

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR
DE INGENIEROS DE TELECOMUNICACIÓN



PROYECTO FIN DE CARRERA

ESTUDIO DE VIABILIDAD TÉCNICA Y
ECONÓMICA PARA LA MIGRACIÓN
DE RED WIFI A WIMAX EN
ENTORNOS RURALES

Autora: D^a. Sandra Paulina Espinoza Avalos
Tutor: D. Manuel Sierra Castañer
Cotutor: D. Luis Camacho

Febrero 2010

Título: ESTUDIO DE VIABILIDAD TÉCNICA Y ECONÓMICA PARA LA MIGRACIÓN DE RED WIFI A WIMAX EN ENTORNOS RURALES

Autor: D^a. SANDRA PAULINA ESPINOZA AVALOS

Tutor: D. MANUEL SIERRA CASTAÑER

Cotutor: D. LUIS CAMACHO

TRIBUNAL

Presidente: D. JOAQUÍN SEOANE PASCUAL

Vocal: D. MANUEL SIERRA CASTAÑER

Secretario: D. CARLOS DEL CAÑIZO NADAL

Fecha de la defensa:

Calificación:

Resumen

El sector de las telecomunicaciones en la mejor de las condiciones de vida de los países emergentes ha experimentado un avance vertiginoso en los últimos años. Ante el poco éxito que han tenido otras tecnologías inalámbricas de bajo coste se han utilizado en la mayor parte de los casos para enlaces de largo alcance tecnologías WiFi. Pero tal como vemos la perspectiva futura de otras tecnologías robustas, prometedoras y que actualmente trabajan también en bandas de frecuencia libre como WiMAX la tendencia es cada vez a la mejora e implementación de estos estándares, IEEE802.11 y IEEE802.16, el primero adaptado al mundo de largas distancias y el segundo diseñado para ello, pero aun económicamente más costoso para escenarios de países emergentes.

En este proyecto de fin de carrera se hace un estudio de la actualidad de ambas tecnologías, IEEE802.11 e IEEE802.16, empezando por el estudio y resumen de las características principales de los estándares, pasando por el diseño en WiMAX de una red actualmente está operativa en WiFi, ubicada en Cusco-Perú y perteneciente al programa Willay; para terminar concluyendo con la viabilidad técnica de la posible migración tecnológica. Al mismo tiempo se hace un estudio de económico de costos y de la tendencia que tiene actualmente el mercado de IEEE802.16 (WiMAX), planteando así una solución con descripción de equipos y detalle de instalación, suficientes para cubrir las necesidades de la red pero dejando una puerta abierta hacia la extensión y la mejora de servicios.

Como parte complementaria del presente PFC se incluye un apartado de cooperación para el desarrollo que analiza el impacto del mismo sobre el desarrollo local de la región y la influencia que este puede tener en los objetivos de desarrollo del milenio.

Este proyecto está enmarcado en el Programa de Becas de Proyectos de Fin de Carrera para el desarrollo (PFCD) de la Universidad Politécnica de Madrid, elaborado en Lima-Perú en del Grupo de Telecomunicaciones Rurales (GTR) de la Universidad Católica del Perú

Palabras clave: WiMAX, WiFi, IEEE802.11, IEEE802.16, Willay, tecnologías inalámbricas, largo alcance, largas distancias, desarrollo, cooperación, ODM, UPM, PFCD.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE GENERAL.....	4
ÍNDICE DE FIGURAS	6
ÍNDICE DE TABLAS	8
GLOSARIO	9
1 Introducción	13
1.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROYECTO	13
1.2 OBJETIVOS	14
1.2.1 OBJETIVO GENERAL.....	14
1.2.2 OBJETIVO ESPECÍFICO	14
1.3 FASES DEL DESARROLLO.....	14
1.4 ESTRUCTURA DE LA MEMORIA	15
1.4.1 Parte I: Introducción.....	15
1.4.2 Parte II: Estado de Arte	15
1.4.3 Parte III: Descripción del trabajo realizado	16
1.4.4 Parte IV: Conclusiones y Líneas Futuras	16
1.4.5 Parte V: Anexos y Referencias.....	16
2 Estándares de IEEE.....	18
2.1 OBJETIVO	18
2.2 DESARROLLO	18
3 IEEE802.11 - WiFi.....	22
3.1 INTRODUCCIÓN	22
3.2 ARQUITECTURA DE RED	23
3.3 ESTÁNDAR 802.11	28
3.3.1 LA CAPA FÍSICA DE IEEE802.11	29
3.3.2 CONTROL DE ACCESO AL MEDIO EN 802.11	35
3.3.3 SEGURIDAD EN REDES IEEE802.11	41
3.3.4 CALIDAD DE SERVICIO CON IEEE802.11e	43
3.4 Wi-Fi EN LARGAS DISTANCIAS	47
3.4.1 Límites de WiFi como tecnología de largo alcance	48
4 IEEE802.16 - WiMAX.....	51
4.1 INTRODUCCIÓN	51
4.2 ARQUITECTURA DE RED	52
4.2.1 ELEMENTOS DE LA RED	53
4.3 ESTÁNDAR IEEE802.16	53
4.3.1 VISIÓN GENERAL	53
4.3.2 EVOLUCIÓN DEL ESTÁNDAR	56
4.3.3 CAPA FÍSICA	56
4.3.4 CAPA MAC	60
4.3.5 UTILIZACIÓN DEL ESPECTRO.....	64
4.3.6 CALIDAD DE SERVICIO (QoS – Quality of Service)	67
4.3.7 SEGURIDAD EN LA REDES WIMAX.....	69
5 ANÁLISIS DAFO	72
5.1 DAFO de WIFI	72
5.2 DAFO de WIMAX	73
6 Red Willay en IEEE802.16-WiMAX.....	76
6.1 SITUACIÓN ACTUAL.....	76
6.1.1 SERVICIOS WIFI-RED WILLAY.....	76

6.1.2	DESCRIPCIÓN TECNOLÓGICA	77
6.1.3	UBICACIÓN Y DISEÑO-RED WILLAY	79
6.1.4	Diagramas de Red Willay WiFi.....	80
6.2	DISEÑO DE LA RED WIMAX.....	81
6.2.1	Introducción	81
6.2.2	Análisis teórico de los enlaces WiMAX en WILLAY-Cusco.....	82
6.2.3	Diagrama de Red WILLAY – WiMAX.....	96
6.2.4	Desarrollo y Puntos de Instalación.....	97
6.3	TABLA COMPARATIVA WiFi-WiMAX	101
6.3.1	Figuras de Tabla Comparativa	103
6.4	SITUACIÓN ECONÓMICA-Caso I	104
6.7.1	.....	104
6.4.1	INTRODUCCIÓN	104
6.4.2	EQUIPOS WIMAX. Precios y Características.....	104
6.4.3	COMPONENTES ADICIONALES	109
6.4.4	COSTES DE LA TOPOLOGÍA.....	110
7	Red Cerro Pasco GAMACOM	111
7.1	RED HUAYLLAY Y SANTANA DE TUSI-PASCO GAMACOM	111
7.1.1	Antecedentes	111
7.1.2	OBJETIVO:.....	112
7.1.3	VISIÓN GENERAL DE UNA ESTACIÓN BASE	113
7.1.4	ASPECTO FÍSICO DE UNA ESTACIÓN BASE.....	120
7.1.5	MONITOREO DE ESTACIÓN BASE (BS) RED LINE AN 100U.....	123
7.1.6	SUSCRIPTORES.....	134
7.2	SITUACIÓN ECONÓMICA-Caso II	135
8	CONCLUSIONES	136
9	CONCLUSIONES GENERALES.....	140
10	COOPERACIÓN PARA EL DESARROLLO	142
10.1	Influencia en Cooperación para el desarrollo tecnológico y Humano.	142
10.2	Aporte a los Objetivos de Desarrollo del Milenio (ODM)	143
10.2.1	Perú y el cumplimiento de los ODM.....	143
10.2.2	Impacto del proyecto en los ODM locales	145
11	ANEXOS I: CAPA MAC WiMAX (IEEE802.16).....	147
11.1	ANEXO1. Funcionalidades de la capa MAC	147
11.1.1	Introducción	147
11.1.2	Duplexado (FDD, TDD).....	147
11.1.3	Sistema de control de errores ARQ / HARQ.....	148
11.1.4	Estructuras de tramas en MAC.....	149
11.2	ANEXO II: Hojas de Características.....	151
11.2.1	Datasheet de la Estación Base AN-100U de RedLine	151
11.2.2	Datasheet de Estación Suscriptora de RedLine	152
11.3	ANEXO III: Precios de otros equipos WiMAX	153
12	REFERENCIAS	155

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Familia de estándares 802 del IEEE	18
Figura 2. Estándares de ETSI (Europa) y IEEE (Norte América) para redes inalámbricas	22
Figura 3. Componentes de LAN's 802.11 [WirelessNet]	24
Figura 4. Servicio Extendido (ESS)	25
Figura 5. Tipos de BSS's [WirelessNet]	25
Figura 6. Resumen de servicios en IEEE802.11	27
Figura 7. Modelo OSI (pila).....	27
Figura 8. Arquitectura de capas de protocolos de IEEE802.11 comparados con modelos OSI ..	29
Figura 9. División de la capa PHY de 802.11.....	30
Figura 10. Estructura de una trama PPDU [IEEE11]	30
Figura 11. Transmisión PLCP [IEEE1107]	31
Figura 12. Salto de frecuencia	32
Figura 13. Estructura de un canal OFDM	33
Figura 14. Relación entre DCF y PCF [IEEE11]	36
Figura 15. Funcionamiento MAC - Esquema temporal	37
Figura 16. Transmisión fragmentada de una MPDU	38
Figura 17. Estructura de una MPDU.....	38
Figura 18. Estructura de una trama ACK[IEEE1107].....	39
Figura 19. Estructura de trama RTS [IEEE1107]	40
Figura 20. Estructura de trama CTS [IEEE1107]	40
Figura 21. Modo de funcionamiento WEP	42
Figura 22. Estructura MAC [IEEE11]	44
Figura 23. Tráfico EDCA.....	45
Figura 24. Parámetros EDCA	46
Figura 25. Tráfico en HCCA.....	47
Figura 26. Niveles de Potencia transmitida (USA & Europa) [IEEE1107]	49
Figura 27. Niveles de Potencia transmitida (Japón) [IEEE1107].....	49
Figura 28. Estructura de capas en IEEE802.16	52
Figura 29. Esquema conexión entre SS y BS.....	53
Figura 30. Estándares Inalámbricos – Cobertura	54
Figura 31. Esquema de propagación LOS y NLOS [OSIPTL]	55
Figura 32. Esquema de FDD y TDD	57
Figura 33. Estructura de símbolo OFDM (en tiempo) [IEEE16d][IEEE1609].....	58
Figura 34. Tipo de Modulación según alejamiento de la BS [OSIPTL].....	60
Figura 35. Estructura de capas MAC [IEEE1609]	61
Figura 36. Funciones de las capas MAC	61
Figura 37. Formato de PDU MAC [IEEE1609]	62
Figura 38 Utilización de bandas en WIMAX [FUJIT]	66
Figura 39. ANTENAS de Hiperlík utilizadas.....	78
Figura 40. Esquema TRONCAL.....	80
Figura 41. Esquema de DISTRIBUCIÓN.....	80
Figura 42. Escenarios IEEE802.16-WiMAX	81

Figura 43. Caso NLOS.....	83
Figura 44. Caso LOS	83
Figura 45. Modulación OFDM con 256 subportadoras	84
Figura 46. Esquema general de Instalación.....	86
Figura 47. Red de Distribución	87
Figura 48. Red Troncal.....	88
Figura 49. Enlace UNSAAC-JOSJOAHUARINA	90
Figura 50. Enlace JOSJOAHUARINA-DON JUAN	90
Figura 51. Enlace DON JUAN - REP.POMACHANCHI	90
Figura 52. Enlace LAYKATUYOCK-PNP SANGARARÁ.....	91
Figura 53. Enlace LAYKATUYOC-HUASCAR	91
Figura 54. Enlaces HUASCAR-MUNI. ACOMAYO	91
Figura 55. Enlace REP.POMACANCHI-MUNI.POMACANCHI	92
Figura 56. Enlace MUNI.ACOMAYO-UGEL.....	92
Figura 57. Enlace MUNI.ACOMAYO-PNP ACOMAYO	93
Figura 58. Enlace MUNI.ACOMAYO-COLEGIO T.T.C.....	93
Figura 59. Enlace MUNI.POMACANCHI-COLEGIO Simón Bolívar	93
Figura 60. Enlace MUNI.POMACANCHI-COLEGIO S.J.B.....	94
Figura 61. Enlace MUNI.POMACANCHI-INS.PEDAGÓGICO	94
Figura 62. Enlace MUNI.POMACANCHI-PNP	94
Figura 63. Enlace PNP-MUNI.SANGARARÁ	95
Figura 64. Enlace PNP- INSTITUTO TECNOLÓGICO	95
Figura 65. Enlace PNP-COLEGIO LIBERTADORES DE AMÉRICA	95
Figura 66. Red WILLAY en WIMAX	96
Figura 67. RedLine Interface de Gestión	99
Figura 68. RedLine Gestión de Equipos.....	100
Figura 69. Cobertura WIMAX	103
Figura 70. Características de ALB258E	105
Figura 71. Características de ALB450	106
Figura 72. Características de ARBA550	107
Figura 73. Características de TR-WX-5-16.....	108
Figura 74. Red GAMACOM de Cerro de Pasco - Perú	113
Figura 75. Ejemplo de SS's y FS's.....	114
Figura 76. Capa MAC de WIMAX.....	117
Figura 77. Proceso de Inicialización en una red WiMAX.....	118
Figura 78. Mecanismo de QoS.....	118
Figura 79. Unidad Indoor-IDU	121
Figura 80. Puerto Wireless	121
Figura 81. Puerto Ethernet.....	122
Figura 82. Unidad Outdoor-ODU.....	122
Figura 84. Panel de Wireless Status-BS AN100U (I)	124
Figura 83. Panel de Información General-BS AN100U	124
Figura 85. Panel de Wireless Status-BS AN100U (II)	125
Figura 86. Estado de las SS's.....	125
Figura 87. Estado de SS's.....	126

