transmitida consigue mejores resultados que los sistemas SISO. La capacidad de un sistema MIMO en un entorno de dispersión por multipropagación, cuando las señales recibidas no están correlacionadas entre sí, es proporcional al número de antenas empleadas. El diseño de las antenas y el proceso de la señal recibida necesitan técnicas especializadas [9].

El diseño de las antenas MIMO busca reducir la correlación entre las señales recibidas. Para ello utiliza los diferentes modos de diversidad que se pueden dar en la recepción, como la diversidad de espacio (al estar las antenas separadas), la diversidad de ganancia (por emplear antenas con diferentes patrones de radiación, ortogonales u otros) y la diversidad de

polarización (antenas con distinta polarización), etc. Estas tres formas de diversidad se muestran en el Anexo 1C [9].

1.6.2 Configuración de Haz

La configuración del haz consiste en la formación de un patrón de iluminación bien determinado, como consecuencia del desfase de la señal en las distintas antenas como se muestra en el Anexo 1D. Sus principales ventajas son una mayor ganancia de la señal además de una menor atenuación con la distancia. Gracias a la ausencia de dispersión, la configuración del haz consigue un patrón bien definido y direccional. En este tipo de transmisiones se hace necesario el uso de dominios de configuración de haz, sobre todo en el caso de múltiples antenas de transmisión. Hay que tener en cuenta que esta técnica precisa un conocimiento previo del canal a utilizar en el transmisor [10].

1.6.3 Multiplexación espacial

La multiplexación espacial consiste en la multiplicación de una señal de mayor ancho de banda en señales de menor ancho de banda, iguales, transmitidas desde distintas antenas. Si estas señales llegan con la suficiente separación en el tiempo al receptor, éste es capaz de procesarlas y distinguirlas, creando así múltiples canales en anchos de banda mínimos. Esta técnica es eficaz para aumentar la tasa de transmisión, sobre todo en entornos difíciles en cuanto a SNR. Únicamente está limitado por el número de antenas disponibles tanto en el receptor como en el transmisor. No requiere el conocimiento previo del canal en el transmisor o receptor. Para este tipo de transmisiones es obligatoria una configuración de antenas MIMO [9].

1.6.4 Diversidad de código

La diversidad de código son una serie de técnicas que se emplean en medios en los que por alguna razón solo se puede emplear un único canal, codificando la transmisión mediante espaciado en el tiempo y la diversidad de señales disponibles dando lugar al código espacio-tiempo. Para aumentar la diversidad de la señal se recurre a una emisión desde varias antenas basándose en principios de ortogonalidad.

La multiplexación de espacio puede ser combinada con la configuración de haz cuando el canal es conocido en el transmisor o combinado con la diversidad de código cuando no es así. La distancia física entre las antenas ha de ser múltiples longitudes de onda en la estación base.

Para poder distinguir las señales con claridad, la separación de las antenas en el receptor tiene que ser de al menos 0,3 λ [10].

1.7 Soporte de la calidad de servicio

El soporte de la calidad de servicio (QoS) es parte fundamental del diseño de la capa MAC. WiMAX móvil posee varias características que le permiten cumplir con los requisitos de QoS para una gran cantidad de servicios y aplicaciones, entre ellas la capacidad de manejar tráfico asimétrico y el poseer un mecanismo flexible de asignación de recursos. En la capa MAC, la QoS es proveído mediante flujos de servicio. En este flujo unidireccional de paquetes se transmite un grupo de parámetros para QoS. Antes de entregar algún tipo de servicio, la estación base y el terminal del usuario establece un enlace unidireccional entre las capas MAC llamado conexión. La capa MAC entonces asocia paquetes que atraviesan la interfaz MAC con un flujo de servicio para ser entregado en la conexión [10], [11].

Los parámetros de QoS asociados con el flujo de servicios definen la clasificación de la transmisión y la asignación en la interfaz de aire. Ya que la interfaz de aire es usualmente el cuello de botella, las conexiones orientadas a QoS pueden habilitar el control punto a punto. Los parámetros del flujo de servicio pueden ser dinámicamente manejados a través de mensajes MAC para acomodar la demanda de servicios de manera dinámica. Los flujos de servicios están basados en el mecanismo QoS y aplica en Bajada (DL) y subida (UL). WiMAX móvil puede ser dinámicamente optimizado para el tipo de tráfico que se esté transportando, cinco tipos de servicios son soportados: [10], [11].

- Servicio Subvencionado No Solicitado (UGS): Está diseñado para soportar flujos de datos en tiempo real constituidos de paquetes de datos de un tamaño fijo emitidos en intervalos periódicos, como T1/E1 y VoIP.
- Servicio de registro en tiempo real (rtPS): Está diseñado para soportar flujos de datos en tiempo real, constituidos por paquetes de datos de un tamaño variable que son emitidos en intervalos periódicos, como el formato de video MPEG.
- Servicio de registro no en tiempo real (nrtPS): Está diseñado para soportar flujos de datos tolerantes al retardo, constituidos por paquetes de datos de un tamaño variable donde se requieren mantener una velocidad mínima, como en FTP.

- Servicio de registro en tiempo real extendido (ErtPS): Está diseñado para soportar aplicaciones en tiempo real como VoIP con supresión de silencio que tiene un flujo variable de datos, pero requiere garantía de flujo de datos y demora. Este servicio solo es parte de los protocolos de WiMAX móvil, no fijo.

- Servicio al mejor esfuerzo (BE): Está diseñado para soportar flujos de datos para los cuales no se requiere un nivel mínimo y pueden ser manejados en los espacios disponibles [6].

WiMAX soporta un amplio rango de servicios y aplicaciones con una variedad de requerimientos que se han resumido en la tabla 1.2.

Tabla 1.2 Relación de servicios y aplicaciones soportados por Wimax.

Designación de servicios de flujo	***Definición de parámetros de calidad de servicios***	***Ejemplos de aplicación***
UGS	Rango máximo sostenido Máxima tolerancia de latencia Tolerancia de jitter	VoIP sin supresión de silencio
rtPS	Rango mínimo reservado Rango máximo sostenido Máxima tolerancia de latencia Prioridad de tráfico	Stream de audio y video como el MPEG
nrtPS	Rango mínimo reservado Rango máximo sostenido Prioridad de tráfico	Protocolo FTP
BE	Rango máximo sostenido Prioridad de tráfico	Transferencia de datos, búsquedas en la Web
ErtPS	Rango mínimo reservado Rango máximo sostenido Prioridad de tráfico Máxima tolerancia de latencia Prioridad de tráfico Tolerancia de jitter	VoIP con supresión de silencio

1.8 Manejo de la potencia

En las aplicaciones móviles, los dos problemas críticos que más se deben tomar en cuenta son el tiempo de vida de la batería y la transferencia (handoff). WiMAX móvil tiene dos tipos de modo de operación para las estaciones móviles para así tener un manejo eficiente de la potencia, el modo dormido y el modo reposo (Idle). También se soporta handoff, para que la estación móvil (MS) pueda cambiar de una estación base a otra mientras se viaja en vehículos, sin interrumpir la conexión.

El modo dormido es un estado en el cual la MS tiene períodos pre negociados de ausencia de la estación base (BS) la reutilización. Estos períodos están caracterizados por la indisponibilidad de la MS respecto a la BS para el tráfico UL y DL. Este modo está pensado para que se minimice el uso de potencia de la MS y minimizar el uso de los recursos de la interfaz de aires de la BS en servicio. El modo dormido también provee la flexibilidad a la MS de escanear otras BS para recoger información para el handoff.

El modo Idle provee un mecanismo en la MS que le permita estar periódicamente disponible para recibir mensajes en paquetes" sin tener que registrarse en una BS específica, al tiempo que la MS se mueve a través de una zona con varias BS. Este modo beneficia la MS, ya que elimina el requerimiento del handoff y beneficia la red y la BS, mediante la eliminación de la interfaz de aire y el tráfico de handoff para la MS que está prácticamente inactiva, mientras la MS conserva un mecanismo para alertarse del tráfico DL entrante.

Para mantener la calidad del enlace de radio entre la BS y la MS y el control sobre todo el sistema de interferencia, un mecanismo de control de potencia es soportado por el enlace ascendente con dos procedimientos iniciales de ajuste y calibración. La BS usa el canal de transmisión de ranging (proceso o método para determinar la distancia a partir de una ubicación o la posición a otra ubicación o posición) de UL desde varios MS para estimar los ajustes de control de potencia tanto el inicial como los sucesivos. La BS usa mensajes dedicados de manejo MAC para indicar al MS el ajuste necesario del nivel de potencia. Entre sus características está que el control de potencia debe soportar fluctuaciones de potencia de 30 dB/s y que la MS mantiene la misma densidad de potencia transmitida, es decir, si el número de subcanales colocados aumentan o decrecen, el nivel de potencia transmitida es directamente proporcional a este aumento, con mensajes adicionales para esto. La BS se encarga de ajustar este nivel de potencia para mantener en orden la densidad espectral de potencia. La MS puede temporalmente ajustar estos niveles cuando es enviada por la BS [6].

1.9 Modelos de propagación aplicados a WiMAX

WiMAX opera en bandas de frecuencia y en condiciones para las cuales pocos modelos de canal desarrollados hasta el momento se aplican de manera eficiente, debido a que aquellos que ofrecen resultados más aproximados a la realidad han sido construidos empíricamente y su extrapolación a otras bandas de trabajo y condiciones de operación es compleja si se quiere garantizar exactitud razonable. Adicionalmente, gran cantidad de modelos consideran solo

algunos fenómenos y en consecuencia, deben aplicarse varios de ellos antes de obtener un resultado práctico

Para el canal en condiciones de NLOS la señal puede experimentar dispersión, difracción, cambios de polarización y reflexión, factores que afectan la intensidad de la señal recibida. Se han desarrollado varios modelos que procuran caracterizar este ambiente de frecuencia de radio (RF) y permitir la predicción de la intensidad de la señal de RF en recepción, los cuales en su mayoría están basados en medidas empíricas y son utilizados actualmente para predecir la cobertura a gran escala en sistemas celulares.

Estos modelos proporcionan estimaciones de las pérdidas de trayecto, considerando la distancia entre el transmisor y el receptor, factores del terreno, altura de las antenas y frecuencias de operación. Desafortunadamente ninguno de estos acercamientos trata adecuadamente las necesidades y las condiciones de los sistemas FWA [12], [13].

1.9.1 Modelo de propagación NLOS – Erceg

El grupo IEEE 802.16 ha adoptado el modelo de propagación NLOS – Erceg como el modelo para aplicaciones de banda ancha fijas de WiMAX y presenta tres variantes, basadas en el tipo de terreno: Erceg A, para terrenos montañosos con densidad de árboles de moderada a alta, Erceg B para terrenos medios, terrenos montañosos con densidad de árboles ligera o terrenos llanos con densidad de árboles de moderada a alta y Erceg C para terrenos llanos con densidad de árboles ligera [6].

La ecuación del modelo Erceg viene dada por: [6]

$$P_L = \overline{P_L} + S = A + 10\alpha \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + S \qquad para: d \geq d_0$$

Ecuación 1.1

Esta ecuación refleja las pérdidas de trayecto en dependencia de la altura promedio de la antena de la BS (10m y 80m) y del tipo de terreno.

Donde:

d_0 = 100m (distancia de referencia del modelo).

d: Distancia entre el transmisor y el receptor (Km).

/P_L: *Pérdidas de trayecto medias (dB).*

P_L: Pérdida de trayecto instantánea (dB).

A: Pérdidas de trayecto en espacio libre (dB) a la distancia d_0.

S: Desvanecimiento por sombras (dB).

α: Exponente de pérdidas de trayecto.

El valor instantáneo del término (α) está dado por:

$$\alpha = \left(A - Bh_t + \frac{C}{h_t}\right) + x\sigma_\alpha \quad ó \quad \alpha = \left(A - Bh_t + \frac{C}{h_t}\right) \quad para: \quad 10m \geq h_t \geq 80m$$

Ecuación 1.2

Donde:

h_t : Altura de las antenas transmisoras (m).

x: Variable aleatoria Gaussiana con media cero y varianza unitaria.

σ_α: Desviación estándar del exponente de pérdida de trayecto.

A la hora de calcular γ algunos criterios no tienen en cuenta xσs con lo que la expresión solo tomaría el primer término (Ecuación 1.2). Los parámetros del modelo Erceg, A, B, C y sα para las distintas categorías de terreno están dados en la Tabla 1.3. (En ocasiones se brindan estos valores asumiendo que S sigue una distribución normal con desviación estándar de 8.2-10.6 dB, ya que su valor varía generalmente en ese rango).

Tabla 1.3: Parámetros del Modelo Erceg

Parámetros	**Modelos Erceg**		
	A	**B**	**C**
A	4.6	4.0	3.6
B	0.0075	0.0065	0.005
C	12.6	17.1	20
S_a	0.57	0.75	0.59
μ_s	10.6	9.6	8.2
σ_s	2.3	3.0	1.6

El desvanecimiento por sombra representa las pérdidas de potencia a causa de zonas de silencio, creadas por las condiciones naturales del terreno u otros objetos que se interpongan momentáneamente. Por este motivo S es una variable aleatoria gaussiana de media cero, expresada como el producto de γσ, donde γ es una variable aleatoria gaussiana de media cero con varianza unitaria y σ es la desviación estándar de S, la cual no es más que otra variable aleatoria gaussiana con media μ_s y una desviación estándar σ_s de forma que:

$$\boldsymbol{S = y\sigma = y(\mu_s + z\sigma_s)}$$

Ecuación 1.3

Donde "**z**" es otra variable aleatoria Gaussiana con media cero y varianza unitaria.

Para generalizar los resultados obtenidos de las pruebas y ajustarlos a diferentes condiciones de alturas, directividad de las antenas receptoras y a frecuencias de trabajo mayores, se agregaron tres factores de corrección para P_L, para el mismo rango de distancia y altura del transmisor que el modelo patrón:

$$\overline{P_L} = A + 10\gamma \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + \Delta PL_f + \Delta PL_{h(r)} + \Delta PL_{\theta(r)} \qquad [dB] \quad para\ d \geq d_0$$

Ecuación 1.4

Donde:

ΔPL_f: Corrección para la frecuencia.
$\Delta PL_{h(r)}$: Corrección para la altura de la antena receptora.
$\Delta PL_{\theta(r)}$: Corrección para la directividad de la antena receptora.
Y están dados por:

$$\Delta PL_f = 6 \log\left(\frac{f}{1900}\right) \qquad [dB]$$

Ecuación 1.5

$$\Delta PL_{h(r)} = -10.8 \log\left(\frac{h_r}{2}\right) \quad [dB] \quad para \quad 2m \leq h_r \leq 10m \quad (Modelo\ Erceg\ A\ y\ B)$$

Ecuación 1.6

$$\Delta PL_{h(r)} = -20 \log\left(\frac{h_r}{2}\right) \qquad [dB] para \quad 2m \leq h_r \leq 10m \quad (Modelo\ Erceg\ C)$$

Ecuación 1.7

$$\Delta PL_{\theta(r)} = 0.64 \ln\left(\frac{\theta}{360}\right) + 0.54 \left[\ln\left(\frac{\theta}{360}\right)\right]^2 \qquad [dB]$$

Ecuación 1.8

Donde:
f: Frecuencia [MHz] de 1900 MHz a 3500 MHz.
hr: Altura de las antenas receptoras [m] de 2 m a 10 m.
θ: Semi-ángulo de media potencia.

El término $\Delta PL\theta(r)$ es utilizado por determinados autores, el resto no lo toman en cuenta, aunque es de destacar que el uso de una antena de un $\Delta\theta = 20°$ puede ser significativo y alcanzar un $\Delta PL\theta(r)$ de 7dB aproximadamente [6].

1.9.2 Modelo ECC – 33

El modelo NLOS ECC - 33 fue desarrollado por el Comité Electrónico de Comunicaciones y es recomendado por la IEEE 802.16 WG como el modelo de pérdida de trayecto para el diseño de redes WiMAX. Tiene en cuenta, a diferencia que su predecesor, la difracción sobre los tejados y las múltiples reflexiones de la señal para la gran variedad de edificaciones típicas de Japón, pero al igual que el Okumura-Hata, es aplicable tanto en ciudades grandes como medianas y posee correcciones para zonas suburbanas y áreas abiertas.

El modelo ECC-33 para pérdida de trayecto está dado por: [21].

$$P_L = A_{fs} + A_{bm} - G_b - G_r \quad [\text{dB}] \qquad \text{Ecuación 1.9}$$

Donde:

Afs: Pérdidas por espacio libre [dB].

Abm: Pérdidas básicas de trayecto medias [dB].

Gb y Gr: Factores de ganancia con la altura de las antenas de la BS y el la MS.

$$A_{fs} = 92{,}4 + 20\log d + 20\log f \quad [dB] \qquad \text{Ecuación 1.10}$$

$$A_{bm} = 20{,}41 + 9{,}83\log d + 7{,}894\log f + 9{,}56\,(\log f)^2 \quad [dB] \qquad \text{Ecuación 1.11}$$

$$G_b = \log\left(\frac{h_b}{200}\right) \times [13.985 + 5.8(\log d)^2] \quad [dB] \qquad \text{Ecuación 1.12}$$

$$G_r = [42.57 + 13.7\log(f)] \times [\log(h_r) - 0.585] \quad [dB] \quad ciudades\ medianas \qquad \text{Ecuación 1.13}$$

$$G_r = 0.795\,h_r - 1.862 \quad [dB] \quad ciudades\ grandes \qquad \text{Ecuación 1.14}$$

Donde:

f: Frecuencia [GHz], de 150 a 4000MHz.

d: Distancia entre BS y MS [Km], de hasta solo 10km.

h_b: Altura efectiva de la antena transmisora [m], de 20 a 200m.

h_r: Altura de la antena receptora [m], de 1-10m.

1.10 Conclusiones parciales

En este capítulo se ha analizado el proceso evolutivo experimentado por el estándar 802.16 desde su surgimiento. Al término del mismo, luego de explicarse en esencia las características de las redes WiMAX, concluimos que las redes inalámbricas son ideales para dar servicios a zonas rurales poco pobladas o donde una infraestructura de cables sería muy complicada y costosa. Este tipo de sistemas solo precisa de la instalación de radio bases y equipos terminales, reduciendo los costos referidos al medio de transmisión y contando con menores gastos futuros por concepto de operación y mantenimiento. Por estas razones, a pesar de que algunas tecnologías cableadas pueden alcanzar velocidades de transmisión y anchos de banda superiores, las redes inalámbricas se perfilan como alternativas menos costosas y efectivas para este tipo de área, con la ventaja además de permitir movilidad de sus terminales.