Figura 88. SF Gestión.....	127
Figura 89. Asignación de SF a SS	127
Figura 90. Configuración Interfaz Wireless (I).....	128
Figura 91. Configuración Interfaz Wireless (II).....	129
Figura 92. PtMP a nivel de MAC.....	131
Figura 93. Interfaz Ethernet	132
Figura 94. Parámetros IP	133
Figura 95. Configuración Avanzada.....	133
Figura 96 . Configuración de SS.....	135
Figura 97. Secuencia de tramas en FDD y TDD	147
Figura 98. Estructura de trama OFDM con TDD.....	149
Figura 99. Estructura de trama OFDM con FDD.....	150

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Tipos de capas físicas - Características [IEEE16d][IEEE1609].....	58
Tabla 2. Asignación de Frecuencias (3400-3500MHz) UPLINK – PERÚ [MTCPE]	66
Tabla 3. Asignación de Frecuencias (3500-3600MHz) DOWNLINK – PERÚ.....	67
Tabla 4. Espectro radioeléctrico PERÚ [OSIPTL].....	67
Tabla 5. Servicios de QoS [IEEE16d] [IEEE1609].....	68
Tabla 6. SBC´s para aplicaciones inalámbricas	77
Tabla 7. Tarjetas para WiFi de larga distancia.....	77
Tabla 8. Sensibilidades ALB/ARBA.....	83
Tabla 9. ESQUEMAS DE MODULACIÓN	84
Tabla 10. BIT RATE con canal 1,75 MHz	85
Tabla 11. BIT RATE con canal 3.5 MHz	85
Tabla 12. BIT RATE con canal 7 MHz	85
Tabla 13. BIT RATE con canal 10 MHz	85
Tabla 14. PARÁMETROS DE RADIO. Equipos WiMAX.....	89
Tabla 15. Costes adicionales	109
Tabla 16 .Coste de la Topología	110
Tabla 17. Flujos de Servicio soportado por WiMAX [FundWMX]	120
Tabla 18. Contenido en el Interfaz Web de BS.....	123
Tabla 19. Límites de distribución de trama.....	130
Tabla 20. Velocidades en BS RedMAX.....	132
Tabla 21 . Umbrales de Cambio de Modulación	134
Tabla 22 Equipos WiMAX de Red Gamacom.....	135
Tabla 23. Tipos de Duplexación en IEEE802.16.....	148

GLOSARIO

AAS Adaptive Antenna System
ACK Acknowledgment
AES Advanced Encryption Standard
AGC Automatic Gain Control
AID Association Identifier
AK Authorization Key
AP Access Point
ARQ Automatic Repeat Request
ATDD Adaptive Time Division Duplexing
ATM Asynchronous Transfer Mode
BE Best Effort
BER Bit Error Ratio
BPSK Binary Phase Shift Keying
BR Bandwidth Request
BS Base Station
BSS Basic Service Set
BW Bandwidth
BWA Broadband Wireless Access
CA Certification Authority
CC Confirmation Code
CCH Control Subchannel
CDMA Code Division Multiple Access
ChID Channel Identifier
CF Contention Free
CFP Contention-Free Period
CID Connection Identifier
CINR Carrier-To-Interference-And-Noise Ratio
CIR Channel Impulse Response
CP Cyclic Prefix
CPS Common Part Sublayer
CRC Cyclic Redundancy Check
CS Convergence Sublayer
CSMA Carrier Sense Multiple Access
CTC Convolutional Turbo Code
dBi decibelios de ganancia relative a 0 db de ganancia de una antenna isotropica
dBm Decibelios Relativos A 1 Mw
DCD Downlink Channel Descriptor
DES Data Encryption Standard
DHCP Dynamic Host Configuration Protocol
DL Downlink
DQPSK Differential Quadrature Phase Shift Keying
DS DISTRIBUTION SYSTEM

DSCH Distributed Scheduling
DSSS Direct-Sequence Spread Spectrum
EAP Extensible Authentication Protocol
EC Encryption Control
EDCA Enhanced DCF Channel Access
EIFS Extended Inter-Frame Space
EIRP Effective Isotropic Radiated Power
FC Fragmentation Control
FCC Federal Communications Commission
FCH Frame Control Header
FDD frequency Division Duplex
FEC Forward Error Correction
FFT Fast Fourier Transform
FHDC Frequency Hopping Diversity Coding
FHSS Frequency Hopping Spread Spectrum
FSH Fragmentation Subheader
FSN Fragment Sequence Number
GFSK Gaussian Frequency Shift Keying
HCCA Hybrid Coordination Function Channel Access
HUMAN High-Speed Unlicensed Metropolitan Area Network
IFFT Inverse Fast Fourier Transform
ISM Industrial, Scientific, and Medical
IP Internet Protocol
IV Initialization Vector
LAN Local Area Network
LLC Logical Link Control
LOS Line-Of-Sight
MAC Medium Access Control Layer
MAN Metropolitan Area Network
MIB Management Information Base
MIMO Multiple Input Multiple Output
MPEG Moving Pictures Experts Group
MPDU MAC Protocol Data Unit
MSDU MAC Service Data Unit
NLOS Non-Line-Of-Sight
nrtPS Non-Real-Time Polling Service
OFDM Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OFDMA Orthogonal Frequency Division Multiple Access
OSI Open Systems Interconnection
PCF Point Coordination Function
PDU Protocol Data Unit
PHY Physical Layer
PKM Privacy Key Management
PIFS PCF Inter-Frame space
PtMP Point-To-Multipoint

PtP Point-To-Point
PS Physical Slot
QAM Quadrature Amplitude Modulation
QoS Quality Of Service
QPSK Quadrature Phase-Shift Keying
RS Reed–Solomon
RSS Receive Signal Strength
RSSI Receive Signal Strength Indicator
RTS Request to Send
rtPS Real-Time Polling Service
SA Security Association
SAID Security Association Identifier
SDU Service Data Unit
SF Service Flow
SIFS Short Interframe Space
SNMP Simple Network Management Protocol
SNR Signal-To-Noise Ratio
SS Subscriber Station
SSID Subscriber Station Identification (dirección MAC)
STA Station
TCS Transmission Convergence Sublayer
TCP Transmission Control Protocol
TDD Time Division Duplex Or Duplexing
TDM Time Division Multiplexing
TDMA Time Division Multiple Access
UDP User Datagram Protocol
UGS Unsolicited Grant Service
UL Uplink
VC Virtual Channel
VCI Virtual Channel Identifier
VLAN Virtual Local Area Network
WEP Wired Equivalent Privacy
WiFi Wireless Fidelity
WiMAX Worldwide Interoperability for Microwave Access
WirelessMAN Wireless Metropolitan Area Networks
WirelessHUMAN Wireless High-speed Unlicensed Metropolitan Area Networks
WLAN Wireless Local Area Network
WMAN Wireless Metropolitan Area Network
WPA Wi-Fi Protected Access

Parte I:

Introducción

Cuando por los años no puedas correr, trote.

Cuando no puedas trotar, camina.

Cuando no puedas caminar, usa el bastón.

Pero nunca te detengas!!!

Madre Teresa de Calcuta (1910-1997)

Capítulo 1

Introducción

1 Introducción

1.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROYECTO

El presente documento, como Proyecto De Fin de Carrera (en adelante PFC), describe el trabajo de estudio y análisis de tecnologías inalámbricas de telecomunicaciones para en la implementación de redes de largo alcance. Este proyecto se presenta como un estudio de viabilidad técnico y económico de migrar una red de actual funcionamiento en tecnologías implementadas sobre estándares IEEE802.11 (WiFi) a una alternativa tecnológica más robusta como las implementaciones en estándares IEEE802.16 (WiMAX).

Lo anterior se realiza mediante la presentación de ejemplos de funcionamiento en esta nueva alternativa, planteando así un posible rediseño técnico y económico de la red “*WILLAY Cusco*”, que está enmarcada dentro del *Programa Willay* [WILLAY]. Además de ofrecer una clara comparativa en estas tecnologías, las ventajas y desventajas de cada una de ellas y de lo que supondría una migración tecnológica.

El *Programa Willay* propone el uso de sistemas de tecnología de información y comunicaciones (TIC) en la mejora de la gestión pública de zonas rurales y el acceso a infraestructura de bajo costo, promoviendo las TIC como herramientas para mejorar la gobernabilidad en instituciones públicas municipales y del sector de salud y educación.

Para dicho propósito, el programa se desarrolla en 2 líneas de intervención:

- Acciones directas de fortalecimiento institucional de acceso a redes de telecomunicación de bajo coste.
- Acciones de fortalecimiento de capacidades en TIC en actores claves para la difusión de soluciones tecnológicas apropiadas.

En estos momentos la red *WILLAY-Cusco* esta operativa desde hace 2 años, implementada con el estándar IEEE802.11a [IEEE11a] en frecuencias libres de 5.8 GHz. Pero, también se conoce las limitaciones de esta tecnología, por lo que se ha planteado el cambio de técnica de comunicación inalámbrica. Este PFC se centra en el estudio de una de las alternativas tecnológicas claras para este escenario IEEE802.16d [IEEE16d] versión fija del estándar para esta red, planteando las ventajas de su implementación y coste.

Este proyecto se encuentra dentro del Programa de Becas para Proyectos de Fin de Carrera para el Desarrollo (PFCD) de la Universidad Politécnica de Madrid, realizado en el Grupo de Telecomunicaciones Rurales (GTR) de la Universidad Católica del Perú, en Lima.

Para la realización y desarrollo del presente PFC, he visitado las instalaciones de Willay en Cusco (Perú), se ha tenido implicación directa con los beneficiarios de la red. He monitoreado

desde las instalaciones de la empresa encargada del despliegue en Lima las estaciones base de una red instalada en la zona rural de Cerro de Pasco (Perú).

Adicionalmente y como parte de formación participé en talleres de tecnologías de redes e internet para América Latina y el Caribe (WALC 2009) en Bogotá, Colombia; y en el Foro TIC y Gobiernos Locales: Contribución de las TIC en el proceso de descentralización, Gobernabilidad y Desarrollo Rural, en Cusco, organizado por el Centro de Investigaciones y comunicaciones Rurales (CEDITER) e Ingenieros sin Fronteras (ISF).

El resultado de lo expuesto anteriormente es un proyecto de fin de carrera que analiza y estudia la parte técnica de las comunicaciones inalámbricas en escenarios aislados, las compara y obtiene conclusiones, preocupándose del impacto en el desarrollo humano y tecnológico que éste tiene.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 OBJETIVO GENERAL

Mejora de las redes de comunicaciones inalámbricas en zonas rurales de América Latina para dar soporte a los sectores de salud, de educación y de gobierno en localidades rurales del Perú.

1.2.2 OBJETIVO ESPECÍFICO

El objetivo de este PFC es determinar que la migración a tecnologías basadas en estándares IEEE802.16 (WiMAX) son viables en la actualidad tanto técnica como económicamente. Planteando el concepto de tecnología apropiada para un escenario rural con mejoras claras de aplicaciones y prestaciones de la red.

Durante el desarrollo del diseño de la red en WiMAX el objetivo es estudiar la comparativa entre las dos tecnologías (WiFi y WiMAX) analizando una serie de parámetros comunes a cualquier escenario y que será de ayuda a la hora de decir qué tecnología es más apropiada según las necesidades de la red.

1.3 FASES DEL DESARROLLO

El desarrollo del proyecto se divide en varias fases:

1. Documentación y estudio de estándares
 - a. IEEE802.11: enmiendas a/b/g y la legislación vigente en el país de aplicación, Perú.

- b. IEEE802.16: enmiendas d-2004/e-2005 y legislación vigente en Perú. *Durante el desarrollo de este PFC fue aprobada la enmienda 2009, que se ha incluido en este proyecto.*
2. Estudio del diseño actual de la red Willay-Cusco.
3. Búsqueda de equipos y fabricantes disponibles en el mercado de WiMAX.
4. Redes en funcionamiento en WiMAX fijo en Perú, Sudamérica y el mundo, haciendo especial mención a países emergentes.
5. Análisis y estudio (económico y técnico) de equipos WiMAX para la red de estudio y escenario.
6. Estimación de costes de los equipos de telecomunicación necesarios para la implementación de la red.
7. Desarrollo de la memoria.

1.4 ESTRUCTURA DE LA MEMORIA

1.4.1 Parte I: Introducción

Corresponde al primer capítulo de la memoria y pretende dar una idea general sobre los objetivos que persigue este PFC así los pasos dados para la consecución de los mismos.

1.4.2 Parte II: Estado de Arte

Esta parte está formada por los capítulos 2, 3, 4 y 5 los cuales desarrollas toda la teoría referente a las tecnologías utilizadas en este proyecto.

El capítulo 2 corresponde a una breve introducción general a los estándares del IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*). Los capítulos siguientes 3 y 4 introducen los estándares IEEE802.11 y IEEE802.16 respectivamente, así como las situaciones actuales de los mismos, para continuar con el diseño y análisis de estas tecnologías dentro de un escenario conocido.

Por último el capítulo 5 presenta un análisis DAFO teórico de ambas tecnologías, se considera pertinente este análisis al posterior del trabajo realizado.

Con lo anterior, se pretende que este PFC sea capaz de dotar al lector, de conocimientos fundamentales sobre ambas tecnologías mediante su comparativa y aplicaciones prácticas, no siendo necesario que el lector sea un experto en cualquiera de las dos técnicas de telecomunicación utilizadas.

1.4.3 Parte III: Descripción del trabajo realizado

Consta de los capítulos 6, 7 y 8 donde se describe el trabajo realizado para la Red Willay Cusco, el estudio de la red de Cerro de Pasco y las conclusiones del trabajo realizado respectivamente.