Capítulo 2 Caracterización de la Red de acceso inalámbrica en Mayabeque. Comparación de resultados en las pruebas de campo

La joven Provincia Mayabeque se ubica en la Región occidental de Cuba, entre los 22°34', 23°12' de latitud norte y los 82°28', 81°40' de longitud oeste, limita al norte con la provincia de La Habana y el Estrecho de la Florida, al sur con el Golfo de Batabanó, al este con la Provincia Matanzas y al oeste con la Provincia Artemisa [14].

La provincia cuenta con un total de 11 municipios (ver figura 2.1), con San José de las Lajas como capital provincial con una población de 73939 habitantes, es la segunda de menor extensión entre todas las Provincias de Cuba con 3732,73 km^2, solo por delante de La Habana [15].

Figura 2.1 Ubicación de la provincia Mayabeque y sus municipios

Con una población de 381176 habitantes al cierre de 2010, la menor del país, se ubican en su territorio 278 asentamientos, de ellos el 41 % con más de 300 habitantes [14].

2.1 Características principales del territorio

El relieve de la provincia Mayabeque está caracterizado por la Llanura Habana-Matanzas donde se encuentran la Llanura sur Habana-Matanzas y las Alturas de Bejucal y Madruga, pertenecientes a las Alturas de Bejucal Madruga Coliseo, donde se encuentra el punto culminante de la provincia, el Palenque con 331,5 metros de altura [15].

El territorio consta primeramente de la llanura meridional cársica conformada predominantemente por suelos ferralíticos rojos, de elevada productividad, y con alto potencial hidrogeológico, que convierten a la región en fuente de irrigación subterránea que se emplean para el abasto de agua a la población de la provincia y la capital del país. Al centro y norte se

encuentran coordilleras de escasa elevación como son las Alturas de Bejucal-Madruga-Coliseo y las Alturas de Habana-Matanzas, que transcurren casi paralelamente de este a oeste. Entre ambas sierras se encuentra un valle de anchura variable (estrecho en San José de las Lajas y amplio en Bainoa, cuenca superior del Mayabeque), también con extenso uso agrícola. El valle se une en su extremo oriental con el valle del Río San Juan que desemboca en la Bahía de Matanzas. Las mayores alturas son la Loma del Grillo (321 m), en las Alturas de Bejucal-Madruga-Coliseo y El Palenque (331 m) en las Alturas de Habana-Matanzas, elevación vecina del conocido Pan de Matanzas [15].

2.2 Sistemas de acceso existentes en el territorio

En este territorio está enclavada la Loma Travieso (Hershey), primer nodo repetidor de la Cadena Troncal Nacional por Microonda hacia el Oriente. Si tomamos por definición la Red de Acceso como el segmento de red que es soporte de transmisión entre un nodo de Conmutación y el Cliente, se puede decir que se cuenta con 67 servicios soportados por sistemas de radioenlaces de acceso. Dentro de estos sistemas existe otra división importante: los sistemas Punto a Punto y los sistemas Punto Multipunto.

Los sistemas punto a punto de acceso están diferenciados en Monocanales y Bicanales. En el territorio se cuenta con 23 enlaces monocanales y 8 enlaces bicanales. La configuración punto multipunto es ideal para de redes de microondas de baja frecuencia. La topología punto multipunto permite al operador de red, llegar al mayor número de abonados con el menor costo posible, y limita drásticamente el número de conmutadores necesarios para la red. Como sistemas punto – multipuntos de acceso esta provincia cuenta con un sistema Trasa el cual posee 2 estaciones con una capacidad máxima de 30 servicios cada una.

Con esta red de acceso inalámbrica, ETECSA se ve ante la imposibilidad de garantizar el ancho de banda requerido para el desarrollo de los programas priorizados de la Revolución y de la Batalla de Ideas, para cumplir con las demandas de diversidad y calidad de los servicios que traerá consigo el Programa Nacional de Informatización de la Sociedad Cubana en los centros educacionales, centros de investigación y en el sector residencial en general de la provincia Mayabeque. Lo anterior implica la necesidad de migrar los actuales sistemas de telecomunicaciones, hacia sistemas que permitan altas velocidades de transmisión en los ambientes rurales y suburbanos, y así desarrollar una red inalámbrica de banda ancha con la

calidad y fiabilidad requeridas, en un corto plazo de ejecución y reduciendo al máximo los costos.

2.2.1 Sistemas Monocanales

Los sistemas monocanales operan en la banda de VHF, específicamente en 248 – 243 MHz ó 168 – 163 MHz. En cada una de estas bandas están autorizados para estos enlaces en ETECSA 10 pares de frecuencia (ver tabla 2.1 y tabla 2.2). Como norma se utiliza la frecuencia alta en transmisión en el lado central y la frecuencia baja en transmisión en lado abonado. La separación entre canales adyacentes es de 25 KHz [28].

Tabla 2.1 Frecuencias autorizadas para enlaces Mono y Bicanales en la banda 248 – 243 MHz

Canal	Frecuencia Transmisión (MHz)	Frecuencia Recepción (MHz)
Ch 1	248.275	243.475
Ch 2	248.300	243.500
Ch 3	248.325	243.525
Ch4	248.350	243.550
Ch 5	248.375	243.575
Ch 6	248.400	243.600
Ch 7	248.425	243.625
Ch 8	248.450	243.650
Ch 9	248.475	243.675
Ch 10	248.500	243.700

Tabla 2.2 Frecuencias autorizadas para enlaces Mono y Bicanales en la banda 168 – 163 MHz.

Canal	Frecuencia Transmisión (MHz)	Frecuencia Recepción (MHz)
Ch 1	168.200	163.200
Ch 2	168.225	163.225
Ch 3	168.250	163.250
Ch4	168.275	163.275
Ch 5	168.525	163.525
Ch 6	168.550	163.550
Ch 7	168.300	163.100
Ch 8	168.325	163.125
Ch 9	168.350	163.150
Ch 10	168.375	163.175

Estos sistemas son los de menor capacidad pues solamente soportan un canal de voz en modo de operación dúplex y no posibilitan transmisión de datos. Los modelos utilizados se resumen de la siguiente manera (Anexo 2A).

Los enlaces trabajan generalmente con polarización vertical, solamente se utiliza la polarización horizontal cuando existe algún enlace similar vecino para garantizar una separación de 20 dB. Utilizan como elemento de radiación antenas tipo yagui [18].

2.2.2 Sistemas Bicanales

Los sistemas de radioenlaces por bicanales trabajan en la banda de frecuencias de 248 – 243 MHz, banda autorizada para ETECSA. Como norma se utiliza la frecuencia alta en transmisión en el lado central y la frecuencia baja en transmisión en lado abonado. Estos sistemas soportan dos canales de voz en operación dúplex con una separación mínima de 5 MHZ y no permiten transmisión de datos. Solamente está instalado un tipo de modelo (Anexo 2A). Similarmente trabajan con polarización vertical y horizontal si existiese algún enlace vecino. Utilizan antenas tipo yagui. La potencia de transmisión se ajusta entre 2.5 y 10 W de acuerdo a las características del enlace. El receptor posee una sensibilidad útil de 0.9 µV/50 Ohm (-108 +/-1 dBm) [17], [19].

2.2.3 Sistema Trasa

El sistema de Telefonía Rural de Acceso Múltiple (TRAM) marca modelo B612 está específicamente diseñado para brindar servicio telefónico en zonas rurales. El sistema permite a un abonado rural acceder a la Red Telefónica Pública en forma automática. El sistema opera con 8 canales de radio dúplex en bandas de VHF y utiliza modulación de frecuencias (FM).

El abonado accede por Acceso Múltiple a uno de los canales libres del Sistema y se conecta vía radio en forma automática a su línea telefónica personalizada asociada a la central de conmutación local. El sistema utiliza inteligencia distribuida con control por microprocesador en cada canal, lo que confiere mayor confiabilidad operativa.

El acceso a los canales es aleatorio y el barrido de canales se realiza por canales impares en modo ascendente y por canales pares en modo descendente con lo que se logra una mejora en el grado de servicio de la Central y una distribución pareja en la utilización de los canales de radio. El sistema utiliza técnica de multiplexado en tiempo de la información de audio lo que simplifica el proceso de conmutación de líneas.

El sistema opera en la banda de frecuencias de 165 a 167.5 MHz en Transmisión y en la banda de 171 a 173.5 MHz en Recepción. Dispone de 8 canales de radio dúplex con una separación entre canal de 25 kHz. El sistema es de construcción modular alcanzando una capacidad

máxima de 120 abonados, en nuestro caso solamente contamos con 1 módulo por estación de 30 abonados (Anexo 2C) [32].

Como se puede apreciar el sistema Trasa es un básico sistema de telefonía rural, diseñado solamente para bajos volúmenes de tráfico de voz. No tiene la capacidad de soportar transmisiones de datos. El equipamiento tiene el alto inconveniente de no permitir la gestión de la estación base ni de los abonados por lo que puede ser considerado un sistema rudimentario y obsoleto.

2.3 Análisis comparativo de los suministradores de soluciones WiMAX

Actualmente existen algunos fabricantes que ofertan equipos WiMAX para las diferentes soluciones de redes, cada uno de los cuales promueve sus productos exponiendo las ventajas que presentan, con la finalidad de que las empresas reemplacen el cableado físico por soluciones inalámbricas con un gran ancho de banda o brinden servicios a lugares donde el cableado no sea la opción más viable.

Cada uno de los fabricantes desarrolla basado en las funciones generales descritas en el capítulo 1, sus estaciones base con sus CPE y sus controladores de estación base, de acuerdo a sus intereses [25].

2.3.1 Características técnicas del equipamiento del proveedor Alvarion

Alvarion es una empresa fundada en 1992 en Tel Aviv Israel y se dedica al suministro de sistemas de banda ancha inalámbricos para compañías operadoras de telecomunicaciones, proveedores de servicios de Internet (ISP) y operadores de redes privadas.

Las soluciones que provee este suministrador cubren la totalidad de las bandas de frecuencia, ofreciendo soluciones principalmente para el acceso en la última milla. Otras aplicaciones incluyen el enlace por vía indirecta o directa de voz y datos, cobertura móvil, extensiones de red móvil, interconexión comunitaria, comunicaciones para la seguridad pública y conectividad de red privada.

Entre las características de estos equipos destacan:

- Alta capacidad (hasta 20 Mbps throughtput neto agregado).
- Utiliza la técnica OFDM.

- Modulación adaptativa (64QAM, 16QAM, QPSK y BPSK). 8 niveles.
- Control Automático de Potencia (ATPC).
- Selección Dinámica de Frecuencia (DFS).
- Arquitectura Alvarion (IDU + ODU).

Sin embargo una de las principales ventajas de este equipamiento es la posibilidad de realizar enlaces NLOS o con visión parcialmente obstruida OLOS [28].

Solución WiMAX Alvarion. Especificaciones y características

Alvarion ha desarrollado para el empleo de WiMAX, desde sus inicios varios modelos, todos con gran aplicación a nivel mundial. BreezeMAX es una plataforma WiMAX que forma la base de la solución WiMAX de Alvarion. Esta plataforma ofrece a los operadores de telecomunicaciones gran cobertura, capacidad y rendimiento para proporcionar servicios de excelente calidad y una experiencia de usuario superior. La familia BreezeMAX de estaciones base y antenas aborda la necesidad de acceso a servicios convergentes de datos, voz, video y multimedia sobre redes todas IP (ALL IP). BreezeMAX ofrece seguridad, calidad y muy alto rendimiento y disponibilidad. La solución utiliza una gran variedad de esquemas para instalaciones con cobertura y capacidades óptimas, ASN-GW (*Access Service Network – Gateway*) centralizado y distribuido, y una arquitectura central de red y gestión. Otras características de esta plataforma son: [32]

- Arquitectura de red modular, escalable, a prueba del futuro, e instalaciones flexibles a pagar a medida que se crece para una penetración rápida en el mercado
- Tecnologías de radio avanzadas para la gestión de recursos de radio
- Redundancia de componentes y sistema integral de gestión de redes
- Más usuarios por emplazamiento, mayor ancho de banda disponible para más aplicaciones y servicios, y menores gastos operativos y de capital (OPEX y CAPEX)

En Cuba es utilizada la BreezeMax 3500 en una de las pruebas de campo realizada con el objetivo de su posible implementación. Esta plataforma presenta las características que se describen a continuación.

Estación Base

También conocida como radio base es una instalación fija para la comunicación bidireccional, es decir sirve como punto de acceso a una red de comunicación fija (como la Internet o la red telefónica) o para que dos terminales se comuniquen entre sí a través de la estación base para WiMAX.

Se encargan de entregar permisos y certificados para autenticar a los usuarios; define servicios de identificación de redes IP home, y calidad de servicio. Los diseños de la estación base varían en función del costo, desempeño y tamaño físico, pero podemos clasificarlas ampliamente en dos categorías: Macro y Micro. La estación base micro posee el menor costo y desempeño, y debido a sus limitadas capacidades son adecuadas para implementaciones comerciales con pocos clientes. La estación base macro se asemeja a aquellas utilizadas en las redes celulares y su costo es más alto, se tienen mayores capacidades ya que se utilizan múltiples sectores. Debido a que cada sector opera independientemente, tiene un canal banda base dedicado y para soportar la expansión de la red, la estación base macro emplea un diseño basado en chasis. Los sectores pueden ser montados en una torre, separados una cierta distancia.

Los componentes de la Estación Base son la unidad de procesamiento, la cual es el corazón de la estación base, administra los componentes de la estación base y las unidades de suscriptor; la unidad de acceso que está comprendida por a IDU y la ODU; la unidad de interfaz de alimentación que es la interfaz entre la estación base y la fuente de alimentación DC; la unidad de alimentación de respaldo y la unidad de ventilación.

Tabla 2.3 Características de la BTS BreezeMax

Características Estación Base	Alvarion BreezeMAX
Frecuencia de operación	3.5 GHz
LOS y NLOS	si
Capa Física PHY	OFDM 256 FFT
Método de acceso	FDD y TDD
Tamaño del canal	1.75, 3.5 MHz
Encriptación Interfaz Aire	DES y AES
Alcance	30 Km LOS 5 Km NLOS
Potencia Tx	28 dBm
Sensibilidad	-82/85 dBm -100/103 dBm
Interfaces	Ethernet RJ45
Características de red	802.1Q, DiffServ DHCP, NAT, VPN

Unidad de Suscriptor

Se le denomina unidad de suscriptor (SU) o CPE (Costumer Premises Equipment), es utilizado para conectar a la red de comunicaciones a los usuarios, generalmente consta de dos tipos de interfaces una por aire para el acceso inalámbrico WiMAX y otra por cables de tipo Ethernet para configuración o comunicación con otros equipos para proveer de servicio al usuario, posee en el bloque de radio frecuencia mecanismos híbridos ARQ para detección y corrección de errores, posee modulación adaptativa lo cual permite obtener alta eficiencia espectral y garantizar que la tasa de bits erróneos sea pequeña. Para los clientes que solicitan voz además de servicios de banda ancha, el CPE específico permitirá la conexión del teléfono estándar o de los teléfonos de VoIP.

Tabla 2.4 Características técnicas de la estación suscriptora.

Características CPE BreezeMax	**(PRO CPE)**
Frecuencia de operación	3.5 GHz
LOS y NLOS	si
Capa Física PHY	OFDM 256 FFT
Método de acceso	FDD y TDD
Tamaño del canal	1.75, 3.5, 5, 7, 10 MHz
Encriptación Interfaz Aire	DES y AES
Alcance	25 Km LOS 3 Km NLOS
Potencia Tx	20 y 24 dBm
Sensibilidad	-103 dBm
Ganancia de la antena	17 dbi
Interfaces	10/100 Base-T, 802.11gWiFi, RJ-11 POTS, E1/T1
Características de red	802.1Q, 802.1p, DiffServ

DES: (Data Encryption Standard) Estándar de encriptación de datos.

AES: (Advanced Encryption Standard) Estándar de encriptación avanzada [29].

Sistema de gestión

La arquitectura basada en IP posibilita la administración de todos los componentes desde cualquier punto del sistema. Los componentes BreezeMax pueden ser administrados usando herramientas estándar de gestión a través de agentes SNMP que implementan MIBs estándar y propietarios. Las mismas herramientas de dirección SNMP también pueden usarse para

manejar otros componentes del sistema incluyendo switchs, routers y equipos de transmisión. Las características de seguridad incorporadas en las unidades BreezeMax restringen el acceso para propósitos de administración para direcciones específicas IP y/o dirección del lado Ethernet y/o inalámbrico.

El BreezeCONFIG es una aplicación basada en SNMP diseñada para operar componentes de sistema BreezeMax y actualizar versiones de software. El administrador puede usar BreezeCONFIG para controlar un número alto de unidades de una red simple. BreezeCONFIG puede actualizar la configuración de varias unidades simultáneamente, así reduce el tiempo de mantenimiento y de configuración de la unidad. Desde esta aplicación se acceden a todas las posibilidades de configuración del equipo. El software de gestión más empleado por Alvarion es AvariSTAR.

AlvariSTAR es un sistema integral de administración de red Carrier Class para productos de acceso de banda ancha de Alvarion. AlvariSTAR está diseñado para los más avanzados centros de operación de red de proveedores de servicio (NOCs), permitiendo la operación, administración y mantenimiento.

AlvariSTAR provee las siguientes funcionalidades.: Búsqueda de dispositivos. Inventario de dispositivos. Topología. Administración de fallas. Administración de configuración. Monitoreo de comportamiento. Actualización de software de los dispositivos. Administración de seguridad. Interfaces a otros sistemas de administración [30].

2.3.2 Características técnicas del equipamiento del proveedor Huawei

Huawei Technologies Co. Ltd es el mayor fabricante de equipamiento de redes de telecomunicaciones en China y uno de los líderes mundiales en esta industria. La empresa apuesta por una oferta de innovadores productos, servicios y soluciones, personalizados y diseñados para crear valor a largo plazo y potencial de crecimiento para sus clientes.

Los productos y soluciones de Huawei abarcan productos inalámbricos (LTE/HSPA/WCDMA/EDGE/GPRS/GSM, CDMA2000 1xEV-DO/CDMA2000 1X, TDSCDMA y WiMAX), productos de red core (IMS, softswitch móvil, NGN), productos de red (FTTx, xDSL, ópticos, enrutadores, conmutadores LAN), aplicaciones y software (IN, servicio de datos móviles, BOSS), así como terminales (UMTS/CDMA). El diseño de los principales productos se basa en el chipset ASIC de Huawei y utiliza plataformas compartidas para proporcionar soluciones rentables y de calidad [31].

Solución WiMAX de Huawei. Especificaciones y características

El proveedor Huawei ofrece una solución integrada por los siguientes componentes o bloques funcionales entre otros.

WASN9770: Huawei WiMAX ASN-GW

BTS3703: Huawei WiMAX BS

CSN: Connectivity Service Network

Fixed CPE: Fixed customer premises equipment

PCMCIA: WiMAX PCMCIA card

Servidor AAA: Authentication, Authorization and Account

Servidor DHCP: Dynamic Host Configuration Protocol

Estación Base

La BTS3703 está compuesta por la **BBU** (Unidad banda base) que procesa las señales en banda base y la **RRU** (Unidad Remota de radio).

Tabla 2.5 Especificaciones y características

Modo de trabajo	Bandas de frecuencias de trabajo	
TDD	2.3 GHz	2.3 GHz a 2.4 GHz
	2.5 GHz	2.496 GHz a 2.690 GHz
	3.5 GHz	3.4 GHz a 3.6 GHz

Potencia de transmisión

Cuando trabaja en las bandas de 2.3GHz ó 2.5GHz la potencia máxima de transmisión de una antena es 10W y la máxima potencia de transmisión de un RRU es 20W y cuando trabaja en las bandas de 3.5GHz la potencia máxima de transmisión por el puerto de la antena es 5W y la máxima potencia de transmisión de un RRU es 10W. Además soporta una banda guarda de 5MHz y 10MHz.

Sensibilidad del receptor

Tabla 2.6 Especificaciones de capacidad.

Tipo de modulación	Sensibilidad del Rx (dBm) en la banda guarda de 5MHz	Sensibilidad del Rx (dBm) en la banda guarda de 10MHz
QPSK-½	-97.2	-94.1
QPSK-¾	-93.8	-90.7
QAM16-½	-91.5	-88.4
QAM16-¾	-87.4	-84.3

Un BBU3703 puede conectarse con tres RRU3701Cs, cada uno de los cuales está dirigido a uno de los tres sectores, como se puede ver en el Anexo 3B.

Cuando el ancho de banda es 10 MHZ, cada sector soporta como máximo 30 Mbit/s de datos en su totalidad. Por consiguiente, tres sectores de un BTS3703 soportan un máximo de 90 Mbit/s de datos en su totalidad, mientras que cuando el ancho de banda es 5 MHz, cada sector soporta un máximo de 15 Mbit/s de datos en su totalidad. Por consiguiente, tres sectores de un BTS3703 soportan un máximo de 45 Mbit/s de datos en su totalidad.

Cuando la PUSC con todo SC está en red, la porción TDD de 31:15 y G.729A modo de codificación están siendo utilizados (la comprensión de encabezamiento se emplea y la supresión silenciosa no), un solo portador soporta el acceso máximo de 108 abonados para VoIP si el ancho de banda es 10MHz, o soporta al acceso máximo de 54 abonados para VoIP si el ancho de banda es 5MHz, mientras que cuando la PUSC con todo SC está en red, la porción TDD de 31:15 y G.729A modo de programación están siendo utilizados (la comprensión de encabezamiento y la supresión silenciosa se emplean), un solo portador soporta el acceso máximo de 216 abonados para VoIP si el ancho de banda es 10MHz, o soporta al acceso máximo de 108 abonados para VoIP si el ancho de banda es 5MHz [31].

Controlador de radio bases ASN-GW

El WASN9770 de Huawei cumple con los estándares de TIA/EIA y con los protocolos del grupo de trabajo WiMAX (WiMAX-NWG). El ASN-GW es uno de los elementos claves del sistema WiMAX en el servicio de acceso a la red. Como un dispositivo gateway para la MS para acceder a una red de datos de paquete externa, el ASN-GW es ubicado de forma tal que conecta el ASN y el CSN. Este, además conecta la MS a una red IP, proporcionando servicios de paquetes de datos.

Presenta diferentes tipos de interfaces: FE-E-RJ45 (10/100 Mbit/s), 1000Base-TX-RJ45 (1000 Mbit/s) y 1000Base-GBIC (1000 Mbit/s). El WASN9770 permite programar la QoS y provee los cinco tipos de esta definidos en WiMAX. [27].

La capacidad de este controlador queda plasmada en la tabla 2.7.

Tabla 2.7 Capacidad del WASN9770.

Elemento	Desempeño
Número de flujos de servicios que pueden ser activados al mismo tiempo	600 000
Número de subscriptores IP-CS aceptados al mismo tiempo	300 000
Número de subscriptores Eth-CS aceptados al mismo tiempo	100 000
Máximo de Asignaciones de frecuencias	1 000
Máxima capacidad de transferencia de paquetes	3Gbit/s
Número de dominios	1 000
Máximo número de túneles GRE VPN	1 000
Máximo número de usuarios PMIP (Proxy-Mobile IP)	30 000
Máximo número de usuarios de direcciones MAC	100 000

Servidor AAA

El infoX-AAA implementa el servidor RADIUS. Como un servidor RADIUS, el infoX-AAA se conecta con el ASN-GW en la red WiMax para realizar la autenticación de acceso, autorización y contabilidad de los usuarios. Para la autenticación de acceso de usuario soporta diferentes tipos de mecanismos y los datos de los usuarios son guardados en la base de datos local del infoX AAA.

Mediante los procedimientos de autenticación permite al CPE la entrada a la red, autoriza al uso de recursos y posible facturación del servicio. En el AAA se almacenan perfiles de usuario que contienen la lista de servicios con sus correspondientes QoS(Calidad de Servicio). Cuando un Terminal accede a la red y es validado, estos datos son transferidos del AAA al ASNGW y de ahí a la BTS correspondiente. En caso de ausencia de AAA, se deben declarar en el ASNGW estos perfiles [31].

Para la autorización permite asignar direcciones IP estáticas, asignación de direcciones IP dinámicas y repartir el perfil de usuario.

Servidor DHCP

Este servidor se utiliza para asignar direcciones IP de forma dinámica de las BTS a los CPE. El ASNGW tiene esta función incorporada, pero la ventaja de disponer de estos servidores independientes es que se puede manejar mayor cantidad de usuarios simultáneamente y por lo tanto, de conexiones. Si se prescinde de él, el ASNGW debe asumir esta función.

Equipos terminales

Los equipos terminales pueden ser outdoor o indoor. Como equipo terminal outdoor la solución de Huawei implementa el modelo CPE BM8201, el cual presenta las siguientes características:

- Cumple con el estándar IEEE802.16e-2005.
- Frecuencia de operación: 2.5 GHz.
- Soporte para TDD.
- Modulación OFDMA con 512/1024 puntos de la FFT, QPSK, 16QAM y 64QAM.
- Soporte de seguridad para AES-CCM, EAP-TLS/EAP-TTLS, PKMv2 y X.509.
- Un puerto de consola RJ – 45.
- Antena direccional interna de 13 dBi.
- Potencia de salida elevada, típicamente 25.5 dBm.
- Protección contra sobrevoltaje.
- Soporta antenas MIMO 1Tx/2Rx.
- Facilidad de uso de interfaz de Web para la gestión y configuración.

El terminal indoor modelo CPE BM625 es un producto propietario desarrollado por Huawei basado en el estándar EEE 802.16e-2005, el cual presenta las siguientes características: [32]

- Frecuencia de operación: 2.496~2.69 GHz.
- Ancho de banda/ Tamaño de la FFT: 5 MHz/512, 10 MHz/1024.
- Modo dúplex: TDD.
- Modulación: QPSK, 16QAM, 64QAM.
- MIMO A/B: 2Rx 1Tx.
- Presenta 2 puertos RJ11 y 4 puertos RJ45.
- Throughput máximo de 15Mbps para el enlace de bajada y 5Mbps para el enlace de subida.
- Soporta técnica OFDMA.

- Soporta 5 tipos de QoS: UGS, rtPS, ErtPS, nrtPS y BE.
- Soporta VoIP.
- Presenta 2 antenas omnidireccionales externas.

2.4 Prueba de campo realizada con Alvarion en Artemisa

Desde el mes de septiembre del 2005 hasta el mes de junio del 2006 se efectúo en el Municipio de Artemisa la Prueba Piloto de WiMAX de la Empresa de Telecomunicaciones de Cuba S. A. El equipamiento y material de instalación disponible para realizar esta prueba fue suministrado por Alvarion modelo BreezeMAX 3500, compuesto por: [34]

1 Sistema de Micro Estación Base.

1 Micro Estación Base modelo BreezeMAX 3500 (con sólo un sector habilitado). (ANEXO 3C).

1 Antena con un ángulo de 120 grados. (ANEXO 3D).

1 Router Cisco modelo 2600

1 Rollo de cable ODU-IDU (outdoor unit – indoor unit)

1 Cable de Antena al Transmisor

1 Protector contra descargas eléctricas del bajante

1 Sistema de Gestión AlvariSTAR

20 Equipos de Abonados

20 equipos CPE ODU (customer premise equipment outdoor unit). (ANEXO 3E).

20 equipos CPE IDU (customer premise equipment indoor unit) (ANEXO 3F).

20 cables de alimentación a CA.

20 Gateway Alvarion con un puerto de Datos y 2 de Voz. (ANEXO 3G).

20 Cables de alimentación a CA.

20 Cables de conexión ODU-IDU (outdoor unit – indoor unit)

2.4.1 Especificaciones de Radio

La Micro Estación Base está fabricada desde el punto de vista de hardware con dos sectores, pero desde el punto de vista de software solamente ha estado disponible en marzo del 2006.

Para poder utilizar el mismo es necesario contratar el hardware y software para su habilitación. Una estación base puede trabajarse con antenas de diferentes ángulos por ejemplo 60, 120 y 360 grados.

Como la potencia del transmisor es fija (28 dBm) con la antena de 60 grados se logrará una distancia máxima mayor que con la de 120 ó 360 grados. Hay ocasiones en que se requieren ángulos mayores para cubrir grandes áreas alrededor de la radio base, pero también se requieren largas distancias, por ello se emplean otros sectores que implican otros transmisores y otras antenas acoplados a una misma radio base.

Por ello, para poder ampliar el ángulo de crecimiento del WiMAX de Artemisa se requiere habilitar el segundo sector y utilizar el mismo, orientado hacia el área que se desee iluminar. Es necesario destacar que el hecho de aumentar otro sector no implica aumentar también la capacidad de procesamiento del sistema, por lo que su ancho de banda se mantiene inalterable. La Micro Estación Base posee como máximo dos sectores. La Macro BS puede utilizar hasta 6 sectores.

2.4.2 Pruebas realizadas

Se realizaron las siguientes pruebas:

1. Pruebas de radio enlace y propagación.

2. Pruebas de Datos.

3. Pruebas de Voz.

4. Otras Pruebas.

Pruebas de radio enlace y propagación

Una vez realizada la instalación de la BS se procedió al montaje uno a uno de todos los CPE. En cada caso se buscó la altura y la posición en que más intensidad adquiría el enlace, utilizando el instrumento de nivel incorporado a cada equipo.

Teniendo en cuenta todos los eventos efectuados, las mediciones y los perfiles que se realizaron a diferentes estaciones se llegó a las siguientes conclusiones:

a) El uso de la OFDM le imprime a WiMAX un tipo de propagación especial con la cual se pueden lograr enlaces con perfiles libres, obstruidos y semi obstruidos.

b) La eficiencia espectral de WiMAX es muy alta pues con antenas de mediana ganancia y baja directividad se logran enlaces a distancias considerables.

c) Se establecen enlaces sin línea de vista entre las dos antenas (NLOS) hasta distancias de aproximadamente 8 km entre la BS y el CPE en zonas rurales.

d) Se logró un enlace (LOS) eficiente entre localidades a 32 km de distancia con una altura de antena del usuario de 12 m a nivel del piso.

e) La comunicación full duplex entre la BST y el CPE permiten adaptar parámetros internos, como es el control automático de la potencia de transmisión del CPE, una vez se logre un enlace con la calidad requerida, contribuyendo así además a un consumo inferior del CPE.

f) Los estudios de propagación del WiMAX no se pueden realizar con los métodos tradicionales utilizados en los enlaces de microondas.

g) Tanto los equipamientos de BST ODU como los CPE ODU son de muy fácil montaje y puesta en marcha.

h) Durante la prueba y dentro del área de cubrimiento existen lugares donde no se pudieron establecer enlaces por obstrucciones muy grandes o depresiones pronunciadas del terreno. Estos son los casos de El Establo y Cuatro Caminos.

Cuando se instalen mástiles o torres de alturas superiores a 12 m se podrán establecer dichos enlaces.

i) Se ensayaron varias estaciones con el objetivo de probar enlaces en objetivos fuera del ángulo de 120 grados de la antena y se establecieron los siguientes:

Sede Universitaria a 500m de la BS por detrás de la antena (Excelente).

ESBEC José Martí a 4.5 km de la BS y unos 10 grados fuera del extremo de cobertura (Satisfactorio).

Los enlaces en la EIDE de Artemisa a 4.5 km y Dagame a 7 km de la BS no se establecieron por estar muy detrás de la antena a distancias no permisibles.

j) Se ensayó un enlace en la Playa de Majana con resultados satisfactorios.

k) Se pudo comprobar que la modulación adaptativa funciona perfectamente y que se mueve de una a otra dependiendo de la relación señal a ruido en un momento determinado en un CPE.

l) Se obtuvieron modulaciones QAM64 ¾ a distancias de alrededor de 20 km con enlaces LOS.

m) Se obtuvieron modulaciones QAM64 ¾ a distancias hasta 8 Km con enlace NLOS.

Pruebas de Datos

Una vez establecidos una cantidad de enlaces entre BS y CPE, se solicitó un flujo con el proveedor de servicio Rimed, debido a que solamente en estos momentos Educación tiene las condiciones para explotar los datos ya que desde una escuelita Primaria hasta un Centro Universitario poseen computadoras. No se pudo localizar ningún otro organismo que pudiera explotar dicho servicio.

a) Debido a que solamente existe en el territorio un solo ISP se decidió no configurar el sistema con VLANs. Si en el futuro se requiere de otro ISP u otro servicio que sí necesite de las mismas se puede hacer los perfiles de trabajo correspondientes y configurar dichas VLANs.

b) En un inicio se contrató un servicio con una velocidad de 64 Kbit/seg que fue suficiente mientras que los servicios instalados no llegaban a 8 pero a partir de esa cantidad se vio la necesidad de aumentar dicha velocidad. En este momento que los servicios instalados se acercan a 20, se ha establecido un incremento de velocidad hasta 256 Kbit/seg.

c) El ancho de banda disponible en cada CPE es de aproximadamente 12 Mbit/seg sobre todo en los enlaces con modulaciones del tipo QAM64 ¾ , el cual permite un servicio de excelencia aún compartiendo dicho ancho de banda con telefonía.

Pruebas de voz

Teniendo en cuenta que la URA de Artemisa tenía una cantidad limitada de abonados telefónicos, se decidió tomar una centena de números de Artemisa desde la Central de Bauta, sin afectar así la cantidad de números disponibles en la URA.

a) Se utilizó un Router Cisco 2600 como Gatekeeper para la telefonía. Esto hace que el sistema genere una telefonía IP. Se acopló a la PSNT de Bauta sin necesidad de utilizar los servicios de la URA de Artemisa.

b) En la prueba que se realiza se han instalado cerca de 40 teléfonos y se espera que en futuras ampliaciones se puedan instalar alrededor de 300 abonados con un tráfico no mayor de 0.18 Erlang. La Micro Estación Base utilizada puede dar servicio a 50 llamadas simultáneas.

c) Después del momento inicial, que se detectaron deficiencias en la calidad de la voz, se hicieron las correcciones necesarias y se ensayaron cientos de llamadas sin que se repitiesen ninguno de los problemas iniciales.

d) Para el acoplamiento del sistema de Voz IP con la Central de Bauta se necesitaron muchas horas de trabajo con los especialistas del Centro de Control del Territorio, resultando satisfactorio el acoplamiento entre dichas técnicas.

e) Desde un teléfono perteneciente al sistema WiMAX en prueba se pueden realizar todas las funciones y conexiones que le correspondan a la misma categoría de un abonado de la telefonía tradicional.

f) Los Gateway utilizados permiten los servicios suplementarios básicos: identificador de llamada, llamada en espera, conferencia tripartita, etc.

g) Existe un sistema de facturación que ha sido evaluado por los especialistas de esta rama y se ha aceptado como suficiente para realizar dicha función.

h) Para instrumentar el sistema de facturación se llevaron a señalización SIP cada uno de los gateway y se creó un servidor SIP dentro del propio servidor de gestión. Por lo que se eliminó la funcionalidad de Gatekeeper en el router Cisco.

Otras pruebas

a) Los equipos de abonados en estos momentos no tienen respaldo energético en caso de fallas eléctricas. Para paliar esta situación hemos propuesto el empleo de un UPS por CPE, teniendo en cuenta el bajo costo de los mismos.

Para ello se hizo una prueba con un UPS de 500 VA, semejante a los que se utilizan en las computadoras, que le suministró energía a una estación con un CPE y un Gateway de Voz para dos teléfonos. Una vez retirada la energía de la red eléctrica el sistema estuvo trabajando durante 4 ½ horas antes de agotarse la energía de respaldo del UPS.

b) Se emplearon 3 CPE con un Gateway de 2 teléfonos y un servicio de datos cada uno con otros usuarios de la zona.

Entre otros los resultados del funcionamiento del sistema que suministraron dichos usuarios están los siguientes:

1. El sistema trabajó de forma estable en todo momento.

2. En el horario nocturno el sistema trabaja con niveles mayores de señal.

3. Se pudo comprobar que los Gateway especificados para trabajar a 500 m del teléfono, trabajaron muy bien a 1500 m con cables de diferentes calibres.

4. Lograron enlaces fuera de los 120 grados de cobertura de la antena de la BST.

5. Se comprobó en algunas zonas los enlaces de NLOS.

6. Tuvieron acceso además a la Red de Datos Nacional.

7. El sistema es de fácil instalación y despliegue.

8. Los mástiles que soporten los CPE ODU no deben tener movimiento.

9. En los primeros días se sintió un eco que después desapareció definitivamente.

c) Se hizo una prueba de telefonía FXS-FXO con, Routers Huawey, con un teléfono perteneciente a la URA de Artemisa en la escuela primaria Máximo Gómez de La Granada, el cual estuvo trabajando durante más de dos meses sin dificultades.

2.4.3 Resultados preliminares y otras aplicaciones

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos durante la prueba de campo se puede destacar que el sistema WiMAX, y en especial la versión Micro Estación Base (μBST), puede prestar servicio tanto de voz como de datos de calidad, en zonas urbanas, suburbanas y rurales. En un CPE se puede lograr un ancho de banda de hasta 12 Mbit/seg, el sistema de voz puede funcionar con velocidades hasta 64 kBit/seg y los servicios de datos pueden poseer altas velocidades.