El capítulo 6 consiste en un análisis, decisión y diseño de la red con WiMAX incluyendo el coste económico que supondría el cambio tecnológico. Este capítulo incluye la situación actual de la red, el diseño en el estándar IEEE802.16-2004 (se implementa en equipos actualmente), una tabla comparativa con de las tecnologías de la anterior, la propuesta y un estudio de situación económica, en concreto en este último apartado se pretende dar una idea del estado del mercado actual de WiMAX.

En el capítulo 7 se presenta como caso de estudio la red de Cerro de Pasco (Perú) desplegada por la empresa peruana *GAMACOM S.A* operativa con WiMAX, incluyendo un análisis de la configuración de la red.

Por último en el capítulo 8 de incluyen las conclusiones del trabajo realizado.

1.4.4 Parte IV: Conclusiones y Líneas Futuras

Esta parte está formada por los capítulos 9 y 10. El primero de ellos constituye la última parte de la memoria, y presenta las conclusiones y/o recomendaciones obtenidas a lo largo del desarrollo del presente PFC. Además de incluir la influencia de este PFC en el ámbito de cooperación para el desarrollo tanto tecnológico como humano local, y su aporte a los Objetivos del Milenio para el Desarrollo (OMD's) en el ámbito internacional.

1.4.5 Parte V: Anexos y Referencias

Consta de los capítulos 11 y 12 de Anexos y Referencias, respectivamente.

Se incluye 3 anexos a este PFC. El primero de ellos correspondiente a las hojas de características de algunos equipos WiMAX. El segundo anexo son apuntes necesarios correspondientes a capa MAC y tramas del estándar IEEE802.16.

Por último, se muestra una tabla resumen con los precios públicos y estimados que se han manejado de equipos WiMAX en los últimos 5 años.

Parte II:

Estado del Arte

*Communiquer est un don naturel,
cultivons-le*

France Telecom (2010)

Capítulo 2

Estándares de Red IEEE

2 Estándares de IEEE

2.1 OBJETIVO

El objetivo de este apartado será conocer de forma detallada los estándares de IEEE centrándonos en los estándares de redes inalámbricas IEEE802.11 e IEEE802.16, cuáles son sus definiciones y el área en la que se desarrollan.

2.2 DESARROLLO

El *Institute of Electrical and Electronic Engineers* (IEEE), es la mayor asociación profesional que fomenta la innovación y excelencia tecnológica que beneficia a la sociedad de la información en general. IEEE y sus miembros están inspirados en una comunidad global de innovación para un mejor futuro tecnológico, por medio de sus publicaciones, conferencias, estándares tecnológicos, y actividades tanto profesionales como educativas. IEEE es la “voz” de referencia en el mundo de la ingeniería, computación y tecnologías de la información [IEEE09].

El proyecto 802 del IEEE es un comité y grupo de estudio de estándares, que actúa sobre Redes de Ordenadores, concretamente y según su propia definición sobre redes de área local (LAN) y redes de área metropolitana (MAN).

La Figura 1 muestra un esquema sobre la estructura de la familia de estándares del IEEE.

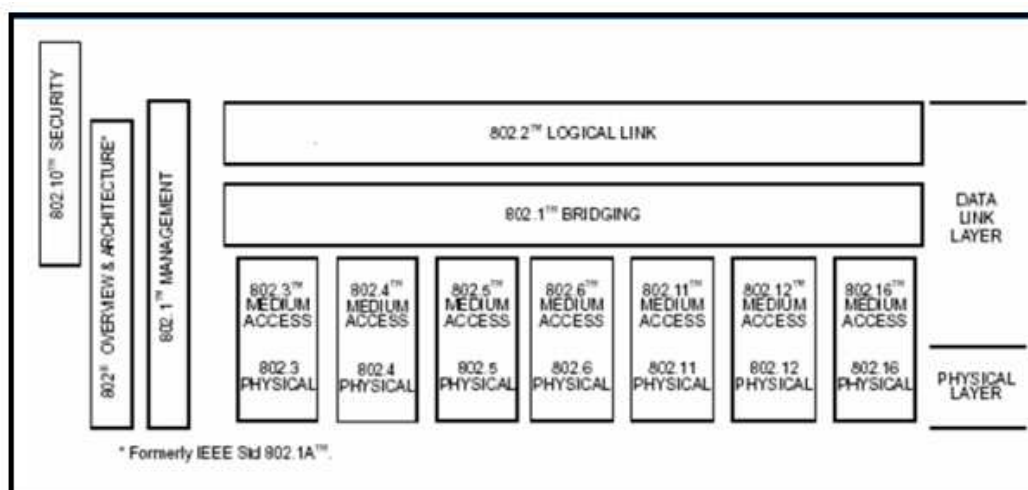


Figura 1. Familia de estándares 802 del IEEE

También conocido como IEEE802 para referirse a los estándares que proponen y algunos de los cuales son muy conocidos ETHERNET (IEEE802.3), WiFi (IEEE802.11), WiMAX

(IEEE802.16), estos dos últimos son los que nos ocuparan en apartados posteriores y en los que el presente Proyecto de Fin de Carrera se fundamenta.

A continuación resumiremos algunos de ellos:

- **802.1 Definición Internacional de Redes.** Fue creada para el control de Admisión en Red basada en puertos. Permite la autenticación de equipos conectados a un puerto LAN. Con esto se elimina el acceso no autorizado a la red al nivel de la capa de enlace de datos.
- **802.2 Control de Enlaces Lógicos.** Define el protocolo de control de enlaces lógicos (LLC) del IEEE, el cual asegura que los datos sean transmitidos de forma confiable por medio del enlace de comunicación. El LLC provee servicios como: orientado a la conexión, reconocimiento orientado a conexiones, conexión sin reconocimiento.
- **802.3 Redes CSMA/CD.** El más relevante de la familia gracias a su enorme difusión a nivel mundial, también conocido como *ETHERNET*. El estándar 802.3 del IEEE que define cómo opera el método de Acceso Múltiple con Detección de Colisiones (CSMA/CD) sobre varios medios. El estándar define la conexión de redes sobre cable coaxial, cable de par trenzado, y medios de fibra óptica. La tasa de transmisión original es de 10 Mbps, pero nuevas implementaciones transmiten por encima de los 100 Mbps calidad de datos en cables de par trenzado.
- **802.6 Redes de Área Metropolitana (MAN).** Define un protocolo de alta velocidad donde las estaciones enlazadas comparten un bus dual de fibra óptica usando un método de acceso llamado Bus Dual de Cola Distribuida (DQDB). El bus dual provee tolerancia de fallos para mantener las conexiones si el bus se rompe. El estándar MAN está diseñado para proveer servicios de datos, voz y vídeo en un área metropolitana de aproximadamente 50 km a tasas de 1.5, 45, y 155 Mbps.
- **802.7 Grupo Asesor Técnico de Anchos de Banda.** Este comité provee consejos técnicos a otros subcomités en técnicas sobre anchos de banda de redes.
- **802.8 Grupo Asesor Técnico de Fibra Óptica.** Provee consejo a otros subcomités en redes por fibra óptica como una alternativa a las redes basadas en cable de cobre. Los estándares propuestos están todavía bajo desarrollo.
- **802.9 Redes Integradas de Datos y Voz.** El grupo de trabajo del IEEE 802.9 trabaja en la integración de tráfico de voz, datos y vídeo para las LAN 802 y Redes Digitales de Servicios Integrados (ISDN's). Los nodos definidos en la especificación incluyen teléfonos, computadoras y codificadores/decodificadores de vídeo (códecs). La especificación ha sido llamada Datos y Voz Integrados (IVD).
- **802.10 Grupo Asesor Técnico de Seguridad en Redes.** Se refiere a Mecanismos de seguridad y confidencialidad en LAN. Este grupo trabaja en la definición de un modelo normalizado de seguridad que opera sobre una variedad de redes e incorpora métodos de autenticación y cifrado.
- **802.11 REDES INALÁMBRICAS.** Red local inalámbrica también conocido comercialmente como Wi-Fi. Este comité define estándares para redes inalámbricas, trabajan en la estandarización de medios como el radio de espectro de expansión, radio de banda

angosta, infrarrojo, y transmisión sobre líneas de energía. Dos enfoques para redes inalámbricas se han planeado. En el *enfoque distribuido*, cada estación de trabajo controla su acceso a la red. En el *enfoque de punto de coordinación*, un hub central enlazado a una red cableada controla la transmisión de estaciones de trabajo inalámbricas. Algunas de sus versiones son:

- 802.11a: trabaja en 5Ghz y utiliza OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*), con una velocidad máxima de 54Mbps.
 - 802.11b: velocidad máxima de transmisión de 11Mbps utiliza método de acceso, CSMA/CA, definido en el estándar.
 - 802.11g: opera en 2,4GHz, al igual que *b*, pero su velocidad máxima es de 54Mbps. Compatible con el estándar *b* y trabajan a las mismas frecuencias.
 - 802.11e. versión del estándar en la que se define QoS (*Quality of Service*).
 - 802.11n: nueva versión del estándar en la cual su nueva velocidad de transmisión podría llegar a los 500Mbps.
-
- **802.12 Prioridad de Demanda (100VG-ANYLAN).** Este comité está definiendo el estándar Ethernet de 100 Mbps. Con el método de acceso por *Prioridad de Demanda* propuesto por Hewlett Packard y otros vendedores. El cable especificado es un par trenzado de 4 alambres de cobre y el método de acceso por *Prioridad de Demanda* usa un hub central para controlar el acceso al cable. Hay prioridades disponibles para soportar envío en tiempo real de información multimedia.
 - **IEEE 802.15 Wireless Personal Area Networks, WPAN.** Es un grupo especializado en redes inalámbricas de área personal. Los estándares que desarrolla definen redes tipo PAN o HAN, centradas en las cortas distancias. Al igual que Bluetooth o ZigBee. Este grupo permite que dispositivos portátiles como PC, PDA's, teléfonos, sensores y actuadores utilizados en domotica, entre otros, puedan comunicarse e interoperar.
 - **IEEE 802.16 ACCESO INALÁMBRICO DE BANDA ANCHA.** Se trata de una especificación para las redes de acceso en áreas metropolitanas (MAN) inalámbricas de banda ancha fijas (802.16d) publicada inicialmente el 8 de abril de 2002. Proporciona accesos concurrentes en áreas de hasta 48 km de radio con velocidades de hasta 70Mbps, utilizando tecnología portátil LMDS.
En esencia recoge el estándar *de facto* **WiMAX**. El estándar actual es el IEEE 802.16-2009, aprobado en Junio de 2009, sustituyendo a los anteriores 802.16d y 802.16e versiones fija y móvil respectivamente. El estándar 802.16 ocupa el espectro de frecuencias ampliamente, usando las frecuencias desde 2 hasta 11 GHz para la comunicación de la última milla (de la estación base a los usuarios finales).
 - **IEEE 802.20 Acceso Inalámbrico de Banda Ancha Móvil.** Es un estándar para redes wireless de banda ancha basadas en servicios IP móviles y pretende ser una especificación de los sistemas móviles de 4ª generación. El 11 de diciembre de 2002, el IEEE Standard Board aprobó el establecimiento del grupo de trabajo IEEE 802.20 para el desarrollo de este sistema denominado genéricamente: *Mobile Broadband Wireless Access (MBWA)*.
La misión de IEEE 802.20 es desarrollar la especificación de la capa física (PHY) y la capa MAC de un interfaz de aire basado en conmutación de paquetes y optimizado para el transporte IP.

- **IEEE 802.22 Red Inalámbrica de Área Regional.** Se dedica a desarrollar un estándar basado en capa física y MAC e interfaz de aire para el empleo de dispositivos exentos de licencia sobre una base no-intrusa en el espectro que es asignado al Servicio de Difusión de TV.

Entre todos estos estándares cabe destacar al 802.3 (Ethernet) el cual es el estándar dominante en las tradicionales redes locales cableadas (LAN – *Local Access Network*). Las redes inalámbricas al contrario que las cableadas utilizan las ondas electromagnéticas para la comunicación de los equipos que las integran.

Las redes inalámbricas ofrecen una serie de ventajas frente a las cableadas, entre ellas lo rápido y sencillo que puede ser su implantación, además del incremento de movilidad que éstas suponen. Lo que se traduce en facilidad para el usuario, permitiéndole a éste incorporarse, funcionar y salir de la red tanto como sea necesario de forma sencilla.

Es importante fijarse que la infraestructura de las redes inalámbricas son reducidas notablemente con respecto a las cableadas, lo que se traduce en robustez a situaciones temporales adversas y de fácil traslado.

Las redes inalámbricas se clasifican en WLAN-Redes de Área Local y WMAN-Redes de Área Metropolitana. El primer grupo se refieren a redes habitualmente privadas en un entorno reducido, siendo el segundo muy parecido a estas pero proporcionan servicio a áreas más extensas. Estas redes deben cumplir estándares genéricos aplicables también a las cableadas pero con especificaciones adicionales que definan la utilización del espectro y aseguren la comunicación entre los equipos. Con estos objetivos se definieron estándares como IEEE802.11-1999 y IEEE802.16-2004 comercialmente conocidos como Wi-Fi y WiMAX, respectivamente.

IEEE802.11 [WirelessNet] se ha convertido en el dominante de las redes WLAN. Tal y como se presentara en apartados posteriores han sido y siguen siendo muchos los trabajos en estándares para lograr un estándar que domine las WMAN, en este camino se desarrolla el estándar IEEE802.16 [FundWMX07], comercialmente conocido como WiMAX, diseñado para proporcionar acceso inalámbrico de banda ancha teniendo como prioridad y parámetro necesario para la certificación, la compatibilidad e interoperabilidad entre equipos y fabricantes.

En los próximos capítulos del presente Proyecto de Fin de Carrera se estudiarán los estándares IEEE802.11 e IEEE802.16, enfocándonos en aspectos que los diferencia desde su aplicabilidad a conexiones de largas distancias en entornos rurales y zonas aisladas.