El sistema emplea QoS en caso del uso conjunto de voz y datos al mismo tiempo, reajustando así la necesidad de ancho de banda de los usuarios sin afectar el servicio, siendo empleado en

la Prueba el DRAP. La antena de la BS deberá ser colocada en una torre en un punto alto para así poder lograr un área mayor de cobertura y por ende enlaces LOS a mayor distancia, las alturas de los CPE oscilaron entre 2.5 y 12 metros dependiendo de la distancia entre la Radio Base y el equipo de usuario y existen lugares (hasta 8 Km) en que se puede identificar muy claramente el modo de propagación NLOS y las alturas de las antenas de los CPE nunca han pasado de los 4 metros.

Toda el área que se encuentra dentro de los 120 grados de radiación de la antena y a una distancia de aproximadamente 30 Km de distancia de la estación base se encuentra iluminada con señales que pueden proporcionar un servicio de Voz y Datos de alta calidad. Es posible que existan lugares específicos dentro del área supuestamente iluminada, que debido a sus características topográficas, no reciban las señales de WiMAX, sin embargo esos lugares podían ser objeto de estudios que proporcionen soluciones favorables al enlace.

Las soluciones técnicas deberán ser evaluadas de forma particular desde el punto de vista económico para ser validadas. Se ha probado que dependiendo de la relación señal ruido, el sistema utiliza la modulación adaptativa con eficiencia desde BPSK hasta QAM y tanto los servicios de datos como los de voz son de excelente calidad, los cuales se pueden comprobar visitando las instalaciones o llamando a los teléfonos del sistema.

WiMAX es una tecnología que combina en un sistema varias técnicas de las telecomunicaciones entre las que se encuentran: transmisión, recepción y propagación en frecuencias de microondas, transmisión de datos, conmutación y transmisión telefónica. Sin la armoniosa conjunción de todas estas técnicas el WiMAX puede perder parte de sus grandes potencialidades. Esto implica que WiMAX es una tecnología compleja y que requiere del trabajo en equipo de un personal capacitado que se encargue de planear, montar y explotar esta tecnología. De lo anterior se infiere que es necesario capacitar debidamente a los técnicos que laborarán con ella debido a lo complejo y novedoso del sistema.

Además de ser una excelente técnica para dar servicios de Conectividad Social, el WiMAX puede ser utilizado exitosamente en otras funciones. Debido a lo fácil que resulta el emplazamiento de un CPE y que además los mismos poseen un bajo consumo energético, pudiera ser utilizado el WiMAX, para restablecer muy rápidamente las Comunicaciones después de desastres naturales con una base relativamente alejada de la zona central del desastre.

Conjuntamente con la llegada de los primeros auxilios podrían llegar los módulos CPE de WiMAX habilitados al efecto y ser desplegados al instante, restableciéndose así las comunicaciones de emergencia y auxilio, posteriormente asumirían las necesidades básicas de la zona hasta que se normalicen las mismas por los canales tradicionales. También se puede hacer un rápido y fácil despliegue provisional para cubrir las necesidades de telefonía básica y datos en eventos fuera del área de los servicios tradicionales.

2.5 Conclusiones parciales

Después de un análisis detallado de cada una de las técnicas existentes en la provincia de Mayabeque, se puede observar la carencia de equipamiento óptimo para la transmisión de datos. Tanto los monocanales como los bicanales solo admiten la transmisión de voz por uno o dos canales respectivamente. Los usuarios que acceden a la Red Telefónica Pública (PSTN) mediante el sistema Trasa, solo tienen acceso al servicio de voz y no a la comunicación de datos.

Ambos proveedores Alvarion y Huawei presentan equipamiento WiMAX que cumplen con los requerimientos técnicos demandados, quedando el análisis de factibilidad económica como elemento decisor en la propuesta de uno u otro proveedor. El sistema WiMAX que ha sido probado muestra un excelente desempeño para llevar los servicios de telecomunicaciones a asentamientos y pequeñas poblaciones distantes; transportar señales de banda ancha de forma inalámbrica, resultando un método económico y rápido de llevar la conectividad social hasta pequeñas poblaciones, escuelas, consultorios del médico de la familia, dependencias del petróleo, el turismo, objetivos económicos y militares y garantizar cobertura de comunicación a eventos deportivos, políticos y de emergencia con un alto grado de seguridad en la red.

Capítulo 3 Diseño de la red de acceso WiMAX

En este capítulo se abordará el diseño de la propuesta para la solución y expansión de los servicios de telecomunicaciones utilizando la tecnología WiMAX en la provincia de Mayabeque, la cual incluye un análisis de costos de la propuesta.

Luego del estudio de las principales características de los sistemas WiMAX Móvil, se determinó realizar una propuesta para la migración en el territorio que comprende la provincia de Mayabeque. Dicha propuesta intenta dar cobertura a los lugares donde por años ha sido deficiente o insatisfecho el servicio de transmisión de voz, datos y video.

El despliegue de una red WiMAX es una excelente oportunidad de negocio para ETECSA ya que trae aparejado los beneficios inherentes a esta tecnología. Además, representaría un aumento de la capacidad de la red, aumento de la velocidad de transmisión de datos y la introducción de nuevos servicios.

3.1 Diseño de una Red WiMAX

El planeamiento de la cobertura y la capacidad de una red de radio WiMAX se procesa reiteradamente varias veces y se realiza usando una herramienta de planeamiento de la red de radio. Estas herramientas utilizan mapas digitales y modelos de propagación que son verificados mediante mediciones para ajustar el modelo. Algunos suministradores y operadores tienen sus propias herramientas de planeamiento de cobertura, aunque también estas pueden ser suministradas por proveedores de herramientas especializadas. La herramienta puede ayudar al planeador a optimizar las configuraciones de las estaciones bases, la selección del tipo de antena y la orientación de las mismas e incluso la ubicación de los sitios, para lograr la calidad de servicio y la capacidad sobre la base de los requerimientos al mínimo costo. Para alcanzar un resultado óptimo la herramienta debe contener los algoritmos para la gestión de los recursos de radio. Un ejemplo de herramienta de este tipo es el Radio Mobile.

3.2 Generalidades del Software Radio Mobile

RadioMobile es un software de libre distribución para el cálculo de radio enlaces de larga distancia en terreno irregular. Para ello utiliza perfiles geográficos combinados con la

información de los equipos (potencia, sensibilidad del receptor, características de las antenas, pérdidas, etc.) que quieren simularse [33].

Este software implementa con buenas prestaciones el modelo Longley-Rice, modelo de predicción troposférica para transmisión radio sobre terreno irregular en enlaces de largo-medio alcance. Además de tener múltiples utilidades de apoyo al diseño y simulación de los enlaces y las redes de telecomunicaciones. Los parámetros a introducir para realizar las simulaciones permiten reflejar de forma fiel los equipos reales que se piensa utilizar en la instalación para la que estarían destinados.

RadioMobile utiliza para la evaluación de los enlaces, el perfil geográfico de las zonas de trabajo. La obtención de estos mapas puede realizarse directamente desde una opción del software que permite descargarlos de Internet. Hay tres tipos de mapas disponibles: los SRTM, los GTOPO30 y los DTED.

El modelo Longley-Rice predice la propagación a larga-media distancia sobre terreno irregular. Fue diseñado para frecuencias entre los 20MHz y 40GHz, para longitudes de trayecto de entre 1 y 2000 Km. Para el cálculo de la propagación, el modelo Longley-Rice tiene los siguientes parámetros comunes al de otros modelos de propagación:

Frecuencia: el rango de frecuencias nominales para el modelo varía entre 20MHz y 40GHz.

ERP (Effective Radiated Power): potencia efectiva de radiación, se introducen en las unidades que fije el usuario en la opción de configuración del sistema (mW, W, kW, dBm, dBW, dBk).

Antena: se asume antena omni-direccional, a menos que se especifique el uso de una antena directiva.

Altura de la antena: altura a la que se sitúa la antena, medido en pies o metros, (sobre el nivel del mar), para transmitir y recibir. El programa computará las alturas efectivas necesarias para ajustarse a los cálculos del modelo.

La naturaleza del modelo requiere algunos parámetros adicionales.

Polarización: debe especificarse si se trabaja con polarización horizontal o vertical. El modelo de Longley-Rice asume que ambas antenas tienen la misma polarización, vertical y horizontal.

Refractividad: la refractividad de la atmósfera determina la cantidad de "bending" o curvatura que sufrirán las ondas radio. En otros modelos, el parámetro de refractividad puede introducirse como la curvatura efectiva de la tierra, típicamente 4/3 (1.333). Para el modelo Longley-Rice, hay tres formas de especificar la refractividad. Se puede introducir el valor de refractividad de superficie directamente, típicamente en el rango de 250 a 400 Unidades de n (correspondiente a valores de curvatura de la tierra de 1.232 a 1.767). Una curvatura efectiva de la tierra de 4/3 (=1.333) corresponde a una refractividad de superficie de valor aproximadamente 301 Unidades de n. Longley y Rice recomiendan este último valor para condiciones atmosféricas promedio. La relación entre los parámetros "k" y "n", viene dada por la siguiente expresión:

$$N_s = 179.3 \cdot Ln\left[\frac{1}{0.046665}\left(1 - \frac{1}{K}\right)\right]$$ Ecuación 3.1

Permitividad: la permitividad relativa o constante dieléctrica del medio (ε), tiene unos valores típicos tabulados.

Conductividad: la conductividad, medida en Siemens por metro, tiene unos valores típicos tabulados.

En la tabla 3.1 se muestra un resumen de los valores de permitividad y conductividad de la tierra y el agua en sus distintas variantes.

Tabla 3.1 Valores de permitividad y conductividad de la tierra y el agua.

	PERMITIVIDAD	**CONDUCTIVIDAD**
Tierra media	15	0.005
Tierra pobre	4	0.001
Tierra rica	25	0.020
Agua fresca	81	0.010
Agua mar	81	5.000

Clima: Hay 7 modelos de clima caracterizados en el modelo: Ecuatorial (Congo); Continental Subtropical (Sudan); Subtropical Marítimo (Costa del oeste de África); Desierto (Sahara); Temperatura Continental; Temperatura Marítima, pista excesiva (Reino Unido y costas del oeste continentales); Temperatura Marítima, mar excesivo.

De acuerdo con el modelo, el clima continental templado es común a la mayor parte de grandes superficies en la zona templada. Se caracteriza por extremos en la temperatura y cambios

diurnos y de estaciones pronunciadas en la propagación. En latitudes medias en zonas costeras, donde los vientos predominantes llevan el aire húmedo marítimo hacia el interior, prevalece un clima marítimo templado. Esta situación es típica del Reino Unido y de las costas occidentales de los Estados Unidos y Europa. El resto de los climas pueden asociarse de la misma forma a otras regiones del mundo.

Variabilidad: el modelo de Longley-Rice define cuatro modos de variabilidad. El modo seleccionado determina el significado de la fiabilidad de los valores usados en el modelo. El modo de variabilidad puede ser considerado como la especificación para determinar la fiabilidad de los cálculos. Los modelos de variabilidad definidos son: Single message mode, Individual mode, Mobile mode, and Broadcast mode.

Para calcular el campo en posiciones individuales en el modo individual, se trazaban múltiples puntos a lo largo de varias radiales desde la ubicación del transmisor. Como se está definiendo exactamente la localización del receptor para cada cálculo, el programa no tiene en cuenta la variabilidad por “localizaciones” o posición.

Los tipos de variabilidad descritos en el modelo Longley-Rice son el tiempo, la posición, y la variabilidad de situación. Estas tres dimensiones de variabilidad, fueron desarrolladas para considerar y clasificar variaciones en los niveles de señal medidos (mediana) La variabilidad de corto plazo del tipo asociado con la propagación de multitrayecto no es cubierta por el modelo.

Variabilidad de tiempo: los parámetros a tener en cuenta para considerar las variaciones de los valores medianos tomados por horas de atenuación, son por ejemplo, cambios de la refracción atmosférica o de la intensidad de turbulencia atmosférica. El campo actual en la posición de receptor se espera que esté por encima de ese valor, durante media de cada hora, y por debajo de ese valor la otra media. La variabilidad de tiempo describe los efectos de estos cambios de tiempo, expresado como un porcentaje entre 0.1 % y el 99.9 %. Este valor da la fracción de tiempo durante la cuál el campo de fuerzas recibido, se espera que sea igual o superior que el valor mediano de campo por hora calculado por el programa. Esta variabilidad permite especificar cómo se desea tratar con la variabilidad de tiempo de los cambios atmosféricos y otros efectos. Tomar un porcentaje mayor en este valor, reduce la variabilidad resultante de estos factores. El resultado calculado por el programa será menor, con lo que se asegura que el valor real medido será igual o superior en un porcentaje más elevado de tiempo.

Variabilidad por localización: Lo que hay que tener en cuenta en los estadísticos de largo plazo entre dos trayectos distintos debido, a por ejemplo, diferencias en los perfiles del terreno o diferencias ambientales entre ellos. La variabilidad por localización para los cálculos, se expresa como un porcentaje de 0.1% a 99.9%. Sucede lo mismo en los resultados que para el caso de la variabilidad de tiempo, pero con la fracción de localizaciones donde el campo recibido se espera que sea igual o superior.

Variabilidad por situación: esta variabilidad tiene en cuenta otro tipo de variables que pueden denominarse “hidden variables”. Este tipo de variables representan efectos que no pueden explicarse o que simplemente se ha decidido no controlar. Sirven para diferenciar casos con iguales equipos y condiciones de entorno similares. Estos cambios se reflejarán en los estadísticos. Y como en casos anteriores puede ser expresado como un porcentaje entre 0.1 % y el 99.9 % para controlar lo mucho o poco que se quiere que afecten.

3.3 Modelación del diseño de Red WiMAX propuesto

Con el objetivo de estudiar las particularidades del enlace para cada caso y simplificar las labores asociadas a la ubicación de las radio bases, se ha decidido no emplear el análisis de cobertura con que cuenta Radio Mobile, sino el estudio individual de salto entre cada radio base y las estaciones terminales.

Inicialmente se realiza un análisis de perfil del terreno entre los puntos extremos de un enlace por radio con el objetivo de evaluar si entre ellos existe línea de visibilidad directa para minimizar las pérdidas.

Para la realización del diseño se consideraron algunos aspectos importantes que impactan directamente en el plan de negocios de este proyecto.

Como criterio para la selección de las áreas se tuvo en cuenta:

- La distribución de densidad de población.
- La distribución actual del tráfico para servicio de voz.
- Las estadísticas existentes de distribución de tráfico de datos por concepto de uso de los servicios existentes.
- Zonas turísticas de la provincia.
- Zonas de interés económico y social.

3.3.1 Selección de la ubicación de los sitios

Para la ubicación de los nuevos sitios, y con el objetivo de reducir los costos de inversión y operación, se debe tener en cuenta la ubicación en las infraestructuras de telecomunicaciones existentes. Para esto se debe realizar un análisis preventivo que consiste en desechar los sitios que no son adecuados para ser usados en la nueva red WiMAX. La ubicación se realiza mediante las coordenadas geográficas.

Utilizando el software Radio Mobile, solo es preciso cargar los datos topográficos de la zona y ubicar las unidades de radio en el terreno para conocer el perfil del enlace. Los datos suministrados son las coordenadas de los asentamientos que se desean cubrir con la red, así como los sitios de telecomunicaciones existentes en el área (ver Figura 3.1).

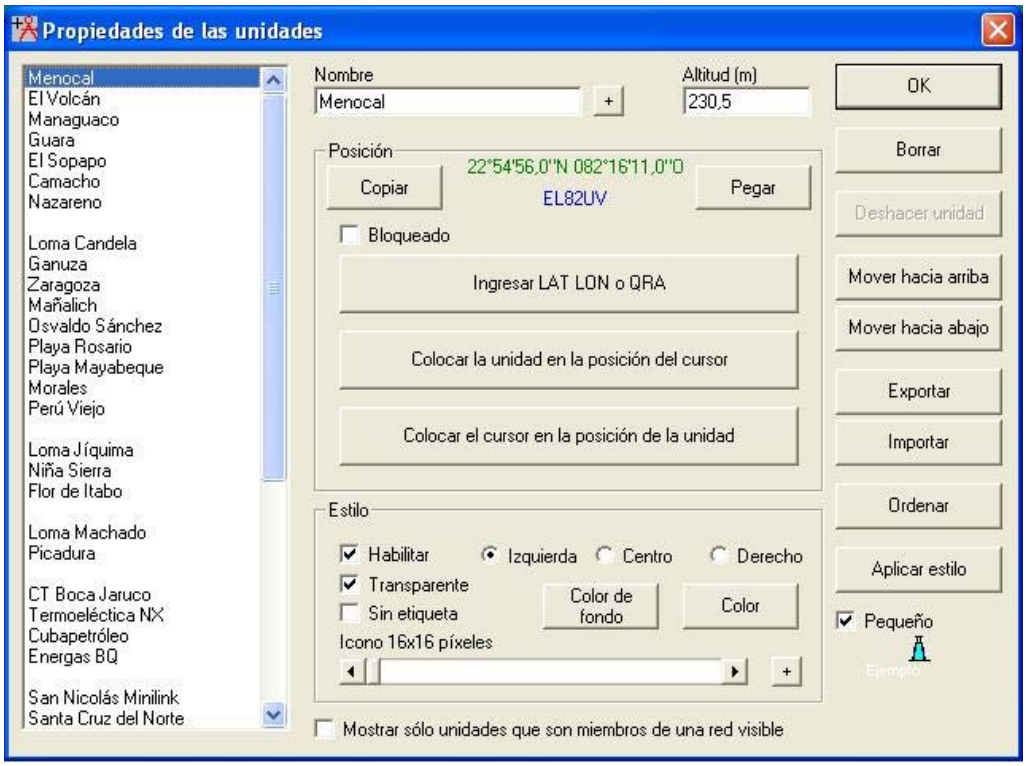


Figura 3.1. Ubicación de los sitios en Radio Mobile.

Para la ubicación de las estaciones bases se tuvo en cuenta las infraestructuras de telecomunicaciones existentes (Locales, Torres, energía, etc), la altura de los emplazamientos y las zonas potenciales a ofrecer cobertura.

De este modo se propone la ubicación de cinco estaciones base de sistemas WiMAX. y 20 estaciones terminales como se muestra en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2 Relación de sitios en estudio con sus coordenadas y altura.

Sitio	Estación Base	Terminal	Coordenadas		Altura (m)
			Latitud	Longitud	
Menocal	X		22º54´56.01"	82º16´11.05"	239
El Volcán		X	22º56´10.35"	82º17´46.11"	173
Managuaco		X	22º55´13.70"	82º10´24.78"	189
Guara		X	22º48´37.34"	82º12´07.55"	48,7
El Sopapo		X	22º46´51.68"	82º15´53.08"	33,5
Camacho		X	22º43´30.56"	82º21´50.05"	12,8
Nazareno		X	22º56´20.65"	82º13´40.14"	195,2
Loma de Candela	X		22°52´30.05"	82°03´43.10"	142
Ganuza		X	22º55´30.88"	82º06´41.79"	117
Zaragoza		X	22º55´57.89"	82º02´11.91"	112
Mañalich		X	22º48´40.65"	82º08´50.53"	44,9
Osvaldo Sánchez		X	22º46´58.15"	82º01´51.86"	29,8
Playa Rosario		X	22º40´01.11"	82º02´32.89"	2,3
Playa Mayabeque		X	22º40´27.70"	82º08´50.03"	5,5
Morales		X	22º56´26.71"	82º04´45.75"	105
Perú viejo		X	23º00´42.45"	82º03´36.16"	176
Loma Jíquima	X		22º55´20.99"	81º51´16.95"	219
Niña Sierra		X	22º56´50.52"	81º46´50.07"	160
Flor de Itabo		X	22º57´03.81"	81º50´21.85"	128
Loma Machado	X		23º08´04.18"	81º50´29.79"	103,9
Picadura		X	23º02´34.46"	81º48´38.11"	267
CT Boca Jaruco	X		23º10´33.40"	82º00´34.30"	4,6
Termoeléctrica NX		X	23º09´34.70"	81º57´14.74"	15
Cubapetróleo		X	23º10´17.62"	82º03´30.67"	40,1
Energas BQ		X	23º11´03.76"	82º01´34.65"	7,7

La estación de Menocal daría cobertura al centro sur de Mayabeque. Situada también en una predominante altura (239 m), garantiza cobertura a los municipios de San José y Bejucal por el sector Norte y Quivicán, Batabanó, Melena de Sur y Güines por el sector Sur. Esta última área es la de mayor importancia en el territorio, ya que concentra un extenso territorio suburbano y rural que por mucho tiempo ha sido una gran demanda insatisfecha. En el sur de Mayabeque radica la mayoría de los centros priorizados, en los que se incluyen IPI, IPA, MiniUCI, Escuela Militar Camilo Cienfuegos, entre otras; las cuales en su inmensa mayoría solamente cuentan con un servicio de telefonía básica. Los programas educacionales como parte de las Tareas de la Revolución requieren el acceso de datos y es la solución inalámbrica de banda ancha la alternativa económica por excelencia a los mismos. También el centro sur es el área de mayor densidad de sistemas monocanales y bicanales. (Anexos 3A y 3B) y en el Consejo Popular San

Antonio de las Vegas se encuentran distribuidos los servicios de telefonía rural de una de las estaciones del sistema Trasa. (Anexo 3C). Este sitio base está enlazado por fibra óptica.

La estación base de Loma de Candela potenciaría la cobertura en el centro sur de nuestro territorio. Posee todas las condiciones necesarias como son la infraestructura civil, la energética y se puede usar la torre que la telefonía móvil tiene en ese sitio para el enclave de las antenas. Este es un territorio donde conviven además de la telefonía móvil la radiodifusión. Este sitio está enlazado por radio contra Güines.

La estación base de Loma Jíquima reforzaría la zona central del territorio, fundamentalmente dando cobertura a la zona cercana al municipio Madruga. La misma cuenta con toda la infraestructura necesaria, tiene respaldo energético y puede ser utilizada la torre existente. Este sitio base está enlazado por radio contra San Nicolás de Bari.

Loma de Machado ampliaría las posibilidades de los municipios Jaruco y Santa Cruz, esto potenciaría la vía de acceso norte a Matanzas y Varadero. Reforzaría la cobertura a las instalaciones de la empresa de campismo, a las dependencias del petróleo y a las instalaciones de turismo que demandan también altos volúmenes de tráfico de datos. El sitio cuenta con la infraestructura necesaria, tiene respaldo energético y puede ser utilizada la torre existente y está enlazado por radio contra Santa Cruz del Norte.

La estación base de Boca de Jaruco reforzaría la zona oeste de Santa Cruz del Norte, hasta los límites de Guanabo, esto potenciaría la vía de acceso norte a Matanzas y Varadero. Reforzaría la cobertura a las dependencias del petróleo y a las instalaciones de turismo que demandan también altos volúmenes de tráfico de datos. El sitio cuenta con la infraestructura necesaria, tiene respaldo energético y puede ser utilizada la torre existente y está enlazado por radio contra Santa Cruz del Norte.

Para llevar a cabo este trabajo los costos de instalación serían bajos pues en los seis escenarios propuestos se cuenta con la infraestructura civil, energética y de soporte de radiación (torres con espacios libres). La coubicación con estaciones de telefonía móvil representa también un ahorro considerable por concepto de mantenimiento preventivo y correctivo.

Los CPE son los equipos que se ubican en el destino final del cliente, proporcionan conectividad vía radio con la estación base. WiMAX ofrece variados CPEs según la necesidad del servicio a

ofrecer y estos podrán ser terminales fijos, portátiles o móviles. Los terminales fijos podrán ser internos autoinstalables para computadoras de escritorio, así como también CPEs con antenas externas para servicio de Internet y telefonía. Pueden ser portables como son las tarjetas PCMCIA para notebooks y se espera la conectividad WiMAX integrada en los notebooks similar a la solución Wi-Fi; estos terminales podrán funcionar de manera fija. Existen además los terminales móviles que pueden funcionar de manera portable y fija. En nuestro trabajo pueden ser empleados los tres tipos de terminales, en dependencia del uso que se le vaya a dar al servicio en cada caso.

La figura 3.2 muestra la ubicación geográfica de los sitios seleccionados.

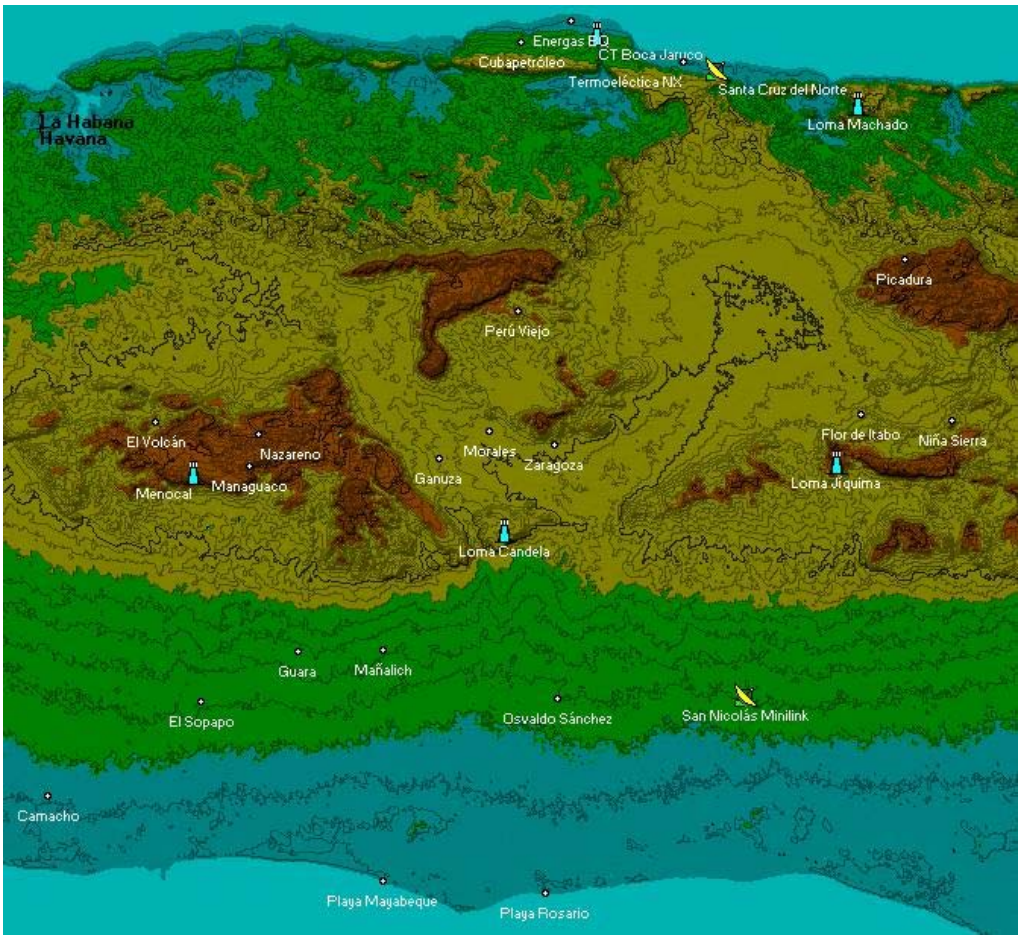


Figura 3.2 Ubicación de los sitios en Radio Mobile.

3.3.2 Parámetros de configuración en el Radio Mobile

La definición de los parámetros radioeléctricos y cálculo de balance del enlace permite estimar las pérdidas de propagación entre el transmisor y el receptor. Estos datos son requeridos por el Radio Mobile para calcular el área de cobertura de la celda (Figura 3.3).

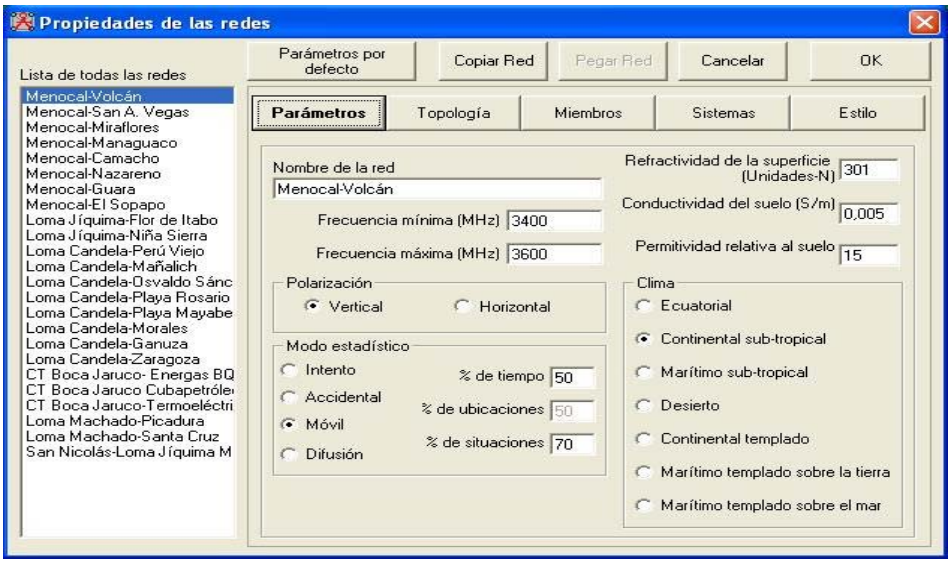


Figura 3.3 Ventana para la definición de los parámetros principales de la red.

La Figura 3.4 muestra la ventana para la definición de los miembros de la red.

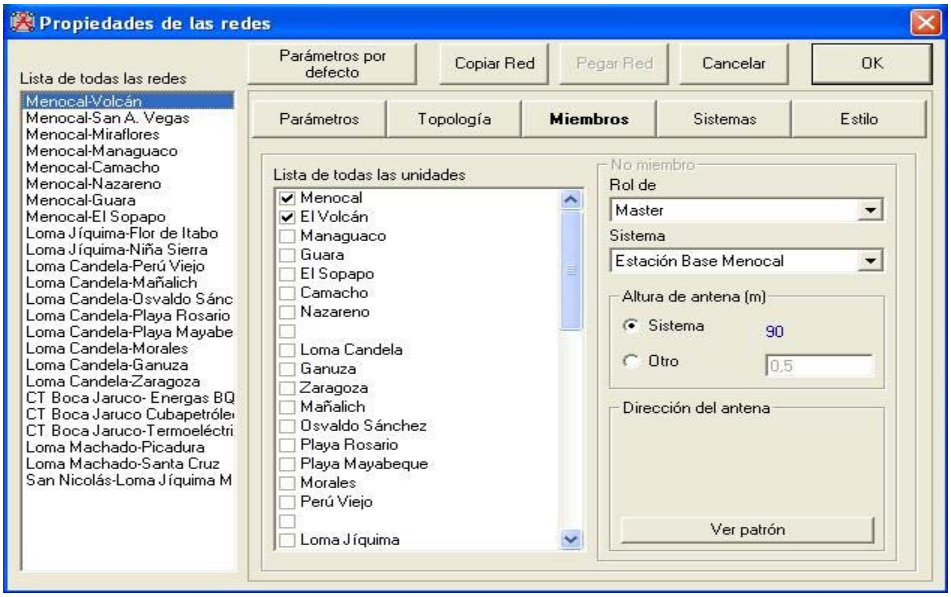


Figura 3.4 Ventana para la definición de los miembros de la red.

La Figura 3.5 muestra los parámetros de configuración de los sistemas.

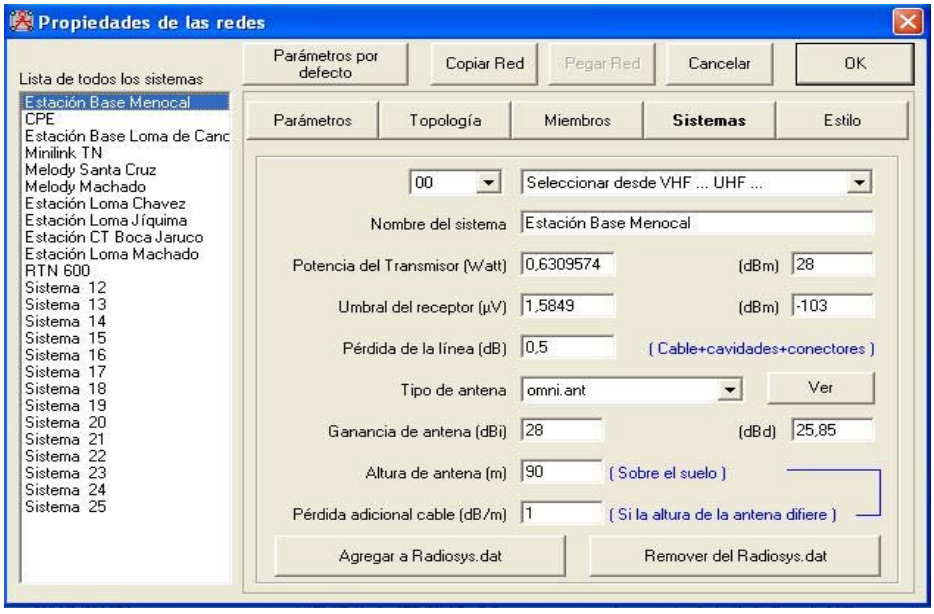


Figura 3.5 Parámetros de configuración de los sistemas.

3.4 Cálculo de los enlaces por radio entre las estaciones bases.

Para el enlace de radio entre las estaciones bases y los centros telefónicos es necesario conocer la potencia de transmisión, la longitud del enlace y la frecuencia. Con estos datos se realiza un cálculo de balance del enlace (link Budget) para obtener el margen del enlace mediante las siguientes ecuaciones:

$$\lambda = c/f$$

$$L_b = \left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right)^2$$

$$Pr = Pt + Gt - Lb + Gr$$

donde:

Pr: Potencia de recepción

Pt: Potencia de transmisión

Gt: Ganancia de la antena transmisora

Lb: -Pérdidas de propagación

Gr: Ganancia de la antena receptora

A modo de ejemplo se realizan los cálculos para el enlace San Nicolás – La Jíquima que es un enlace existente:

Datos:

f = 7128 MHz

d = 16,51 km

Gt = 32 dBi

Gr = 32 dBi

Pt = 28 dBm

$\lambda = c/f = (3 \cdot 10^8) / (7128 \cdot 10^6) = 0.042$ m

$L_b = \left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right)^2 = 2.44\ 10^{13}$

$Lb = 10 \log (2.44\ 10^{13}) = 133.87$ dBm

Pr = Pt + Gt – Lb + Gr

Pr = 28 dBm + 32 dBi – 133.87 dBm + 32 dBi = -41.87 dBm

La potencia recibida será de -46.3 dBm, superior a la sensibilidad del equipo que es de -74 dBm (ver Anexo C), obteniéndose un margen para el desvanecimiento de 32.13 dB.

La tabla 3.3 muestra los resultados del cálculo de radio para todos los enlaces:

Tabla 3.3 Resultado de los cálculos de enlace por radio.

Enlace	Longitud (Km)	Frecuencia (MHz)	Pr (dBm)	Margen (dB)	Equipamiento
San Nicolás – La Jíquima	16.51	7128	-41.87	32.13	Minilink TN
Güines – Loma Candela	6.36	7128	-33.59	40.41	Minilink TN
Santa Cruz - Boca Jaruco	8.26	7128	-35.86	38.14	Minilink TN
Santa Cruz - Machado	9.53	7135	-31.9	56.6	Melody

3.5 Resultados de la modelación.

La figura 3.6 muestra la Topología de red con los enlaces de radio.

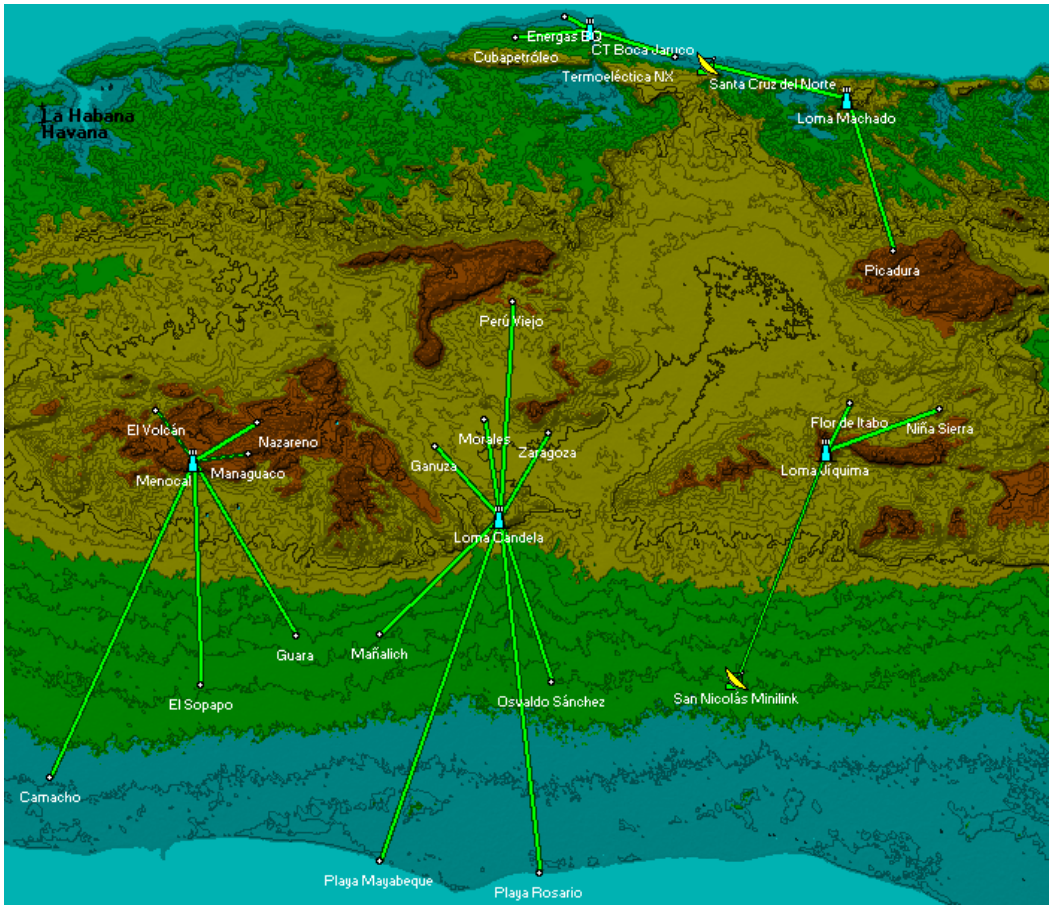


Figura 3.6 Topología de red con los enlaces de radio.