Capítulo 3

IEEE802.11 - WiFi

3 IEEE802.11 - WiFi

3.1 INTRODUCCIÓN

Desde hace más de 10 años el mundo ha evolucionado de forma vertiginosa a un mundo móvil. La necesidad de la sociedad de comunicarse cada vez de forma más y más rápida ha contribuido al crecimiento global y robusto de las comunicaciones inalámbricas.

La pregunta es por qué inalámbrica y no de forma cableada, drásticamente reducida desde la existencia de estándares como IEEE802.11 o IEEE802.16. La respuesta es sencilla la versatilidad de las redes y el coste que supone la implementación de tecnologías como WiFi son los principales responsables de que las comunicaciones inalámbricas de banda ancha tengan el éxito actual.

Desde el principio, cuando aparecieron las redes de ordenadores, se han buscado las posibilidades de interconectar equipos de entorno cercano (Oficina, mismo edificio, campus, casa...), de manera que sean posibles comunicaciones rápidas, seguras, estables y flexibles entre ellos. Las redes así definidas se llaman redes de área local, LAN (Local Area Network) y además si son inalámbricas se denominan WLAN (Wireless Local Area Network). En estas redes las distancias de los equipos suelen ser entorno a decenas o centenares de metros.

Por otro lado, cuando se trata de equipos dispersos en toda una población se habla de redes metropolitanas, MAN (*Metropolitan Area Network*), y si la red cubre más allá de estos límites se habla de redes de área extensa, WAN (*Wide Area Network*).

La Figura 2, es un diagrama de estándares americanos y europeos para los distintos tipos de redes según su extensión.

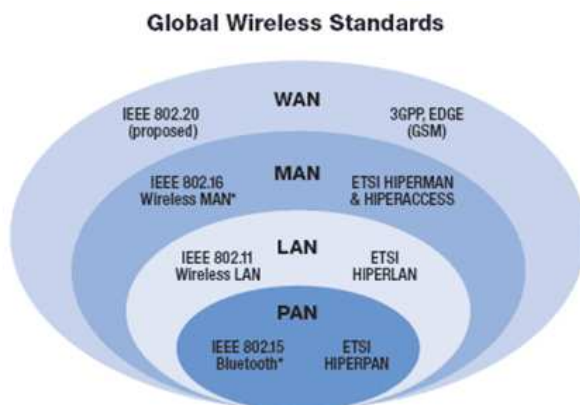


Figura 2. Estándares de ETSI (Europa) y IEEE (Norte América) para redes inalámbricas

Continuando con un poco de historia, un grupo de ingenieros de IBM en Suiza, publicó los resultados de un experimento en 1979, donde utilizaban rayos infrarrojos (IR) para crear una red local en una fábrica. Estos resultados fueron publicados por el IEEE, se puede decir que esto fue el origen de las LAN inalámbricas (WLAN).

Las investigaciones siguieron adelante con IR pero además con microondas, donde se utilizaban espectro expandido, SS (*Spread Spectrum*). En mayo de 1985, la FCC (*Federal Communications Commission*) de Estados Unidos, encargada de regular y administrar las telecomunicaciones, asignó las bandas ISM (*Industrial, Scientific and Medical*) en las bandas 902-928MHz, 2,400-2,4835GHz y 5,725- 5,850GHz; para uso de las redes inalámbricas basadas en SS, con las opciones de DS (*Direct Sequence*) y FH (*Frequency Hopping*). Esta asignación propicio mayor actividad en el entorno de industria, este primer paso fue un gran avance para que las WLAN se abrieran paso en el mercado.

Las investigaciones continuaron, en 1991 se publican varios trabajos de WLAN operativas que ya superaban el 1Mbps (mínimo establecido por el estándar).

En 1997 el IEEE se publica el estándar **IEEE802.11** dedicado a las **WLAN**, definiendo las capas física, de enlace y control de acceso al medio en las redes inalámbricas de banda ancha basadas en SS.

En 1999, un grupo de emprendedores se unieron para formar una organización sin fin de lucro, con el objetivo de asegurar la compatibilidad e interoperabilidad de los distintos dispositivos fabricados según este estándar, esta organización es *WiFi-Alliance* [WIFIALI]. El programa de certificación, Wi-Fi (*Wireless Fidelity*), de equipos que seguían el estándar IEEE802.11, comenzó en marzo de 2000.

Las ventajas de estas redes inalámbricas son numerosas, su precio y flexibilidad son quizá las más importantes, pero también su gran desventaja es que consumen espectro inalámbrico, que es un recurso limitado además de proveer de un ancho de banda mucho menor que las redes cableadas, especialmente cuando el número de usuarios empieza a ser elevado.

WiFi ha tenido un gran éxito comercial como complemento de las redes cableadas, pero de ninguna manera puede remplazar a estas [REDINAL].

3.2 ARQUITECTURA DE RED

La red 802.11 está formada básicamente por cuatro componentes, se resumen en la Figura 3:

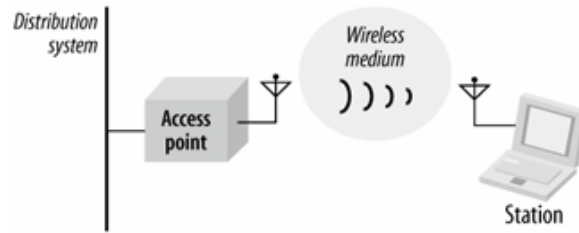


Figura 3. Componentes de LAN's 802.11 [WirelessNet]

- **Sistema de Distribución (DS-Distribution System):** está definido para asociar varios puntos de acceso que forman un área de cobertura mayor. Es un componente lógico de 802.11 usado para encaminar paquetes a sus destinos. En el estándar no se especifica ninguna tecnología particular para el DS pero es una estructura que se toma en cuenta para direccionar tramas a través de él como si de un *backbone* se tratase.
- **Punto de acceso (AP-Access Point):** de interface entre la red 802.11 hacia el mundo. Actúan de puentes entre la red inalámbrica y la cableada, para comunicar estaciones que están conectadas al AP.
- **Medio inalámbrico (Wireless medium):** es el medio que el estándar usa para trasladar los paquetes de una estación (STA o AP) a otra (STA o AP).
- **Estaciones (STA-Station):** son todos los dispositivos con interfaces inalámbricos. Ej. Ordenadores, PDA's, teléfonos inalámbricos...etc, que utilicen una red WiFi para transferir datos entre ellos y comunicarse.

Una de las operaciones básicas de las redes 802.11 es el Grupo de Funcionamiento Básico o *BSS (Basic Service Set)*, que consiste en un grupo de estaciones que se comunican entre sí. El área donde se comunican es determinada y está definida por las características de propagación del medio inalámbrico.

De esta idea de BSS surgen una serie de alternativas y modos de comunicación:

- **BSS independiente (IBSS, "Independent Basic Service Set").** Las estaciones se comunican directamente entre ellas sin ningún intermediario, es decir no hay un sistema de distribución, por tanto, no tiene conexión con otras redes.
 - **Modo Ad-hoc.** Es una variante del *IBSS* en el cual no hay punto de acceso. Las funciones de coordinación son asumidas de forma aleatoria por una de las estaciones presentes. El tráfico de información se lleva a cabo directamente entre los dos equipos implicados. La cobertura se determina por la distancia máxima entre dos equipos, la cual suele ser apreciablemente inferior a los modos en que hay un punto de acceso.
- **Modo infraestructura.** El AP realiza las funciones de coordinación. Todo el tráfico tiene que atravesarlo, por lo que hay una clara pérdida de eficiencia cuando dos estaciones dentro de un mismo BSS desean comunicarse entre sí (los paquetes de información son enviados una vez al AP y otra vez al destino).

Es una arquitectura apropiada cuando la mayor parte del tráfico se origina o finaliza en las redes exteriores a las cuales está conectado el punto de acceso. Es el modo que se emplea habitualmente para conectar una red inalámbrica con redes de acceso a Internet (ADSL –“Asymmetrical Digital Subscriber Line”- , RDSI –Red Digital de Servicio Integrados-,...) y redes locales de empresa.

- **BSS extendido (ESS, “Extended Service Set”)**. Es un caso específico del modo infraestructura, representado por un conjunto de BSS asociados mediante un sistema de distribución. Esto permite una serie de prestaciones avanzadas opcionales como el roaming entre zonas de cobertura (Figura 4).

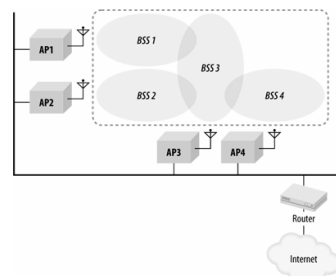


Figura 4. Servicio Extendido (ESS)

Los tipos anteriores se muestran en la Figura 5:

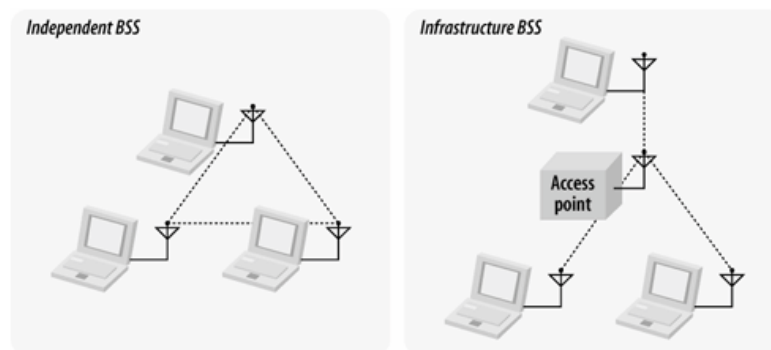


Figura 5. Tipos de BSS's [WirelessNet]

Una red WiFi se suele caracterizar por un identificador llamado (*SSID-Service Set Identifier*), que consiste en una cadena de 32 caracteres.

El estándar IEEE802.11 especifica los denominados *servicios* asociados a los distintos elementos de la arquitectura. Los fabricantes de equipos pueden implementar estos servicios de la forma que quieran. Existen 9 servicios de red especificados en el estándar, solo tres de ellos son usados para datos, los siguientes seis son operaciones de gestión que permiten a la red seguir el rastro de los nodos y de la entrega de tramas.

Estos servicios se pueden dividir en dos categorías:

- **SS (Station Service):** aquellos servicios que son parte de todas las estaciones (incluyendo AP's):
 1. **Autenticación:** proporciona el control sobre el acceso a la LAN, es invocado por cada STA para establecer su identidad frente al resto de estaciones con las que desea comunicarse. Es un servicio que puede darse en múltiples ocasiones durante la conexión de la STA hacia la WLAN.
 2. **Desautenticación:** es utilizado cuando se desea terminar con la relación de autenticación existente.
 3. **Privacidad:** es usado para incrementar la privacidad de las tramas en una red WiFi acercándose a la de una red cableada. El estándar proporciona mediante este servicio capacidad de encriptar el contenido.
 4. **Entrega de tramas MSDU (MAC Service Data Unit):** es invocado para la entrega de este tipo de tramas en la misma BSS.

- **DSS (Distribution System Service):** los servicios que son parte de un DS, accedidos vía AP:
 1. **Asociación:** la entrega de mensajes entre STA's es posible porque las estaciones están registradas o asociadas con un AP. El DS puede usar la información de registro para determinar que AP usar para cada STA.
 2. **Desasociación:** es invocado cuando una STA quiere dar por terminada su asociación con un determinado AP.
 3. **Distribución:** es el principal servicio utilizado por las estaciones del IEEE802.11. Lo utilizan las estaciones de una red tipo infraestructura cada vez que se envían datos. Se usa el DS para entregar las tramas a su destino. Todas las comunicaciones que usan un AP pasan a través del DSS, incluso las comunicaciones entre dos estaciones con el mismo AP.
 4. **Integración:** es un servicio del DS, que permite la conexión de sistemas DS's hacia una red que no sea IEEE802.11. Es el responsable de hacer todo lo necesario para entregar mensajes de la WLAN a cualquier equipo de la red integrada .
 5. **Reasociación:** La asociación es suficiente para la entrega de las tramas entre estaciones WiFi que no realicen cambios entre distintas BSS, sin embargo es necesario la funcionalidad de este servicio para dar soporte a la movilidad entre BSS.

Cada servicio esta soportado por uno o más mensajes a nivel MAC. Información en detalle lo encontramos en el *Apto. 5.7 "Message information contents that support the services"* del estándar (IEEE802.11_2007).

La Figura 6, resume todos los servicios de IEEE802.11 explicados anteriormente:

Servicio	Servicio de Estación SS o de Distribución-DSS	Descripción
Distribución	DSS	Usado en la entrega de tramas hacia un destino específico en redes de infraestructura.
Integración	DSS	Entrega de tramas de una red IEEE802.11 hacia fuera de la WLAN.
Asociación	DSS	Usado para establecer el AP que servirá de <i>gateway</i> hacia una STA particular.
Reasociación	DSS	Usado para cambiar el AP que servirá de <i>gateway</i> hacia una STA particular.
Desasociación	DSS	Terminar la asociación con el AP
Autenticación	SS	Establece la identidad de la STA (dirección MAC) para establecer una asociación.
Desautenticación	SS	Usado para terminar la autenticación existente.
Privacidad	SS	Da protección contra "espías"
Entrega de tramas MSDU	SS	Entrega de tramas hacia su destino

Figura 6. Resumen de servicios en IEEE802.11

Llegados a este punto es necesario conocer, aunque sea de forma ligera, el modelo de torre OSI (*Open System Interconnection*). Este modelo jerárquico que describe una arquitectura normalizada de protocolos, las funciones están divididas en siete niveles (capas), Figura 7:

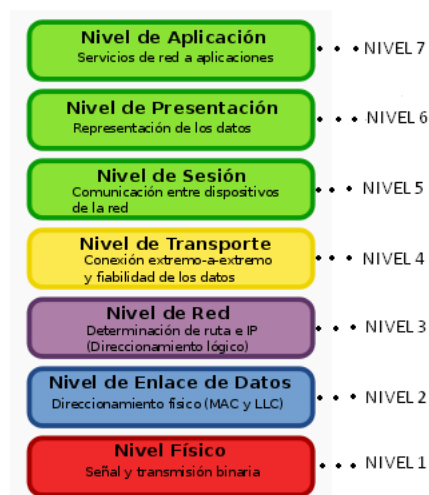


Figura 7. Modelo OSI (pila)

El estándar IEEE802.11 como todos los de la familia IEEE802, define los protocolos de la capa física (PHY) y la del control de acceso al medio (MAC), estos coinciden parcialmente con los dos primeros niveles de la capa OSI (Figura 7) niveles físico y de enlace. El nivel físico es el inicial de la torre y trabaja con señales de radio e impulsos eléctricos, proporciona a las capas superiores servicio de transmisión y recepción de flujo de bits.

El nivel 2 se encarga de que el físico sea seguro además de proporcionar medios para activar, mantener y desactivar el enlace. También se encarga del acceso al medio compartido, pero su función más importante es la detección de errores y el control de flujo ofrecido a las capas superiores. Este nivel se puede dividir en dos subniveles: MAC (*Medium Access Control*),

encargado del control de acceso de los datos que se transmiten, y LLC (*Logical Link Control*) el que es responsable de la sincronización de las tramas, el control de flujo y control de errores.

Todas las versiones del estándar definen distintas técnicas de transmisión a nivel físico pero todos tienen la misma capa MAC. Con la definición de los mismos niveles de PHY y MAC que en Ethernet, se logran los mismos aspectos de funcionalidad externos en las redes WiFi que en el caso cableado, por lo que cualquier aplicación LAN funcionara en una WLAN de la misma forma que en una Ethernet.

3.3 ESTÁNDAR 802.11

El estándar IEEE802.11 fue aprobado en 1997 donde se permitía trabajar con velocidades de transmisión de 1Mbps y 2Mbps. Desde entonces el estándar fue establecido hasta la actualidad han sido muchos los grupos de trabajo creados para mejorar las deficiencias existentes en primeras versiones, además de mejorar algunas de sus prestaciones.

- IEEE802.11a – Estándar para operar redes inalámbricas en la banda de 5GHz con tasas de transmisión de datos de hasta 54Mbps.
- IEEE802.11b – Estándar para operar redes inalámbricas en la banda de 5GHz con tasas de transmisión de datos de hasta 11Mbps.
- IEEE802.11c – Especifica métodos para la conmutación inalámbrica. Para conectar diferentes tipos de redes mediante puentes inalámbricos.
- IEEE802.11d – Extensión para la armonización del IEEE802.11 en los distintos países.
- IEEE802.11e – Extensión para proporcionar QoS a las redes IEEE802.11a/g/b.
- IEEE802.11f – Extensión para asegurar la interoperabilidad de los AP de los distintos proveedores. Define el IAPP (*Inter Access Point Protocol*), *protocolo interno entre AP's*.
- IEEE802.11g – estándar para incrementar las tasas de transmisión de datos en la banda de 2,4GHz hasta los 54Mbps.
- IEEE802.11h – Extensión para adecuarse a los requisitos de los elementos reguladores europeos en la banda de los 5GHz. Sus dos diferencias fundamentales de IEEE802.11a son la selección dinámica y la potencia de transmisión variable, obligatorias en el mercado europeo según normas del Instituto Europeo de Estándares de Comunicación (ETSI).
- IEEE802.11i – Extensión para incrementar la seguridad en las redes WiFi.
- IEEE802.11j – Es equivalente a 802.11h, en la regulación japonesa.
- IEEE802.11k – Intercambio de información de capacidad entre clientes y puntos de acceso. Está diseñada para ser implementada en software.
- IEEE802.11n Nueva generación de WLAN que introduce MIMO y algunas otras mejoras en la capa física para obtener tasas de transferencia superiores a 100Mbps. Estándar ratificado y aprobado en septiembre 2009.

- IEEE802.11p (en desarrollo) WAVE (*Wireless Access for the Vehicular Environment*), para ambulancias y coches de pasajeros. Las previsiones de publicación son hasta Noviembre 2010.
- IEEE802.11r Publicado en Julio 2008 – “Roaming” rápido entre equipos inalámbricos.
- IEEE802.11s (en desarrollo) – Áreas de servicio extendidas con redes Mesh. Aunque en este sentido cada fabricante tiene sus propios mecanismos de generación de mallas.
- IEEE802.11u (en desarrollo) – interconexión con redes no 802, por ejemplo redes de telefonía celular. Las previsiones de publicación son hasta Marzo 2010.
- IEEE802.11v (en desarrollo) – Gestión de redes inalámbricas. Prevista para este año (2010) para permitir la configuración remota de los dispositivos cliente.
- IEEE802.11w Aprobado 2009 – Incrementa la seguridad en la gestión de tramas protegidas.
- IEEE802.11y Publicada en noviembre 2008– Extensión para USA, permite operar en banda 3650 a 3700MHz.

IEEE802.11-2007 es una agrupación de *802.11-199/a/b/d/g/h/i/j y e*, siendo esta la última versión del estándar IEEE802.11 (el que en la actualidad sirve de referencia).

Como se ha comentado en el apartado anterior (3.2 ARQUITECTURA DE RED), todos los estándares de la familia IEEE802 definen los protocolos de la capa física (PHY) y de control de acceso al medio (MAC). Estos coinciden con los niveles más bajos del modelo OSI. El nivel físico se divide en dos subcapas: *PLCD (Physical Layer Convergence Procedure)* y *PMD (Physical Medium Dependent)*. El nivel de enlace en IEEE802.11 se divide en: *MAC (Medium Access Control)* y *LLC (Logical Link Control)*, ambos casos se presentan en la Figura 9, además de una comparativa con los niveles del modelo OSI.

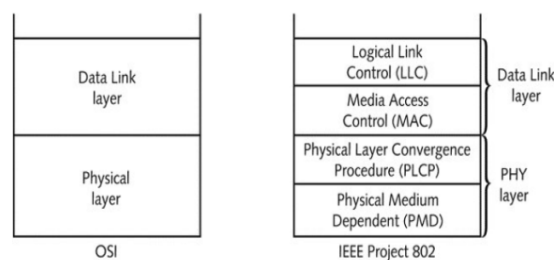


Figura 8. Arquitectura de capas de protocolos de IEEE802.11 comparados con modelos OSI

3.3.1 LA CAPA FÍSICA DE IEEE802.11

La capa PHY está dividida en dos capas, Figura 9, se explicaran de forma detallada en los próximos apartados:

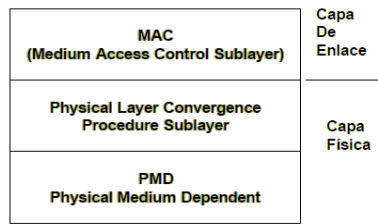


Figura 9. División de la capa PHY de 802.11

3.3.1.1 PMD: Physical Medium Dependent Sublayer

Esta capa maneja directamente las comunicaciones de radio sobre el medio inalámbrico. La capa PMD es la que proporciona los medios reales para la transmisión y recepción de las señales radioeléctricas a través del medio inalámbrico utilizando DSSS. Se encarga de fijar el canal y convertir las secuencias binarias en señales (y viceversa).

Ofrece una serie de funciones a la capa superior (PLCP) para la transmisión y recepción de las tramas PPDU (*PLCP Protocol Data Unit*), Figura 10. Proporciona además la capacidad de realizar lo que el estándar denomina CCA (*Clear Channel Assessment*), que consiste en la detección de energía o portadoras en el medio para decidir si se considera que está libre u ocupado. En el momento en el que se detecta la presencia de una señal a la frecuencia de trabajo del equipo, se indica a las capas superiores que el canal está ocupado. En caso contrario se considera que el canal está libre.

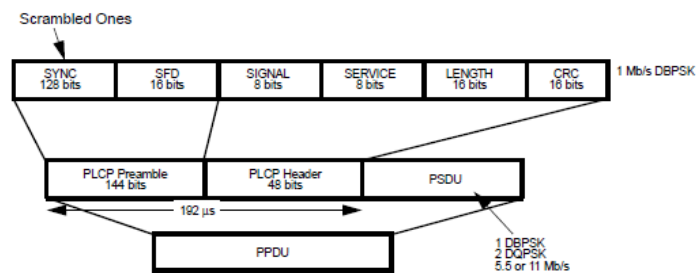


Figura 10. Estructura de una trama PPDU [IEEE11]

3.3.1.2 PLCP: Physical Layer Convergence Procedure

Trata las tramas de la MAC (MPDU) y las pone en el formato adecuado para la PMD. La capa PLCP se define para permitir que el nivel MAC opere con la mayor independencia posible con respecto a la subcapa PMD. La capa PLCP simplifica el interfaz entre el nivel físico y los servicios MAC.

Las tramas a nivel MAC se denominan MPDU (*MAC Protocol Data Unit*) y se tratará sobre ellas más adelante. La capa PLCP convierte la trama MPDU en una trama PPDU y viceversa. En la transmisión la trama MPDU será precedida por un preámbulo y una cabecera PLCP. En la recepción se procesará la información en esos dos campos para ayudar a la demodulación y entrega de la trama MPDU a la capa MAC.

En el estándar se define la transmisión en PLCP, Figura 11, muestra de forma grafica como se realiza este proceso:

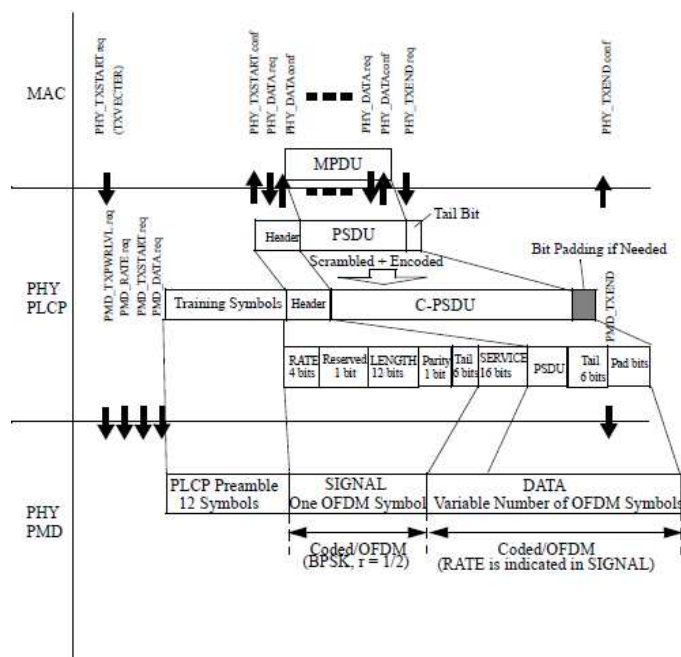


Figura 11. Transmisión PLCP [IEEE1107]

3.3.1.3 TIPOS DE PHY DE 802.11

En la versión inicial, publicada en 1997, del estándar se definieron 3 técnicas de transmisión en el nivel físico:

1. Frequency-Hopping Spread-Spectrum (FHSS)

Utiliza un conjunto de canales estrechos en la banda de 2,4GHz. La clave de su funcionamiento es que se produzcan saltos entre ellos en una secuencia predeterminada, operando a velocidades de transmisión de datos de 1 ó 2Mbps.

De las distintas formas de transmisión estandarizadas en IEEE802.11, el espectro ensanchado por salto de frecuencias fue el primero en desplegarse, pero actualmente es obsoleto. Su principal virtud es la posibilidad de que distintas redes coexistan en el mismo espacio físico sin apenas interferirse, lográndose una capacidad agregada muy alta. No obstante, las otras especificaciones proporcionan capacidades mayores, por lo que el salto de frecuencias es hoy una mera anécdota.

El salto de frecuencias se basa en el cambio rápido de la frecuencia de transmisión siguiendo un patrón pseudoaleatorio predeterminado. En la Figura 12, el eje vertical divide la frecuencia disponible en un cierto número de ranuras, e igualmente en el eje horizontal se representa el tiempo, también dividido en una serie de ranuras. Un patrón de saltos controla qué ranuras se usan en cada momento. La precisión en los saltos es la clave del éxito de esta técnica; tanto el transmisor como el receptor deben estar sincronizados para que el receptor esté siempre escuchando en la frecuencia correcta. El tiempo durante el que se usa una frecuencia antes de saltar a la siguiente se llama "dwell time" y vale 390 unidades de tiempo, casi 0.4seg.

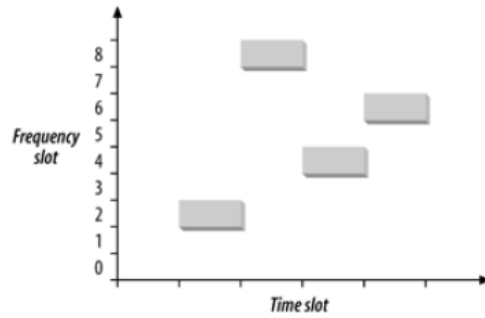


Figura 12. Salto de frecuencia

La modulación utilizada por FH es GFSK (*Gaussian Frequency Shift Keying*), que no es más que una modulación por desplazamiento de la frecuencia de portadora en que los pulsos de radio tienen forma gaussiana.

2. Direct-Sequence Spread-Spectrum (DSSS)

Se basa en el ensanchamiento de la señal, mediante la multiplexación a través de un código, para minimizar las interferencias y el ruido. Trabaja también en la banda de frecuencias de 2,4GHz.

Soporta las velocidades de 1Mbps y 2Mbps mediante el uso de las modulaciones DBPSK (*Differential Binary Phase Shift Keying*) y DQPSK (*Differential Quadrature Phase Shift Keying*) respectivamente. Esta técnica fue implementada en las primeras tarjetas IEEE802.11 y complementa al estándar IEEE802.11b.

3. Infrared Light (IR)

Infrarrojos, utiliza ondas en la frecuencia de los infrarrojos para la transmisión binaria de los datos a velocidades de 1Mbps y 2Mbps. Al igual que FHSS, ninguna tarjeta IEEE802.11 vio la luz basada en IR.