Como resultado de la simulación se realizó un análisis de perfil (Ver Fig. 3.7) obteniéndose los siguientes valores de pérdidas de propagación para cada enlace (Ver Tabla 3.4).

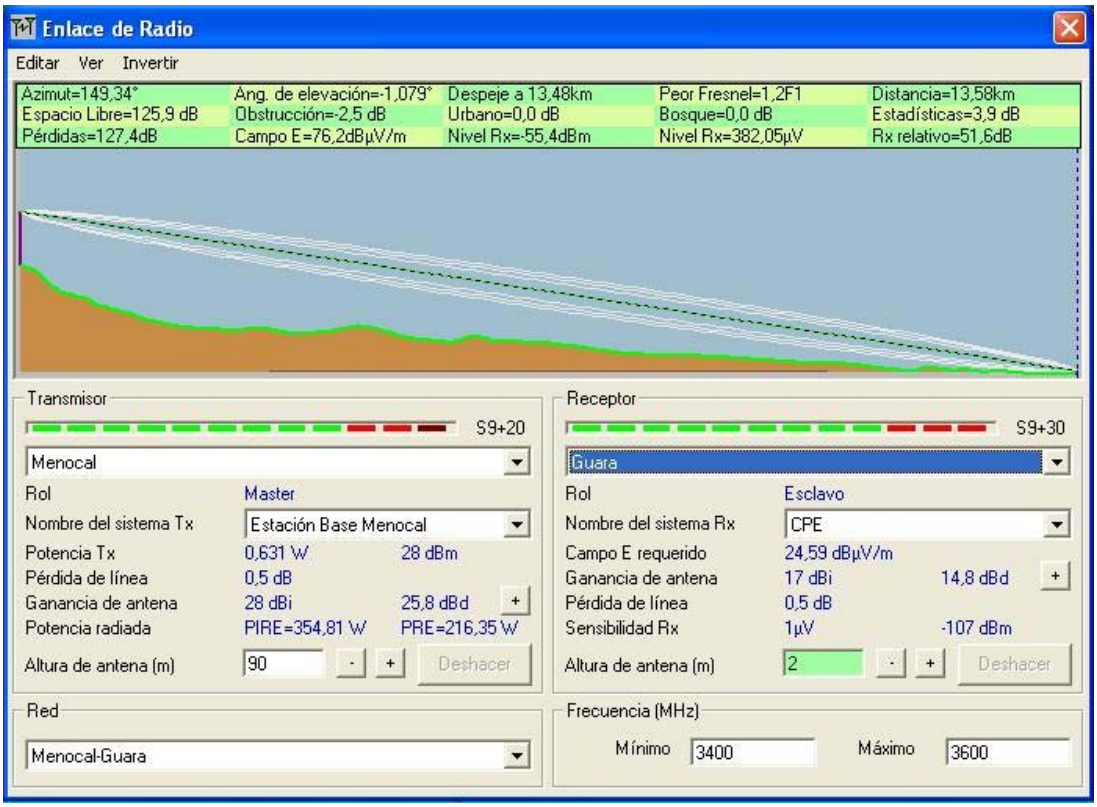


Figura 3.7 Enlaces de radio entre la Radio base y el CPE con los parámetros definidos.

Tabla 3.4 Valores de propagación para cada enlace.

Estación Base	Terminal	Distancia (km)	Azimut (º)	Ang Elev	Pérdidas (dB)	Nivel Rx (dBm)	Rx Relativo (dB)	Peor Rx (dB)
Menocal	Volcán	4,24	323,68	-2,239	164,5	-92,5	14,5	2,5
Menocal	Managuaco	3,71	81,54	-1,434	160,2	-88,2	18,8	6,8
Menocal	Guara	13,58	149,34	-1,079	131,6	-59,6	47,4	35,4
Menocal	El Sopapo	14,96	178,05	-1,020	138,5	-66,5	40,5	28,5
Menocal	Camacho	23,25	204,53	-0,731	129,7	-57,7	49,3	37,3
Loma Candela	Ganuza	6,48	318,37	-0,694	121,3	-48,3	58,7	46,7
Loma Candela	Zaragoza	6,60	30,70	-0,748	133,5	-60,5	46,5	34,5
Loma Candela	Mañalich	11,16	225,54	-0,646	127,7	-54,7	52,3	40,3
Loma Candela	Osvaldo Sánchez	11,54	162,16	-0,665	134,5	-61,5	45,5	33,5
Loma Candela	Playa Rosario	24,02	173,43	-0,388	157,6	-85,8	21,2	9,2
Loma Candela	Playa Mayabeque	24,37	199,07	-0,389	151,6	-78,6	28,4	16,4
Loma Chávez	Nazareno	5,91	233,35	-0,589	135,3	-65,6	41,4	29,4
Loma Chávez	Morales	10,97	107,72	-0,853	128,0	-56,0	51,0	39,0
Loma Chávez	Perú Viejo	13,23	69,85	-0,500	158,2	-86,2	20,8	8,8
Loma Chávez	Punto Control	1,80	359,28	-4,150	120,1	-59,1	47,9	35,9
Loma Jíquima	Niña Sierra	8,07	69,97	-0,615	123,3	-51,3	55,7	43,7
Loma Jíquima	Flor de Itabo	3,54	26,25	-1,863	117,7	-45,7	61,3	49,3
Loma Machado	Picadura	10,66	162,69	-0,498	126,9	-55,9	51,1	39,1
CT Boca Jaruco	TermoE NX	5,95	107,72	-0,059	152,7	-80,7	26,3	14,3
CT Boca Jaruco	Cuba Petróleo	5,04	264,46	0,208	151,2	-79,2	27,8	15,8
CT Boca Jaruco	Energas BQ	1,96	298,70	-0,466	111,3	-39,3	67,7	55,7

Uno de los resultados más importantes de la modelación lo constituyen los mapas de cobertura de la nueva red WiMAX. Los niveles de cobertura estarán dados por la escala de colores que se muestra en la figura 3.8.

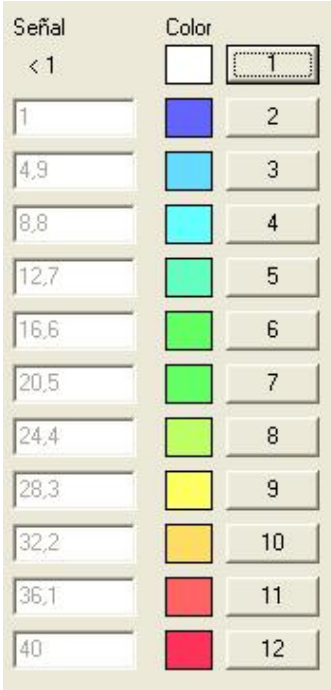


Figura 3.8. Niveles de cobertura.

La figura 3.9 muestra el mapa de cobertura de la Estación Base Menocal.

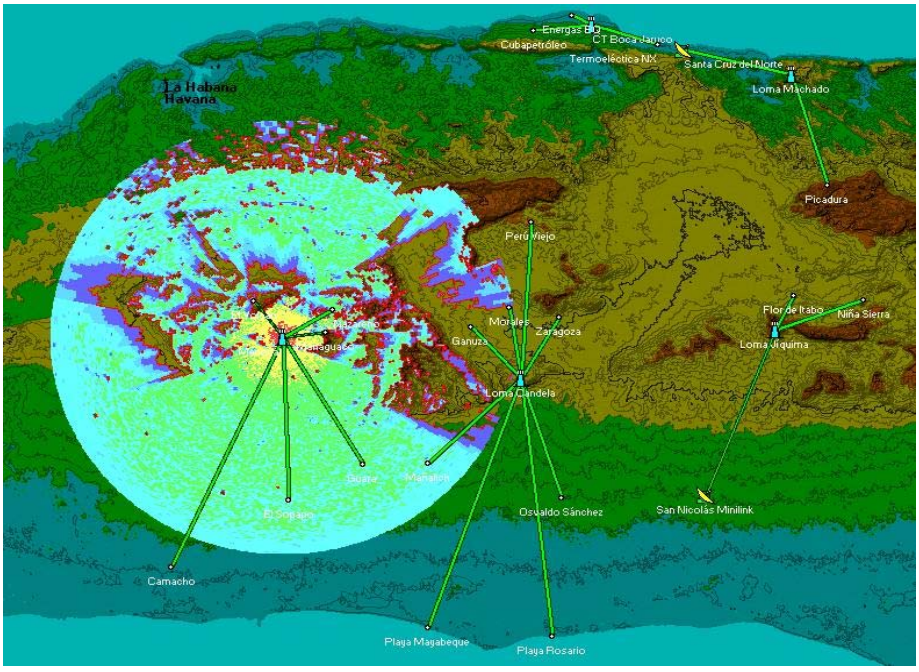


Figura 3.9 Mapa de cobertura Menocal.

La figura 3.10 muestra el mapa de cobertura de la Estación Base Loma Candela.

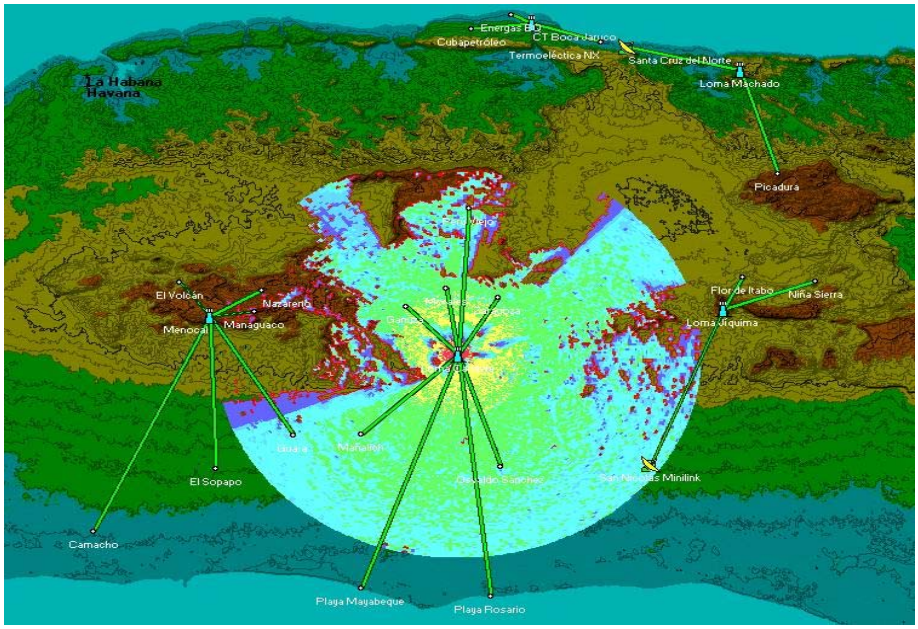


Figura 3.10 Mapa de cobertura Loma Candela.

La figura 3.11 muestra el mapa de cobertura de la Estación Base Loma Jíquima.

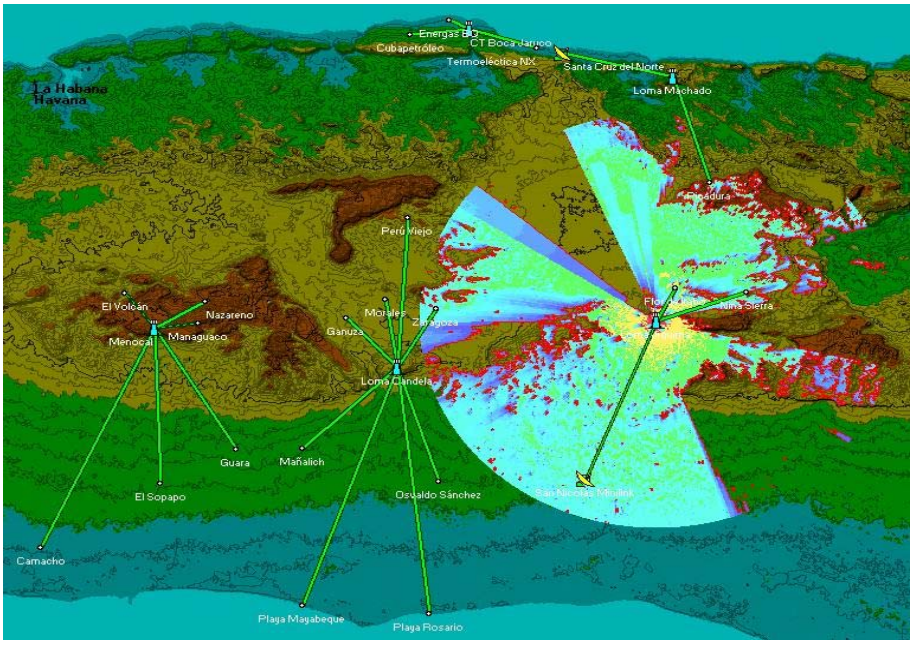


Figura 3.11 Mapa de cobertura Loma Jíquima.

La figura 3.12 muestra el mapa de cobertura de la Estación Base Loma Machado.

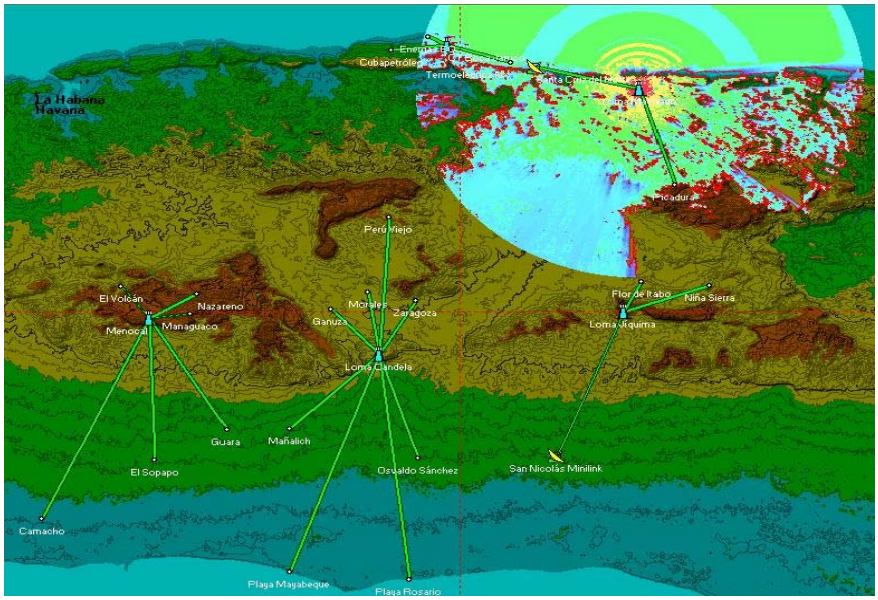


Figura 3.12 Mapa de cobertura Loma Machado.

La figura 3.13 muestra el mapa de cobertura de la Estación Base CT Boca Jaruco.

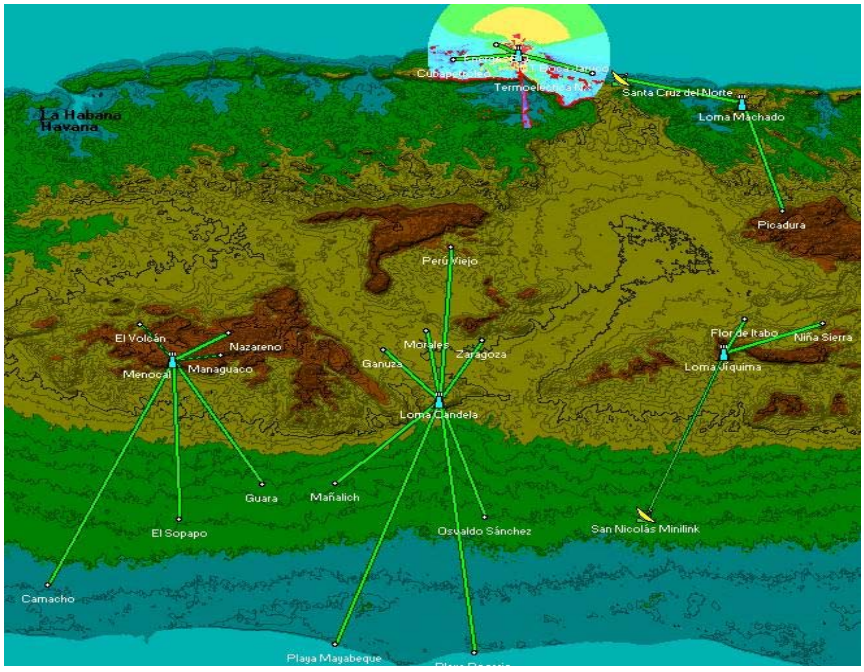


Figura 3.13 Mapa de cobertura CT Boca Jaruco.

3.6 Análisis de los resultados.

Los resultados de la simulación corroboran los cálculos teóricos anteriormente realizados. Se demuestra la factibilidad técnica de los enlaces, teniendo en cuenta que en todos los casos se tomaron los valores críticos. El de nivel de señal en cada uno de los puntos está siempre por encima de los umbrales de los receptores, existiendo un margen de reserva para enfrentar posibles efectos de desvanecimientos por condiciones climatológicas. Los perfiles de propagación de cada uno de los enlaces demuestran que no existen obstáculos en los trayectos quedando liberada la primera zona de Fresnell. Esto posibilitó que se efectuaran las correspondientes correcciones de altura de antenas y potencia de transmisión para lograr un diseño óptimo.

Como resultado de la simulación se obtuvo que el por ciento de cobertura territorial en el área es de un 75 % mientras que la cobertura poblacional es de un 85 % teniendo en cuenta todos los asentamientos poblacionales que se benefician, lo cual favorece la extensión de los servicios de telecomunicaciones a nuevos clientes.

3.7 Análisis económico

A continuación se muestran los costos del equipamiento propuesto para red WiMAX por parte de proveedores como Alvarion y Huawei. Hay que tener en cuenta, que estos precios no son definitivos, pues durante el proceso de negociación el costo del equipamiento puede variar en función del volumen total de la inversión. La licitación y los acuerdos contractuales establecidos con proveedores estratégicos (Huawei) influyen en la decisión final del equipamiento a adquirir.

El análisis de costo del proveedor Alvarion se puede observar en la tabla 3.5.

Tabla 3.5 Análisis de costo del proveedor Alvarion [28].

Equipamiento	Precio	1ra etapa	2da etapa
µBST BreezeMAX 3500	**$12530**	**$37590**	**$37590**
CPE-ODU	**$984**	**$58056**	**$126936**
Antena Omnidireccional	**$590**	**$1770**	**$1770**
Total	**-**	**$97416**	**$166296**

Para el análisis de la propuesta de la red diseñada, con el proveedor Huawei el costo de los principales equipos se muestra en la tabla 3.6.

Tabla 3.6 Análisis de costo del proveedor Huawei [33].

Equipamiento	Precio	1ra etapa	2da etapa
BTS 3703	**$8072**	**$24216**	**$24216**
CPE	**$300**	**$17700**	**$38700**
Antena Omnidireccional	**$876.8**	**$2630**	**$2630**
Total		**$44546**	**$65546**

Luego de realizarse únicamente un análisis de los costos del equipamiento de los proveedores Alvarion y Huawei, es apreciable que la empresa China muestra mejores ofertas. Con este valor de los productos tenemos que el costo por línea del equipamiento Alvarion es de $1402, mientras que el de Huawei es de $585.5; este último es inferior, aunque sigue siendo elevado. En estos momentos solo se propone cambiar las estaciones obsoletas que antes se explicaron, cuando se decida brindar y comercializar nuevos servicios de voz y de datos el costo por línea se abarataría considerablemente.

3.8 Impacto Medio Ambiental

La liberación del sector de las telecomunicaciones ha permitido la aparición de nuevos operadores de telefonía fija que requieren también de la existencia de una red para hacer llegar sus servicios a los usuarios. El despliegue de una red de pares de cobre supone una barrera excesiva, desde el punto de vista económico, para que estos operadores puedan desarrollar su actividad en condiciones de competencia. La tecnología actual de las telecomunicaciones ofrece, entre otras soluciones, la utilización del bucle de acceso del usuario vía radio, que requiere también el despliegue de una infraestructura de estaciones bases y equipos emisores-receptores de radiocomunicaciones.

La existencia de un número creciente de estas estaciones bases, en función del número de usuario y de operadores da lugar a una legítima demanda de información por parte de los ciudadanos en cuanto a los posibles efectos de las emisiones radioeléctricas sobre la salud de las personas y las condiciones de funcionamiento que deben respetarse para evitar cualquier riesgo.

En cuanto a las emisiones electromagnéticas los sistemas WiMAX tienen ciertas características que reducen el impacto sobre el cuerpo humano y el medioambiente:

- Las radiaciones a esas frecuencias son "no ionizantes", por lo cual no tienen energía suficiente para alterar las células vivas.
- La potencia radiada por las estaciones bases WIMAX es del orden de 50 veces menor que la radiada por las estaciones bases del sistema GSM 900 MHz.

A esto hay que añadir que la intensidad de campo disminuye rápidamente al aumentar la distancia a la fuente de radiación.

3.9 Reubicación de los sistemas

Dado el estado obsoleto de casi toda la tecnología inalámbrica para la transmisión de voz y datos en la provincia, se pretende que luego de desarrollar la propuesta de implementar la tecnología WiMAX, se reubiquen los sistemas de transmisión, dado que el estándar 802.16e asumirá la transmisión de banda ancha inalámbrica.

3.9.1 Reubicación de los monocanales y bicanales

En la primera etapa se proyecta la sustitución por nuevos sistemas WiMAX de todos los enlaces de las tecnologías Bestar y Voyager que significan 18 enlaces de radio. Esta sustitución está sustentada en la baja fiabilidad, la obsolescencia y envejecimiento de estas tecnologías. De esta manera se establecería la tecnología Kombi como única existente en los enlaces de más baja capacidad.

Para la segunda etapa proyectamos redistribuir los enlaces de manera que solamente presten servicios a pequeños asentamientos poblacionales no mayor de 100 habitantes y en sistemas especiales del MININT y MINFAR como puntos guardafronteras, unidades militares, etc; siempre que su función sea como vía alternativa.

3.9.2 Trasa

Para la primera etapa se proyecta sustituir todos los servicios de la estación de Santa Cruz (17) por sistemas de tecnología móvil. De esta manera se contaría con un stock de repuesto para la otra estación ya que esta es la mayor dificultad que enfrenta en la actualidad.

Para la segunda etapa se propone sustituir toda la tecnología con sistemas de telefonía móvil o WiMAX. El Trasa es un sistema de tecnología analógica, de muy bajo tráfico, que no permite la supervisión de la estación, ni sus abonados y que se considera cumplió con su cometido histórico, mantenerla por mayor tiempo redunda en mayores costos que beneficios. Es por eso que su empleo en otras funciones no se considera.

Conclusiones

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

1. Se realizó un estudio sobre los estándares de redes de acceso de banda ancha inalámbrica, su evolución y tecnologías de mayor uso en el mercado actual. Se profundizó en el estándar WiMAX como solución idónea para redes metropolitanas aplicable a nuestro territorio.

2. Se realizó una investigación acerca de la red de acceso inalámbrica existente en la provincia de Mayabeque, quedando demostrado su incapacidad para garantizar el ancho de banda requerido para las nuevas demandas de servicios de comunicaciones. Se propone la reubicación de estos sistemas como solución de redundancia.

3. Se analizó técnicamente el equipamiento que presenta los proveedores Alvarion y Huawei, así como los resultados en las pruebas de campo realizada en Artemisa, concluyendo que ambos proveedores cumplen con las exigencias demandadas adecuándose perfectamente a la topografía de nuestro territorio.

4. Se realizó el diseño de una red de acceso inalámbrica WiMAX que da respuesta a la actual demanda de servicios, la cual fue modelada utilizando el Software Radio Mobile. Asimismo fueron corroborados los resultados de los cálculos teóricos en la simulación, demostrándose la factibilidad técnica de los enlaces, definiéndose el balance energético y el perfil de propagación de cada uno. Se efectuaron las correspondientes correcciones de altura de antenas y potencia de transmisión para lograr un diseño óptimo.

5. Del análisis económico se concluye que el costo de instalación es alto aunque el impacto económico y social hacen factible esta inversión. Se selecciona Huawei por presentar mejores precios y ser un proveedor estratégico. La comercialización de nuevos servicios de voz y datos, que permite el diseño propuesto, conllevará a la amortización en corto período de tiempo de esta inversión.

El presente trabajo constituye una propuesta de solución WiMAX a la red de acceso inalámbrica de la provincia de Mayabeque que garantiza la actual demanda de servicios de voz y datos, como respuesta al objetivo central de esta investigación. ETECSA podrá garantizar el ancho de banda necesario en el futuro para el desarrollo de la informatización de la sociedad, así como otros programas priorizados por la Dirección del País.

Recomendaciones

Al concluir esta investigación se han observado algunos aspectos en los que se debería trabajar más para completar o ampliar este trabajo por lo que se recomienda realizar un estudio de factibilidad económica para la inversión del proyecto, tomando en cuenta no solo el costo del equipamiento, así como sugerir al Departamento de Desarrollo y Operaciones de la Red de la División Territorial Mayabeque la utilización del presente trabajo como referencia en el planeamiento operativo de la red de la provincia.

Se recomienda además aplicar este estudio a otros proyectos similares en ETECSA y elevar la propuesta a la dirección de la Empresa con el objetivo de llevar a cabo la realización del Proyecto, lo cual permitirá a ETECSA aumentar los ingresos y la satisfacción de los clientes, así como realizar el mismo estudio pero utilizando otra tecnología de acceso de banda ancha inalámbrica.

Referencias Bibliográficas

1. Ortega, D.G., Tecnologías de banda ancha existentes en la actualidad para Internet. Comparativa crítica, cómo elegir una., in Revista Digital Innovación y Experiencias Educativas. 2011: Córdoba.

2. Sánchez, F.R.G.P.V.Q., IEEE 802.11 (Wi-Fi) El estándar de facto para WLAN. Alcatel España, S.A- Tribuna Tecnológica, 2003.

3. Herrera, E.G., Tecnologías WiMAX: banda ancha de largo alcance. 2007.

4. WiMAX - 802.16 - Interoperabilidad mundial para acceso por micro. 2007 [updated 2007; cited 2011 25 de enero]; Available from: http://es.kioskea.net/contents/WiMAX/WiMAX-intro.php3.

5. ¿Qué es WiMAX? ; 2006 [updated 2006; cited 2011 2 de febrero]; Available from: http://recursostic.educacion.es/observatorio/web/es/equipamiento-tecnologico/redes/349-andres-lamelas-torrijos.

6. Andrews JG, A. Ghosh; R. Muhamed. Fundamentals of WiMAX. Understanding Broadband Wireless Networking. Education P, editor.; 2007.

7. Manuel Álvarez-Campana, J.B.C., Francisco González Vidal, Raquel Pérez Leal, Isabel Román Martínez, Enrique Vázquez Gallo, Tecnologías de banda ancha y convergencia de redes. 2009, Madrid, España.

8. Introducción a los sistemas de múltiples antenas. 2008 [updated 2008; cited 2011 18 febrero]; Available from: http://arantxa.ii.uam.es/~tac/Documentacion/Tema_V_Introduccion_Sistemas_Multiples_Antenas_ver0.pdf.

9. González Ochoa GA.Trabajo de Diploma: Investigación de los sistemas MIMO. Propuesta de antenas para este sistema. Ciudad de la Habana: Instituto Superior Politécnico José Antonio Echevarría; 2006.

10. Cruz, G.L., WiMAX: banda ancha para todos, in Tono, Revista Cubana de la Empresa de Telecomunicaciones de Cuba S.A. 2006: Ciudad de La Habana, Cuba.

11 Nix, Y.Q.B.a.A.R., Mobile WiMAX: Multi-Cell Network Evaluation and Capacity Optimization 2008.

12. Forum, W., WiMAX and the IEEE 802.16m Air Interface Standard. 2010.

13. Thelander, M.W., WiMAX Oportunidades y desafíos en un mundo inalámbrico. Informe desarrollado para el CDMADevelopment Group (CDG) 2005.

14. Estadísticas, O.N.E. Población de la provincia Mayabeque. 2011 [acceso 2011 Septiembre 12]; Disponible en: http://www.one.cu/EstadisticaPoblacion/EstadisticaPoblacion.asp.

15. EcuRed. Provincia Mayabeque. 2011 [acceso 2011 Octubre 03]; Disponible en: http://www.ecured.cu/index.php/Mayabeque_(provincia).

146 Hernando Rábanos JM. Comunicaciones Móviles. Editorial Centro de Estudios Ramón Areces ed.; 1997.

17. Manual de Mantenimiento para Monocanales Kombi. 1991.

18. Monocanal Telefónico Duplex. 1990.

19. Manual de Mantenimiento para Bicanales Bikom. 1992.

20. Webb W. Introduction to Wireless Local Loop 2da Ed. London ed.; 2000.

21. B-612 Sistema de Telefonía Rural por Acceso Múltiple. Journal [serial on the Internet]. 1997 Date.

22. Heine G. GSM Networks: Protocols, Terminology and Implementation. 1999.

23. Reyes AM, editor. Presentación para forum ETECSA; 2009.

24. Leyva Machín EGG, Alberto J. Consideraciones para la selección de un producto del estándar WiMAX Móvil 802.16e. 2009.

25. Fernández Karel L. Trabajo de Diploma: Propuesta de implementación técnica basada en tecnología WiMAX para el CAMPUS CUJAE [pdf]. Ciudad de La Habana: Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría; 2010: pp 45.

26. 4Motion wireless broadband in motion. Journal [serial on the Internet]. 2006 Date: Available from: www.alvarion.com.

27. BreezeMAX Delivering the Promise of WiMAX. Journal [serial on the Internet]. 2006 Date: Available from: www.alvarion.com.

28. Capacitación Telefonía IP. Gestión del Cambio. [pdf]. 2008.

29. Alvarion Ltd. Sistema de Gestión AlvariSTAR. 2005.

29. Huawei Technologies Co., Ltd. HUAWEI WASN9770 Packet Service Gateway. Journal [serial on the Internet]. 2008 Date.

30. Huawei Technologies Co., Ltd. infoX WiMAX AAA Product Description. 2009.

31. EchoLife BM625 WiMAX CPE, V100R001, Huawei Technologies Co., Ltd. Journal [serial on the Internet]. 2008 Date.

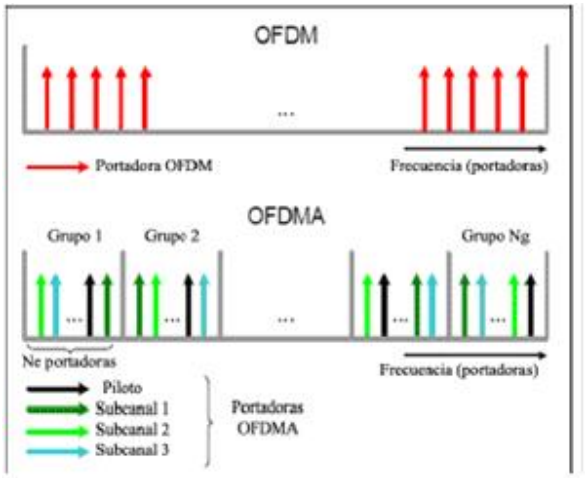
32. Breezemax-asn-gw. Acceso 2011 Julio 11]; Disponible en: http://www.alvarion.com/index.php/es-ES/products/lista-prodotti/breezemax/ Breezemax-asn-gw

33. Raikov Carballo Pacheco, Trabajo de Diploma: Estudio del Software Radio Mobile como propuesta docente en las disciplinas de Radiocomunicaciones [pdf]. Santa Clara, Universidad Central “Marta Abreu” de las Villas, 2010.

34. Informe de resultados de la Prueba piloto WiMAX en Artemisa. ETECSA,

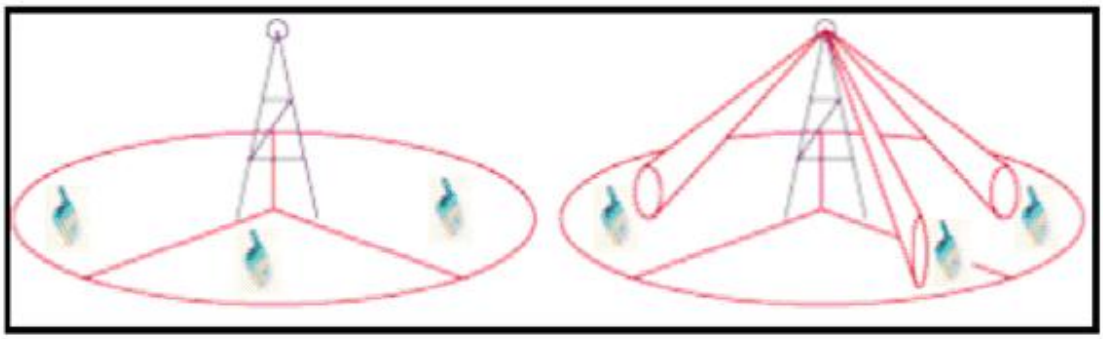
Anexos

ANEXO 1A



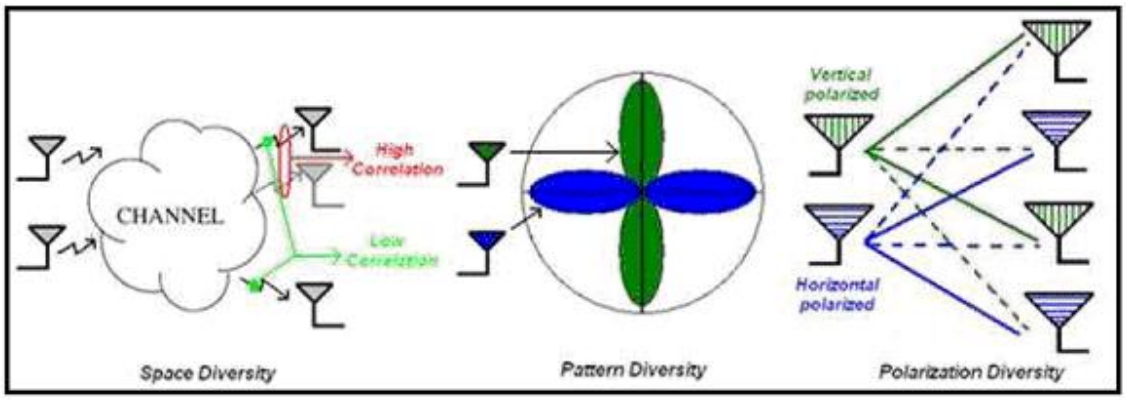
Representación de OFDM y OFDMA

ANEXO 1B



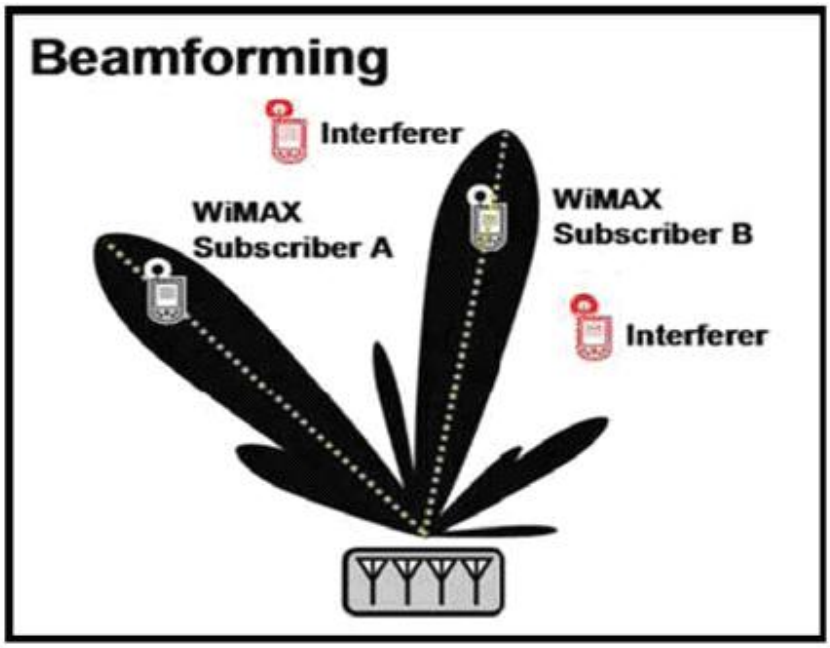
Antena sectorial (izquierda) versus antena inteligente de configuración de haz (derecha).