Después de éstas, tres técnicas más de capa física basadas en tecnología de radio fueron desarrolladas:

1. 802.11b: High-Rate Direct Sequence (HR/DS or HR/DSSS) PHY

IEEE802.11b trabaja en la banda de frecuencia de 2,4GHz utilizando DSSS (*Direct Sequence Spread Spectrum*) como sistema de transmisión.

DSSS apareció en el estándar original al igual que FH y ambas soportaban las mismas velocidades, 1Mbps y 2Mbps. DSSS soporta estas velocidades mediante el uso de las modulaciones DBPSK para 1Mbps y DQPSK para 2Mbps. Pero pronto se vio que tenía un potencial muy superior para lograr velocidades de transmisión mayores.

DSSS se convirtió en la opción de todos los fabricantes, FH quedó en desuso, y en 1999 se estandarizó IEEE802.11b que ampliaba las velocidades originales con otras dos: 5.5Mbps y 11Mbps mediante el uso de la modulación CCK (*Complementary Code Keying*) para ambas velocidades.

Habitualmente, toda interfaz comercializada como compatible con IEEE802.11b soporta las cuatro velocidades, si bien las dos primeras y las dos últimas se especifican en estándares diferentes.

Se da soporte a catorce canales (limitados a once o trece según cada país) de 22 MHz, de los cuales se pueden utilizar simultáneamente hasta tres de forma no interferente.

2. 802.11a: Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) PHY

La banda de 2.4 GHz ISM es muy utilizada por distintas tecnologías, lo que llevó a ofrecer una alternativa en la banda de 5 GHz para posibilitar redes menos sometidas a interferencias. Aunque IEEE802.11a se estandarizó en 1999, no fue hasta 2001 que empezaron a aparecer productos en la industria bajo el liderazgo de *Atheros Communications [ATHER]*. Las velocidades de IEEE802.11a y rangos de cobertura comparables a la versión b además de ofrecer algunas velocidades mucho mayores para rangos muy cortos.

IEEE802.11a aplica OFDM de forma algo conservadora. se utiliza un tiempo de guarda de 800ns para soportar dispersiones de retardo extremas (altas). El tiempo de símbolo se estableció en 4 μ s con el fin de permitir el máximo posible de subportadoras sin requerir dispositivos costosos. Lo que resulta en un tiempo de integración de 3.2 μ s con un espaciado entre subportadoras de 0.3125MHz (1/3.2 μ s).

Los canales se especificaron con un ancho de 20MHz, lo que permite alcanzar velocidades de hasta 54Mbps. Cada canal está formado por 52 subportadoras, 4 de ellas se usan como portadoras piloto para monitorizar los desplazamientos de camino y la ICI, mientras que el resto (48 subp.) transmiten datos (Figura 13). Las portadoras se numeran de -26 a 26 y la portadora 0 no se usa por razones relacionadas con el procesado de señal; las portadoras piloto son las -21, -7, 7, y 21. Los pilotos transmiten una secuencia de bits fija especificada en el estándar, para evitar líneas espectrales fuertes en la transformada de Fourier.

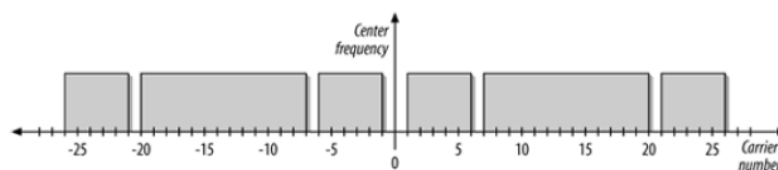


Figura 13. Estructura de un canal OFDM

En IEEE802.11a se usa QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*) para modular cada subportadora. Las constelaciones son cuadradas (salvo la primera), codifican 1b.p.s¹(BPSK), 2b.p.s (QPSK), 4b.p.s (16QAM) o 6b.p.s (64QAM).

Normalmente OFDM emplea un mecanismo de código de corrección de errores para mantener lo más reducida posible la tasa de error de bits. El OFDM codificado se suele llamar COFDM y usa un código FEC (*Forward Error Correction*) en cada canal. Este código permite al receptor detectar cierto número de errores de bit y, repararlos hasta cierto límite. Los códigos empleados en OFDM son códigos convolucionales, que

¹ b.p.s :bit por símbolo

permiten ser utilizados con un flujo de bits de longitud variable. Dichos códigos tienen dos parámetros principales: La longitud de restricción determina cuanto se promedia un bit de datos en transmisiones sucesivas; cuanto mayor es la transmisión es más fiable y el decodificador más complejo. En IEEE802.11a se usa una longitud de 7 y un decodificador Viterbi, cuya propiedad principal es proporcionar los bits que más probablemente fueron transmitidos. La tasa de codificación (R) y determina cuantos bits redundantes se añaden, expresada como el número de bits transmitidos entre el número total de bits codificados. IEEE802.11a usa $R=1/2$.

Los bits en OFDM no se asignan secuencialmente a las subportadoras, sino que se emplea un entrelazado que sigue esencialmente dos reglas: los bits consecutivos se mandan por subcanales ampliamente separados, y los bits consecutivos se mapean en puntos de constelación diferentes.

3. 802.11g: Extended Rate PHY (ERP)

Ante el importante problema de incompatibilidad de los equipos IEEE802.11a e IEEE802.11b, así como el interés en incrementar la capacidad de los equipos y las redes WiFi, el IEEE desarrolló, en 2003, otro estándar el IEEE802.11g. Asegurando así la compatibilidad hacia atrás con 11b, usando la banda de 2.4GHz e incorporando la tecnología y las velocidades de IEEE802.11a.

En realidad hay poco de novedad en IEEE802.11g, bajo el nombre de *ERP (ExtendedRate PHY)* se propone en realidad una variedad de tecnologías propuestas antes en otra parte:

- **ERP- DSSS ERP-CCK:** Estos modos son compatibles con los originales de IEEE802.11 (1Mbps y 2Mbps) y los de IEEE802.11b (5.5Mbps y 11Mbps).
- **ERP-OFDM:** Es el modo principal de IEEE802.11g y es esencialmente una redefinición de IEEE802.11a en la banda ISM de 2.4GHz. Soporta exactamente las mismas velocidades que 11a (6, 9, 12, 18, 24, 36, 48 y 54Mbps), y también las mismas son obligatorias (6, 12 y 24Mbps).
- **ERP-PBCC:** Extensión opcional que proporciona tasa a 22Mbps y 33Mbps. Es muy poco implementado y apenas se usa.
- **DSSS-OFDM:** Modo híbrido en que los paquetes de datos codifican las cabeceras usando DSSS mientras que los datos se codifican en OFDM. Se hizo por compatibilidad hacia atrás. Es opcional y no muy implementado.

Resumiendo diremos que, IEEE802.11a tiene muy en cuenta que debe convivir correctamente con IEEE802.11b. Mientras que 802.11g entiende todo lo que sucede en una red IEEE802.11b, los dispositivos IEEE802.11b no entienden muchas de las tramas de IEEE802.11g, ya sea por usar temporizaciones distintas o directamente por emplear modulaciones OFDM, totalmente incomprensibles para 11b.

Los mecanismos de "protección" son los que permiten la convivencia entre IEEE802.11g y IEEE802.11b. *RTS/CTS* es uno de estos mecanismos, descrito en IEEE802.11 y uno relativamente nuevo *CTS-to-self*, que básicamente consiste en mandarse una trama CTS a uno mismo para que las demás estaciones que la escuchen actualicen sus NAV. El mayor problema de la protección es que reduce las prestaciones de IEEE802.11g a la mitad cuando se activa. Los modos opcionales ERP-PBCC y DSSS-

OFDM no necesitan mecanismos de protección explícitos porque ya las cabeceras son comprensibles por estaciones IEEE802.11b; en realidad es como si tuvieran protección siempre habilitada, y sufren las consecuencias de ello ya que las cabeceras más largas limitan todo el tiempo las prestaciones que se pueden lograr con esos modos.

4. El futuro 802.11n

El grupo de trabajo N (TGn) tiene como objetivo llegar a un *throughput* neto de 100Mbps después de eliminar toda la sobrecarga debida a tramas de gestión, preámbulos, tiempos entre tramas y confirmaciones. En realidad, el trabajo realizado hasta la fecha muestra que se van a lograr modos que multiplican varias veces ese objetivo. De las seis propuestas iniciales que se hicieron al grupo, se ha seguido trabajando en dos alternativas llamadas TgnSync y WWiSE [WWISE]. La primera la impulsan Atheros, Agere, Marvell e Intel, mientras que la segunda la lideran Airgo, Broadcom, Conexant y Texas Instruments. De los fabricantes de equipos, Intel, Agere, Atheros, Philips, Sony, Toshiba y Matsuhita, que se han ido sumando, la gran mayoría apoyan TgnSync. Ambas usan tecnologías MIMO y tienen en cuenta la compatibilidad hacia atrás con sistemas en la misma banda de frecuencias. Ambas pueden trabajar en la actual canalización de 20MHz y también pueden usar canales de 40MHz para lograr más *throughput*.

i. MIMO:

Hasta 2004 los interfaces WiFi tenían una única antena. Incluso en configuraciones dotadas de diversidad, eso significaba que de dos o más antenas se tomaba la que recibiera mejor señal, pero la cadena de entrada y la cadena de salida eran únicas en el transceptor. El siguiente paso es dotar a cada antena de su propia cadena RF, de forma que cada antena pueda transmitir y recibir a la vez que las demás. Eso puede aumentar el *throughput* significativamente, pero además permite obtener beneficios añadidos de procesar las señales recibidas simultáneamente a la hora de enfrentarse a la interferencia por multitrayecto. Tanto WWiSE como TgnSync proponen el uso de MIMO.

Las configuraciones de antena MIMO se describen con la notación "YxZ," donde Y y Z son enteros que representan el número de antenas en transmisión y en recepción respectivamente. Ambas propuestas contienen una configuración 2x2, pero ambas ofrecerán modos tanto obligatorios como opcionales que introduzcan alguna antena más. Por ejemplo, es probable que se mantengan las dos antenas en los dispositivos terminales (por razón de ahorro de energía), mientras que se usen tres antenas en los puntos de acceso, permitiendo configuraciones 2x3 en un sentido y 3x2 en el otro.

3.3.2 CONTROL DE ACCESO AL MEDIO EN 802.11

El control de acceso al medio tiene como misión coordinar de la forma más eficiente posible el acceso al medio de transmisión de las distintas estaciones que lo comparten. La MAC de IEEE802.11 no es en absoluto rupturista con respecto a la trayectoria previa de los estándares de la familia 802, se podría decir que adapta con éxito el MAC de Ethernet al

contexto diferente de una red radio; esto se logra esencialmente reemplazando el CSMA/CD (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection*) por CSMA/CA (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*).

El IEEE802.11 la MAC tiene que vencer algunos retos específicos de la naturaleza inalámbrica de las redes WiFi, de los que se pueden destacar dos: El primero, la calidad fluctuante y no necesariamente óptima de los enlaces de radio impone un modelo confirmado de conmutación de tramas unicast. El segundo, la alta probabilidad de que las redes contengan nodos que puedan colisionar sin siquiera oírse, que es el llamado fenómeno del nodo oculto, y para el que se propone el mecanismo RTS/CTS.

La Figura 14 muestra la relación entre los dos modos de funcionamiento existentes en la capa MAC descritos en el estándar IEEE802.11 [IEEE11].

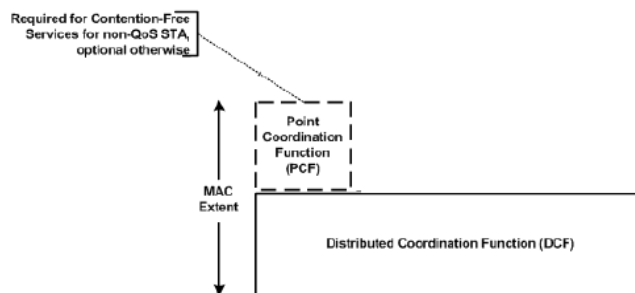


Figura 14. Relación entre DCF y PCF [IEEE11]

- **DCF (*Distributed Coordination Function*)**: Permite compartir el medio de forma automática a través del uso del protocolo de acceso al medio CSMA/CA y un tiempo aleatorio de espera cuando el medio está ocupado. Además, tras enviar una trama a un destinatario concreto se debe recibir un asentimiento positivo (trama ACK, Figura 18), en el caso de que no se reciba en un periodo de tiempo (*ACK_TimeOut*²) se debe retransmitir la trama (si el ACK llega después de que se supere este tiempo, se descarta, es como si no hubiera llegado). Cuando la trama ACK no se recibe se interpreta que el paquete o trama no ha llegado a su destino, pero no siempre es así, ya que, la estación pudo haber recibido la trama pero se ha producido algún error en la transmisión o recepción del ACK.

Aunque el nivel MAC del IEEE802.11 no es ranurado, sí que se define una duración de ranura (*aSlotTime*), cuyo valor se fija en el nivel físico. Una ranura o *slot*³ es cada una de las fracciones resultantes de particionar el tiempo en ranuras de igual tamaño con instantes de comienzo y fin perfectamente definidos. Para el caso DSSS se fija en el estándar IEEE802.11 un valor de 20µs, si bien en IEEE802.11g se da un valor alternativo opcional de 9µs, que se puede usar si se tiene la garantía de que todos los equipos involucrados lo soportan. El resto de tiempos definidos en la capa MAC fijaran su valor en función de la duración del *slot* (del nivel físico). El estándar se denomina IFS (*Interframe Space*) al los

² Este parámetro marca el tiempo que debe esperar una estación que ha transmitido una trama a su correspondiente ACK. Una vez superado este tiempo se considera que se ha perdido la trama y se da comienzo a una retransmisión.