ANEXO 1C



Variantes de la tecnología MIMO.

ANEXO 1D



***Beamforming* en WiMAX.**

ANEXO 2A

	Marca	Modelo	Cantidad enlaces
1.	Kombi	Monokom	32
2.	Bestar	Bestar	9
3.	Ranger	Voyager	9

Sistemas Monocanales

No	Marca	Modelo	Cantidad enlaces
1.	Kombi	Bikom	15

Sistemas Bicanales

ANEXO 2B

	Academia # 1	**Academia # 2**	**Boca de Mariel**	**Quiebra Hacha**	**Total**
Serv. Públicos	11	3	0	5	**19**
Serv. Residenciales	8	6	17	2	**33**
Serv. Estatales	4	6	12	2	**24**
Total	**23**	**15**	**29**	**9**	**76**

Distribución de los servicios del WLL.

	Academia # 1	Academia # 2	Boca de Mariel	Quiebra Hacha	Total
WNT-S	8	0	1	7	**16**
WNT-D2L2	8	3	8	0	**19**
WNT-Q	2	6	6	2	**16**
Total	**18**	**9**	**15**	**9**	**51**

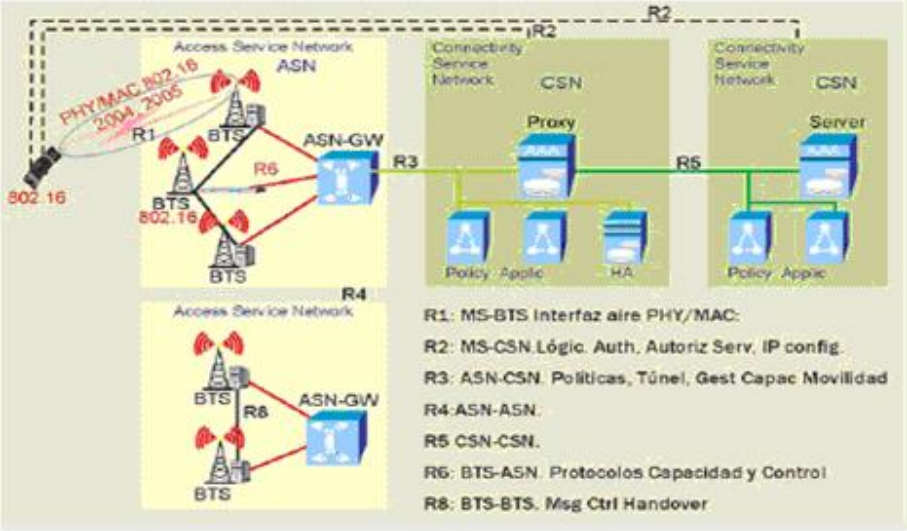
Distribución de las estaciones WNT del WLL.

ANEXO 2C

- Rango de frecuencias (Modelo B612/1)
  - Transmisión 165 a 167.5 MHz
  - Recepción 171 a 173.5 MHz
- Modelo B612/2
  - Transmisión 246 a 248.5 MHz
  - Recepción 256 a 258.5 MHz
- Separación entre canales adyacentes 25 kHz
- Modo de emisión 16KOG3EJN
- Tipo de señalización Digital, dentro de banda
- Canales de radio 8
- Número de abonados 120 Máximo
- Modo de explotación Dúplex
- Impedancia de entrada 50 Omh
- Tensión de alimentación 13.2 V
- Potencia de emisión módulo canal 40 dBm

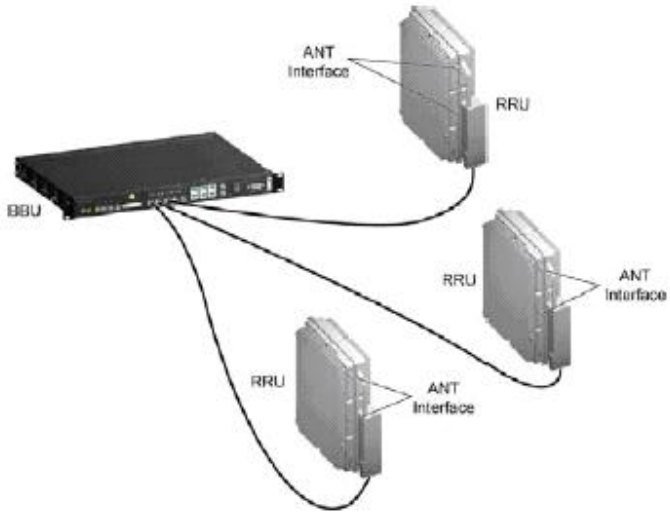
Características técnicas del B612

ANEXO 2D



Modelo de referencia de WiMAX Forum

ANEXO 2E



Componentes de la BTS 3703

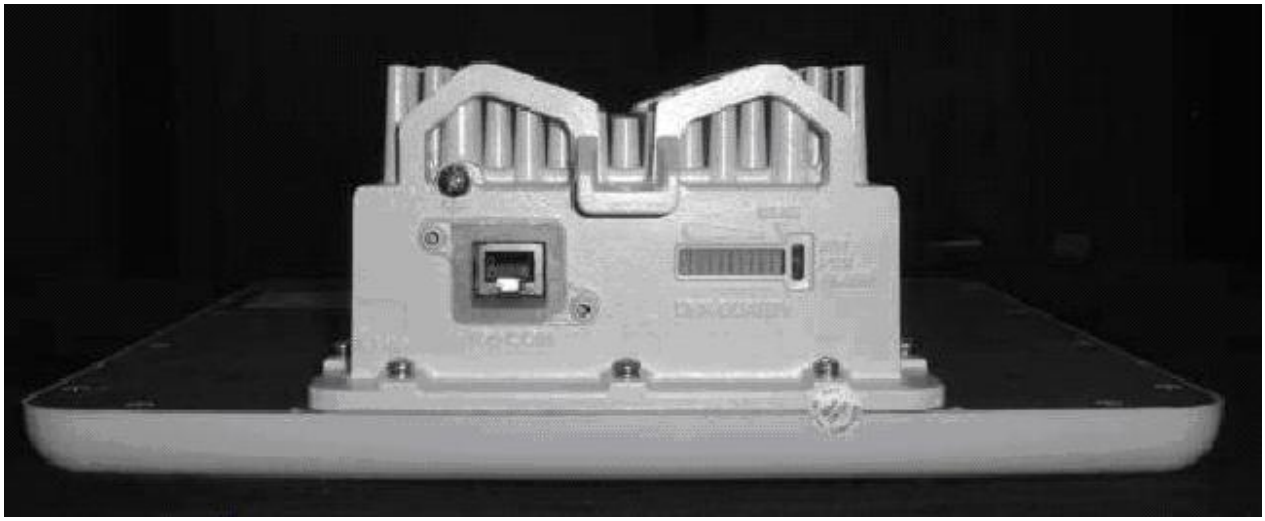
ANEXO 2F

Micro estación base BreezeMAX 3500

ANEXO 2G

Antena con ángulo de 120º

ANEXO 2H



BreezeMAX CPE-ODU-AV-3.5

ANEXO 2I

BreezeMAX CPE IDU.

ANEXO 2J

Gateway de voz parte frontal

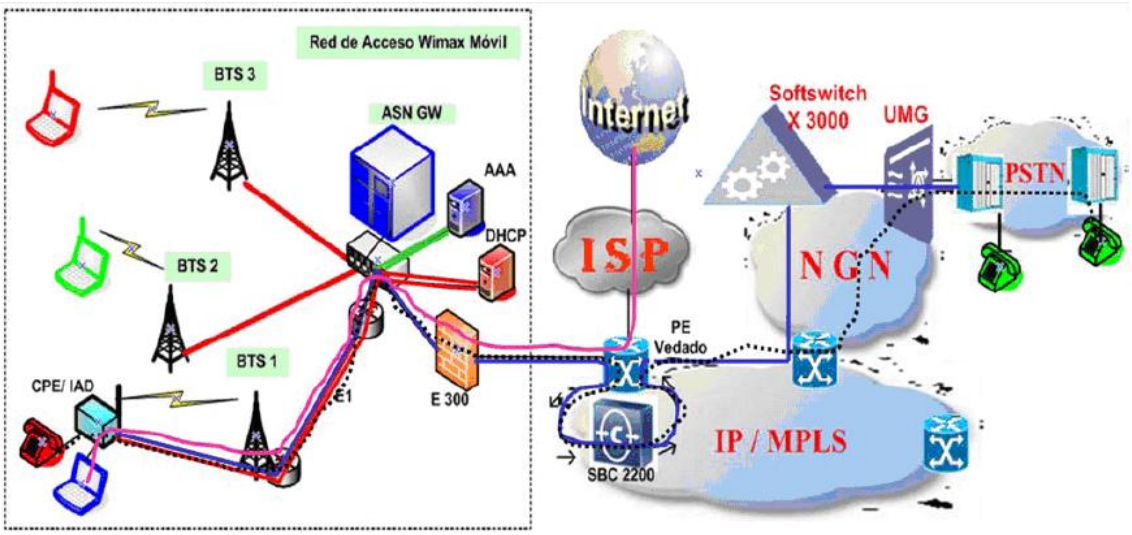
Gateway de voz parte posterior.

ANEXO 2K

Tabla 6.2 Datos técnicos de los enlaces

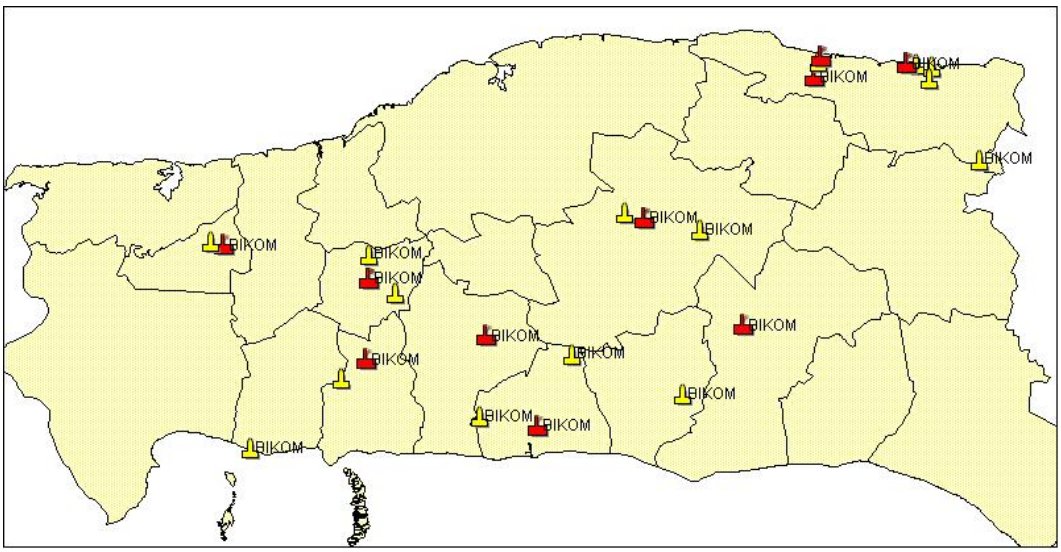
No.	Nombre	Lugar	Tipo de Inst.	Intensidad de Campo (dBm)		Modulación		Velocidad hasta (Mbps)	
				Up-Link	Down-Link	Up-Link	Down-Link	Up-Link	Down-Link
1	Alberto Nodarse	Mirador	EP-Asent.	-93.2	-86	QAM16 1/2	QAM64 2/3	8	11
2	Augusto C. Sandino	Corojal	EP-Asent.	-80.7	-72	QAM64 3/4	QAM64 3/4	12	12
3	Sede Universitaria	Artemisa	Centro Univ.	-74	-65	QAM64 3/4	QAM64 3/4	12	12
4	Quebrada del Yuro	Quebrada del Yuro	EP-Asent.	-83.5	-77	QAM64 3/4	QAM64 3/4	12	12
5	Comunidad La Granada	La Granada	CMF-Asent.	-70	-64	QAM64 3/4	QAM64 3/4	12	12
6	Máximo Gómez	La Granada	EP-Asent.	-78.1	-71	QAM64 3/4	QAM64 3/4	12	12
7	Batalla Molinos del Rey	Calipso	IPUEC	-72.1	-65	QAM64 3/4	QAM64 3/4	12	12
8	Abel Santamaría	Calipso	EP-Asent.	-84.8	-78	QAM16 3/4	QAM64 3/4	10	12
9	Mártires de Kent	Calipso	ESBEC	-89.4	-83	QAM16 3/4	QAM64 3/4	10	12
10	República de Yemén	Calipso	ESBEC	-76.2	-66	QAM64 3/4	QAM64 3/4	12	12
11	Manuel A. Domenech	Calipso	IPUEC	-84.6	-77	QAM64 2/3	QAM64 3/4	10	12
12	Mártires de Artemisa	Central Lincoln	IPOL	-74.3	-54	QAM64 3/4	QAM64 3/4	12	12
13	Marcos Martí	Calipso	IPUEC	-73.4	-61	QAM64 3/4	QAM64 3/4	12	12
14	José A. Labrador	Pijirigua	EP-Asent.	-99	-90	QAM16 3/4	QAM64 3/4	10	12
15	Paradero Mangas	P. Mangas	Consultorio	-78.1	-71	QAM16 3/4	QAM16 3/4	12	12
16	Isidro de Armas	Las Mangas	EP-Asent.	-84	-78	QAM16 3/4	QAM64 3/4	10	11
17	Ciudad Industrial	C. Industrial	Consultorio	NM	NM	NM	NM	NM	NM
18	José Martí	Calipso	ESBEC	NM	NM	NM	NM	NM	NM
19	Mango Dulce	Mango Dulce	EP-Asent.	-74.3	-67	QAM64 3/4	QAM64 3/4	12	12

ANEXO 2L



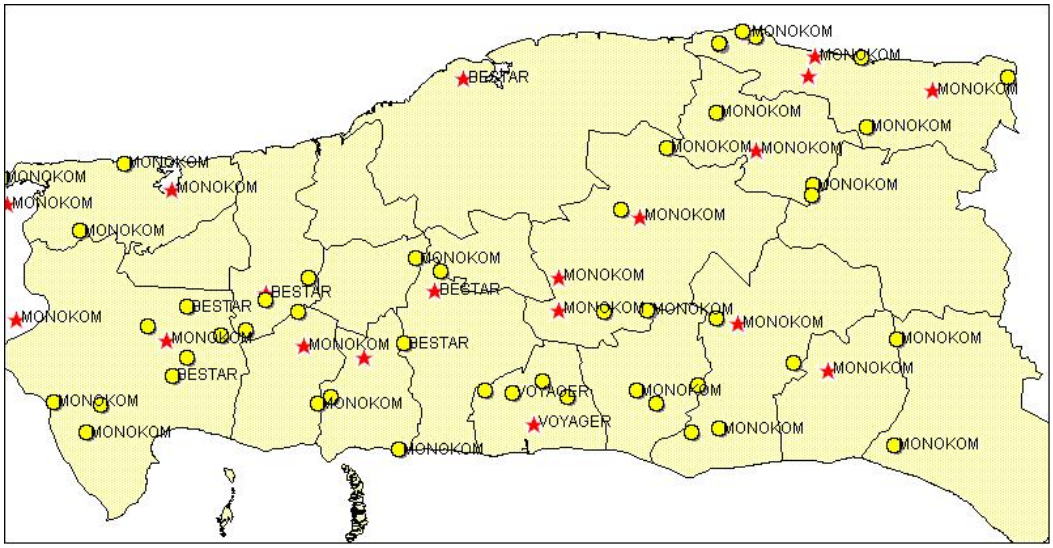
Conexión a la NGN

ANEXO 3A



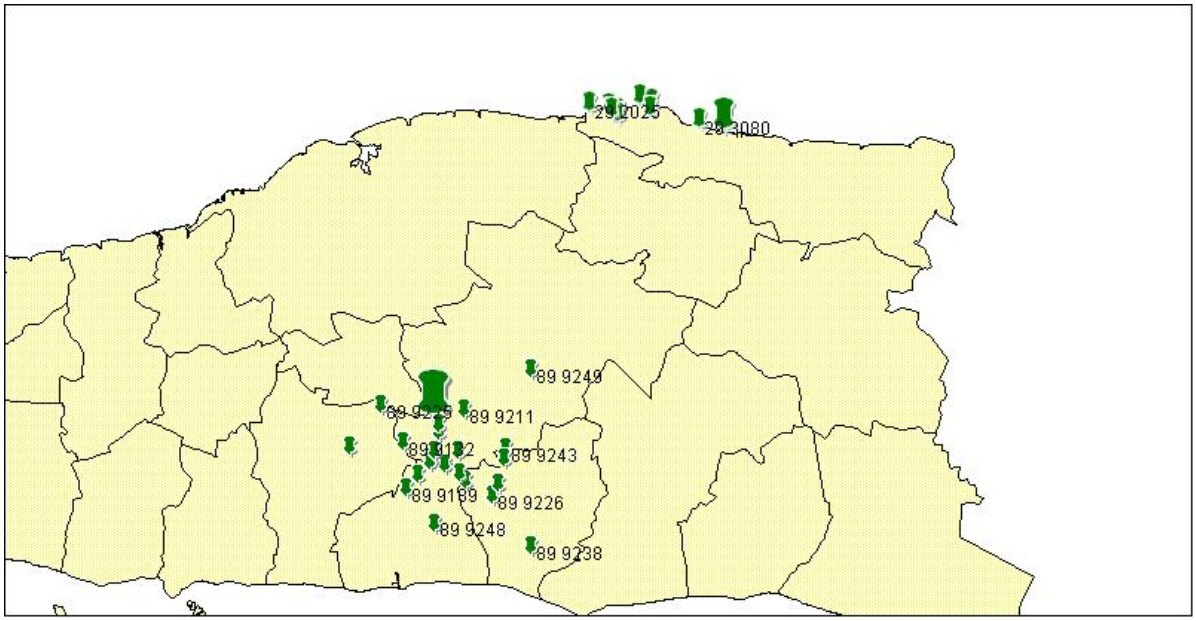
Localización de sistema Bicanales

ANEXO 3B



Localización de sistema Monocanales

ANEXO 3C



Localización de los sistemas Trasa