³ **Slot**: anglicismo utilizado para denominar a cada uno de los bloques de igual tamaño de tiempo

intervalos entre tramas. Se definen cuatro de ellos, Figura 15, para proporcionar niveles de prioridad para el acceso al medio inalámbrico en función del tipo de trama y modo de coordinación:

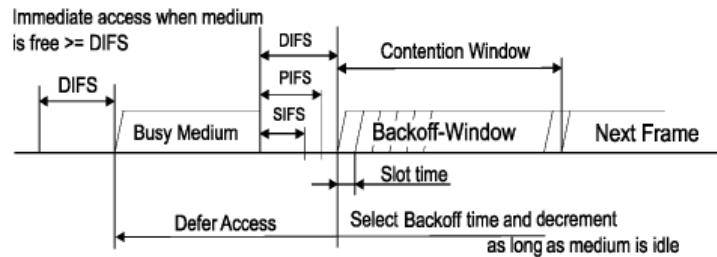


Figura 15. Funcionamiento MAC - Esquema temporal

- **SIFS (Short Inter Frame Space):** Es el mínimo espacio entre tramas. Utilizado para separar transmisiones pertenecientes al mismo diálogo, como una trama y su ACK o varios fragmentos de la misma MPDU. Se utiliza cuando una estación ha ganado el medio y necesita mantenerlo para un intercambio de tramas definido. Su valor se fija en la capa física de tal forma que a la estación transmisora le sea posible conmutar al modo de recepción y que la receptora pueda decodificar la trama entrante en ese tiempo.
- **PIFS (Priority Inter Frame Space):** Lo utiliza el AP para ganar acceso al medio al comienzo del periodo de contienda (CFP, Contention Free Period), antes de que cualquier otra estación pueda hacerlo. De esta forma puede comunicar a que estación le corresponde transmitir a continuación.
- **DIFS (Distributed IFS):** Utilizado bajo DCF por las estaciones que desean transmitir tramas de datos y de control. Su valor se fija como SIFS + aSlotTime. Una estación podrá transmitir tras una trama correctamente recibida (aunque no vaya dirigida a ella), una vez transcurrido un tiempo igual a DIFS, si detecta que el medio está libre y cuando su ventana de contención haya expirado.
- **EIFS (Extended IFS):** Utilizado bajo DCF es el IFS más largo. Si una estación recibe una trama que no es capaz de comprender, espera este tiempo antes de intentar transmitir. Se usa para evitar que se produzca una colisión debido a que la estación no ha entendido la información de duración de la trama.

El protocolo CSMA/CA se ha diseñado para intentar reducir la probabilidad de colisión entre tramas de dos o más estaciones transmitiendo de forma simultánea. Dicha probabilidad es máxima cuando el medio queda libre, puesto que las estaciones que estuviesen esperando para transmitir intentarán hacerlo a la vez. Por tanto, se hace necesario un procedimiento por el que las estaciones esperen un tiempo aleatorio antes de volver a comprobar si el medio está libre para transmitir.

En primer lugar se procederá a la escucha del canal y una vez que se detecta que el canal está libre la estación espera un tiempo DIFS. Si una vez transcurrido este tiempo el canal sigue libre, la STA generará un periodo adicional de espera que se denomina ventana de contienda, CW (Contention Window), cuyo valor será un número aleatorio múltiplo del tamaño del aSlotTime. Si durante la espera por la ventana de contienda se detecta otra trama en el medio, se congela el temporizador y no se transmite ni se sigue la cuenta

atrás. Una vez que el medio vuelve a quedar libre se espera nuevamente el tiempo DIFS y se reanuda la cuenta atrás de la CW donde se detuvo. Cuando la CW alcanza el valor cero, se transmite la trama. Si dicha trama tenía un solo destinatario (*unicast*), la STA transmisora queda a la espera de recibir su correspondiente acuse de recibo, un mensaje ACK. El receptor recibe la trama y comprueba su CRC (*Cyclic Redundancy Check*) mientras espera un tiempo SIFS y luego envía la trama ACK para confirmar. Las tramas *broadcast* no se confirman en IEEE802.11, al igual que las *multicast*.

Una vez producida una colisión en tramas *unicast*, el resultado es que el transmisor no recibe correctamente la confirmación de la trama y la intenta retransmitir hasta un número de veces máximo que por defecto son 7 para el servicio de dos tramas y 4 para tramas transmitidas mediante el servicio RTS/CTS, si bien esos valores se pueden modificar. En cada retransmisión el tamaño de la ventana de contienda se calcula según una variable aleatoria uniforme entre (0, CW), pero el valor CW se va duplicando a cada retransmisión hasta llegar a un valor máximo, en el que se mantiene. El tamaño mínimo y máximo de CW dependen del PHY, siendo los rangos más usuales el de DSSS (31, 1023) y el de ERP/OFDM (15, 1023). El proceso termina cuando la trama se logra transmitir con éxito (y se recibe confirmación) o se descarta por haberse alcanzado el máximo de retransmisiones sin éxito; en cualquiera de esos casos, la siguiente se intenta transmitir otra vez con ventana de contienda mínima.

Si una trama es demasiado larga, el nivel MAC puede proceder a su fragmentación y transmisión mediante ráfagas. En este caso el transmisor tan solo espera el tiempo SIFS entre fragmento y fragmento, Figura 16, de forma que ninguna otra estación pueda ganar acceso al medio hasta que no termina de transmitirse y confirmarse la ráfaga completa.

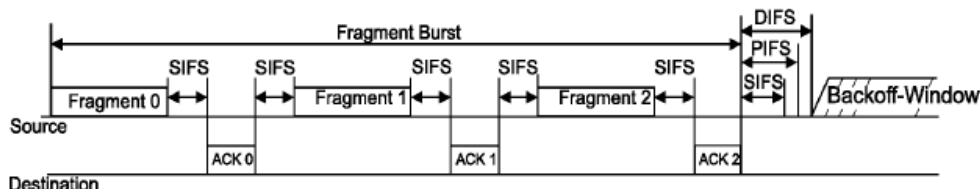


Figura 16. Transmisión fragmentada de una MPDU

Las tramas MAC que fija el estándar son MPDU, cuya estructura se muestra en la Figura 17, es un conjunto de campos con un orden y tamaño determinados.

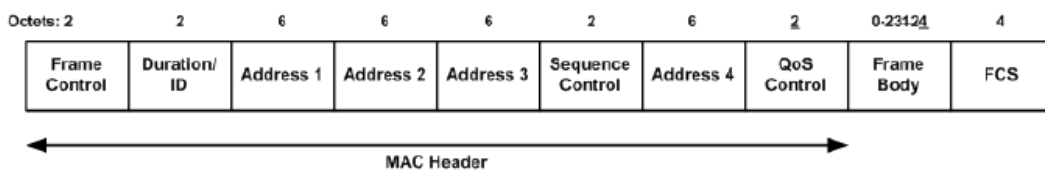


Figura 17. Estructura de una MPDU

Los campos son:

- *Frame Control*: consta de múltiples campos que contienen toda la información de control necesaria a nivel MAC.
- *Duration/ID*: tiene 16 bits de longitud y se utiliza de diversas formas, según el tipo de trama, para informar sobre su duración.
- *FCS*: contiene un CRC de 32 bits para controlar si se han producido errores en la transmisión.

El resto de campos solo están presentes en determinado tipo de tramas:

- *Address 1, Address 2, Address 3 y Address 4*: se utilizan para determinar el origen y destino finales de la trama así como las estaciones transmisora y receptora (la cuarta dirección sólo se usa cuando es necesaria en sistemas de distribución inalámbricos).
- *Sequence Control*: se utiliza para asignar un número de trama a cada una de ellas y poder así tener mayor control sobre ellas.
- *Frame Body*: es el único campo de tamaño variable y contiene los datos procedentes de capas superiores (por ejemplo un datagrama).

Hay tres tipos de trama:

1. **Datos**: transportan los datos entre estaciones.
2. **Control**: se usan en conjunto con las de datos para las operaciones de funcionamiento del MAC.
3. **Gestión**: sirven para operaciones diversas de supervisión y gestión de usuarios.

Las tramas ACK están compuestas de 14 bytes, Figura 18. Sus campos son: control y duración de la trama. El ACK confirma la correcta recepción de la trama enviada por una estación transmisora, cuya dirección es el contenido del campo RA. El FCS incluye un CRC de 32 bits igual al de la trama MAC.

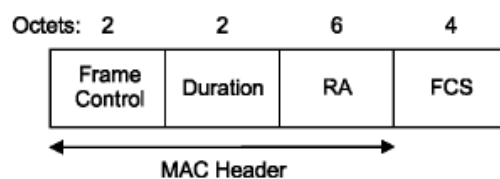


Figura 18. Estructura de una trama ACK[IEEE1107]

En el estándar IEEE802.11-WiFi se definen dos *mecanismos* para conocer la *disponibilidad del canal*, uno físico y otro virtual. Si cualquiera de los dos indica que el medio está ocupado el nivel MAC esperará para poder iniciar la transmisión.

El mecanismo físico se basa en la detección real de una portadora en el medio (a la frecuencia de trabajo). El mecanismo virtual se basa en la distribución de información anunciando el uso inmediato del canal.

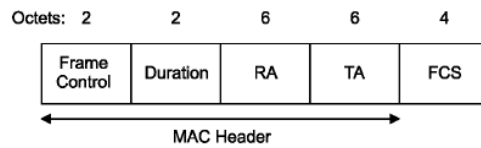


Figura 19. Estructura de trama RTS [IEEE1107]

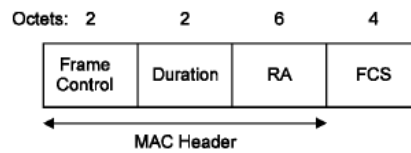


Figura 20. Estructura de trama CTS [IEEE1107]

El intercambio de tramas *RTS* y *CTS* (Figura 19 y Figura 20) de forma previa a la transmisión de la trama de datos es un medio para la reserva del canal de comunicaciones. Dichas tramas, contienen un campo *Duration/ID* que define el periodo de tiempo que la estación origen se reserva el medio para transmitir la próxima trama y su correspondiente ACK. De esta forma el resto de estaciones dentro del rango de la estación emisora (que transmite la trama *RTS*) y de la receptora (que transmite la trama *CTS*), son informadas de que el medio está reservado y que deben esperar sin transmitir ese tiempo, aunque el medio esté aparentemente libre. Se emplea un contador denominado NAV (*Network Allocator Vector*) en cada sistema para controlar el tiempo que se debe esperar porque el canal está reservado. Este mecanismo se diseñó para tratar de solucionar la denominada *problemática del nodo oculto*.

Nodo Oculto (Ejemplo):

Tres estaciones A, B y C, las cuales pueden establecer enlaces AB y BC, pero las estaciones A y C se encuentran demasiado lejos una de la otra y no pueden recibir sus respectivas señales. En un modo de funcionamiento normal, cuando la estación A transmite, la estación C detectará que el medio está libre y transmitirá (si le interesa), lo que dará lugar a una colisión de ambas tramas en la estación B. Si se activa el mecanismo *RTS/CTS* la estación A enviará la trama *RTS*. Cuando la estación B reciba la trama *RTS* transmitirá la trama *CTS* que será recibida por las estaciones A y C. De esta forma la estación C sabrá que se ha reservado el medio y no transmitirá en ese tiempo, proporcionando a la estación A la garantía de que su transmisión estará libre de colisiones. Las tramas *RTS* y *CTS* son muy cortas, por lo que las probabilidades de que se produzca una colisión que las implique son mucho más reducidas que si se transmite directamente una trama de datos de gran tamaño.

Este mecanismo no debe utilizarse para todas y cada una de las transmisiones de tramas de datos, puesto que implica una sobrecarga extra debido a la transmisión de

tramas adicionales sin datos. En tramas largas, ofrecen la ventaja de que una colisión del paquete RTS es mucho menos perjudicial que la colisión de la trama de datos, pero en tramas cortas (Ej. paquetes de VoIP) carece de sentido usar este mecanismo. Por este motivo se define el atributo *RTSThreshold*, que es el tamaño en bytes de una trama de datos a partir del cual se utiliza el mecanismo.

- **PCF (Point Coordination Function):** Este nivel es opcional y depende de DCF para funcionar. Se puede utilizar únicamente en topologías de red con infraestructura.

El mecanismo PCF proporciona transferencia de tramas libre de contienda. Este método de acceso usa un *Punto Coordinador (PC)*, que operará en el PA de la BSS, para determinar que estación tiene derecho a transmitir en cada momento. El funcionamiento se basa en *sondeo (o polling)*, siendo el PC el que desempeña el papel de “maestro”.

El PCF está planteado para alternar periodos libres de contienda, CFP (*Contention Free Period*) con periodos de contienda, dicho de otra manera, que DCF y PCF funcionen alternativamente. El PCF usa DCF para establecer un periodo libre de contienda, lo hace distribuyendo cierta información dentro de tramas de gestión para ganar el control del medio con el objeto de fijar el NAV en las estaciones por un valor equivalente a todo el periodo libre de contienda. Todas las STA's fijarán su NAV al comienzo del CFP, lo cual supone que ninguna se considerara con derecho a ocupar el canal en ese periodo. Al final de un periodo DCF el maestro puede generar un nuevo periodo libre de contienda, ganando el canal de forma determinista gracias a que $PIFS < DIFS$.

En un CFP, todas las estaciones de la BSS (exceptuando el PC) fijan su NAV al valor del parámetro *CFPMaxDuration* en el comienzo de cada CFP. Esto evita la mayor parte de las contiendas impidiendo las transmisiones no sondeadas por parte de las estaciones, independientemente de que estas sean o no sondeables (*CFPollable*).

Las transferencias durante el periodo libre de contienda están formadas por tramas enviadas alternativamente desde y hacia el PC. Durante el CFP, el PC controlará el orden de estas transmisiones y el permiso de las estaciones para transmitir en todo momento.

3.3.3 SEGURIDAD EN REDES IEEE802.11

La seguridad en cualquier red inalámbrica tiene que garantizar básicamente tres conceptos:

- **Integridad:** característica que garantiza que un mensaje NO se ha visto alterado en el camino desde emisor a receptor.
- **Confiabilidad:** garantiza que la información sólo está disponible para el destinatario autorizado.
- **Autenticación:** con lo que se garantiza el origen de la información.

Con el objetivo de proteger las comunicaciones inalámbricas, y conscientes de que la única forma de protegerlas es mediante el uso de criptografía, han ido surgiendo distintos protocolos criptográficos: WEP, WPA y WPA2. Estos dos últimos, se diferencian en poco, pues WPA fue creado para ser no más que una transición a WPA2 mientras se completaba el estándar. El estándar contempla una serie de medidas básicas destinadas a la protección:

- **Filtrado de direcciones MAC:** Posibilidad de definir listas de control de acceso, ACL (*Access Control List*), en los puntos de acceso. Cada uno de estos puntos puede contar con una relación de las direcciones MAC de cada uno de los clientes que queremos que se conecten a nuestra red inalámbrica. Cada estación cuenta con una dirección que la identifica de forma inequívoca, y si el punto de acceso no la tiene dada de alta, simplemente no recibirá contestación por su parte.
Hay que tener en cuenta que éste no es el método más seguro para proteger la entrada a la red inalámbrica. Habrá que actualizar esta ACL cada vez que se de alta un nuevo cliente inalámbrico, eliminando aquellos que se quieren dejar de utilizar.
- **WEP (*Wired Equivalent Privacy*):** El cifrado de la información es una de las técnicas más utilizadas. Es un sistema que genera una clave que se comparte entre el cliente (STA) y el punto de acceso (AP), y que permite o deniega la comunicación entre ambos dispositivos. WEP utiliza un sistema con una clave de 64 ó 128 bits, que pueden ser hexadecimales o ASCII, mediante la que se autentifica el acceso y se encripta la información que se transmite entre ambos dispositivos.

Su modo de funcionamiento se resume de la a continuación:

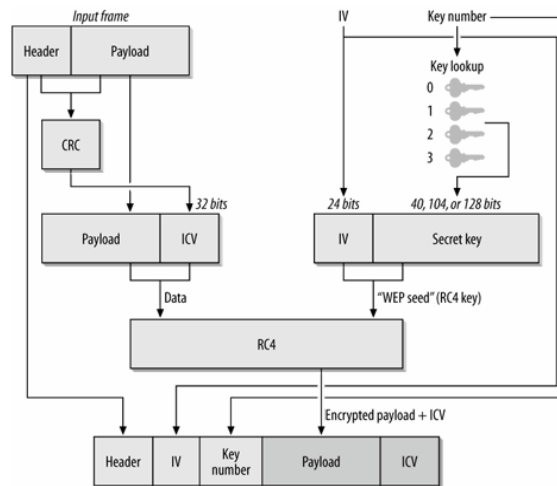


Figura 21. Modo de funcionamiento WEP

El usuario introduce una clave secreta (invariable) y a partir de ésta clave secreta y un IV (*Inicialization Vector*) que varía a lo largo de la comunicación (para cada paquete), se genera la clave de cifrado. El IV es de 24 bits porque la mayoría de los productos implementan *64bitWEP* con 40 bits para la clave secreta y 24 bits para el IV. Aunque, como se ha dicho también existe *128bitWEP*. La clave de cifrado es utilizada por el algoritmo de cifrado RC4 para producir un *stream*, con el cual se hace la operación

XOR a los datos que se van a cifrar. El resultado será lo que en la Figura 21 se llaman “*Encrypted payload o datos cifrados*”.

De esta manera, se introduce confidencialidad en la información transmitida. Para introducir integridad en los datos hacemos uso de un CRC (*Cyclic Redundancy Check*), con esto comprobamos si los datos han sido alterados. Esta operación se realiza antes de la encriptación.

Por último enviamos la trama cifrada, donde introducimos de forma clara el IV, para posteriormente proceder a la descriptación una vez recibida. La autenticación por parte de destino, será posible, siempre y cuando, se conozca la clave secreta.

- **WPA/WPA2 (*WI-FI Protected Access*)**: con el objeto de dotar de mayor control y seguridad a las redes inalámbricas WiFi Alliance crea WPA que sustituye a WEP. WPA mejora la forma de codificar los datos respecto a WEP, utilizando TKIP (*Temporal Key Integrity Protocol*), al mismo tiempo que proporciona autenticación de usuarios mediante 802.1x y EAP (*Extensible Authentication Protocol*).

En realidad la diferencia más importante entre ambos (WPA y WPA2) es que WPA sigue implementando el algoritmo de cifrado RC4, y utiliza como protocolo de gestión de claves TKIP mientras que WAP2 implementa el algoritmo de cifrado AES (*Advanced Encryption Standard*) más seguro que RC4, dando lugar a un nuevo protocolo de encriptación denominado CCMP (*Counter Mode with Cipher Block Chaining Message Authentication Code Protocol*).

En WPA, los datos son igualmente encriptados mediante un RC4, a partir de una clave de cifrado, compuesta por una clave secreta (que puede ser de hasta 64 caracteres) y un IV, pero en este caso los tamaños para ambos son de 128 bits para la clave y 48 bits para el IV, mejorando la primera deficiencia del WEP en cuanto a tamaño de la clave de cifrado. Con los nuevos protocolos de encriptación, TKIP y CCMP, se garantiza que las claves de encriptación utilizadas para generar el flujo RC4 o AES, sean siempre diferentes para cada paquete, solucionando el problema de la vulnerabilidad debida a la repetición de las claves por el pequeño espacio de IV que tenía WEP.

3.3.4 CALIDAD DE SERVICIO CON IEEE802.11e

IEEE 802.11e es una ampliación del estándar IEEE 802.11 para proporcionar calidad de servicio en redes inalámbricas.

Tal y como se ha descrito en apartados anteriores (3.3.2 CONTROL DE ACCESO AL MEDIO EN 802.11), la capa MAC tiene dos funciones DCF y PCF, pero el estándar (IEEE802.11) no fue diseñado para diferenciar y dar prioridad a los distintos tipos de tráfico.

Las aplicaciones en tiempo real como VoIP requieren que no haya pérdidas de paquetes, ni retardo al entregar los datos. Además, estas aplicaciones necesitan suficiente ancho de banda para tener servicios de calidad.

Por otro lado, servicios de datos como *e-mail* y *ftp* requieren que las transmisiones estén libres de errores. IEEE 802.11e fue diseñado con la idea de poder soportar todas estas aplicaciones con requisitos diferentes.

En IEEE 802.11e hay dos mecanismos de acceso adicionales: EDCA (*Enhanced DCF Channel Access*) y HCCA (*Hybrid Coordination Function Channel Access*).

EDCA fue diseñada para soportar priorización de tráfico (ej. *DiffServ* - Servicios diferenciados), mientras que **HCCA** soporta tráfico parametrizado (garantizando QoS, ej. *IntServ* - Servicios Integrados). Para asegurar la compatibilidad de redes inalámbricas con QoS y sin QoS el estándar permite la existencia conjunta de DCF y PCF con HCF (*Hybrid Coordination Function*) como se puede observar en la Figura 22:

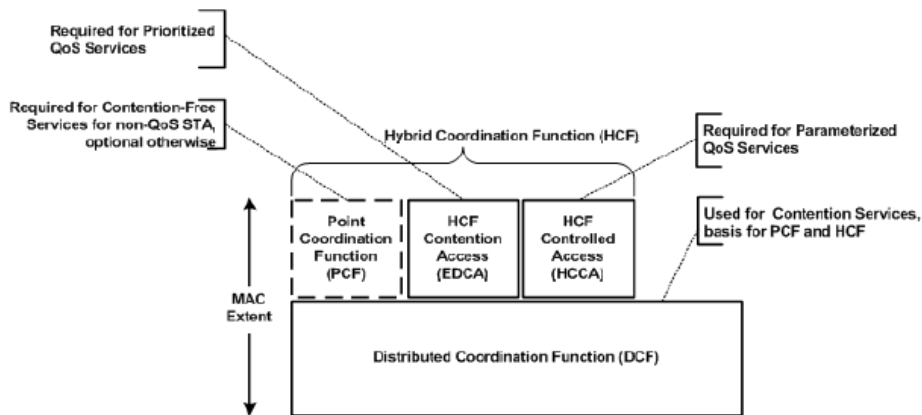


Figura 22. Estructura MAC [IEEE11]

3.3.4.1 EDCA (*Enhanced DCF Channel Access*)

EDCA proporciona servicios de tráfico diferenciado, es decir, sin reserva de recursos. Por tanto no garantiza que se cumplan los requisitos de QoS estrictamente. Además, la decisión de quién recibe la TxOP se hace de forma distribuida, es decir, se toma conjuntamente entre todas las estaciones.

En cada QSTA (STA con QoS) se definen cuatro colas para las ocho tipos de flujos de tráfico existentes, numerados con un TID entre 0 y 7. El esquema de planificación EDCA se muestra en la Figura 23.

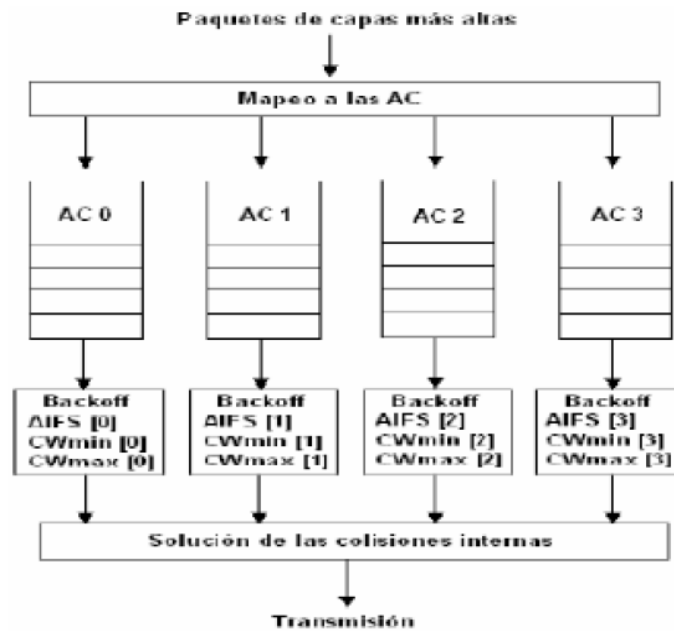


Figura 23. Tráfico EDCA

El mecanismo EDCA, como evolución del IEEE 802.11 DCF, incluye todos los elementos básicos de DCF como el protocolo CSMA/CA, el mecanismo de *backoff* o los distintos tiempos de espacio entre tramas. Aparte de los elementos básicos comunes, añade nuevos componentes que permiten introducir calidad de servicio en el sistema, como son el concepto de TxOP (Oportunidad de Transmisión) y el AIFS (*Espacio entre Tramas Arbitrario*).

La priorización se consigue en base al uso de los siguientes parámetros (Figura 24):

- **Espacio Arbitrario entre Tramas (AIFS):** Su tarea es equivalente al intervalo DIFS usado en DCF, sólo que ahora puede haber un valor diferente de AIFS por cada categoría de acceso (AC), dando una mayor prioridad a las ACs con menor AIFS. El tiempo AIFS es el intervalo de tiempo mínimo que tiene que estar el medio libre antes de empezar a transmitir. Hay que indicar que el AIFS es mayor o igual que DIFS, y por tanto las estaciones con el estándar IEEE 802.11 tiene prioridad sobre EDCA.

El valor del AIFS se calcula mediante la siguiente expresión:

$$AIFS[AC] = AIFS[AC] \times aSlotTime + aSIFSTime$$

Donde:

- *aSlotTime*: Tiempo de ranura (de DCF)
- *aSIFSTime*: Tiempo de intervalo más corto (de DCF)

- $AIFSN[AC]$: número de espacio entre tramas arbitrario y determina la prioridad. La prioridad más alta corresponde al valor más pequeño.
- **Ventana de Contención (CW)**: un número aleatorio para lanzar el mecanismo de espera aleatorio (*backoff*). Depende de cada estándar y es distinto para cada AC, tratándose de una prioridad estadística no garantizada.
- **Límite de la Oportunidad de Transmisión (límite TxOP)**: es la duración máxima de la oportunidad de transmisión, durante la cual una QSTA (STA con QoS) puede transmitir sus paquetes.

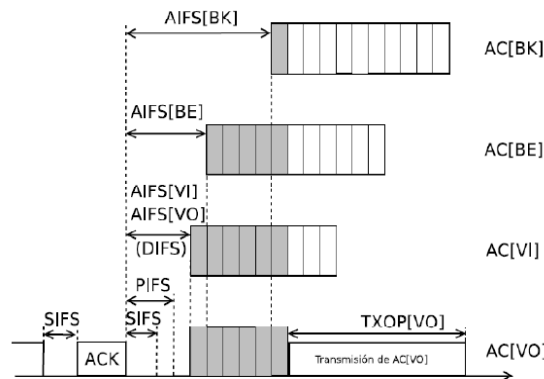


Figura 24. Parámetros EDCA

3.3.4.2 HCCA (Hybrid Coordination Function Channel Access)

Además de la función distribuida EDCA, el estándar IEEE 802.11e define la función HCCA, que es un mecanismo de acceso al medio centralizado. El coordinador híbrido (HC) utiliza esta función para acceder al medio. Normalmente el CH se encuentra en el QAP (AP con QoS) y puede tomar el control del medio cuando la función lo requiere. De esta forma, el planificador puede asignar las *TxOP*'s a los flujos de tráfico en el momento en que éste decida.

El HC accede al medio después de detectar que el canal está libre durante un tiempo PIFS, que es inferior que un espacio entre tramas, DIFS. Por tanto, tiene prioridad sobre el tráfico DCF. Además, el intervalo PIFS es inferior que cualquier espacio entre tramas AIFS, lo que implica que tiene prioridad sobre EDCA para acceder al medio.

De esta forma, HCF puede comenzar el acceso al canal en los intervalos CFP (*Periodos Libres de Contienda*) y CP (*Periodos de Contienda*) indistintamente, mientras que en PCF sólo podía acceder al canal en el intervalo libre de contención. Se denomina Período de Acceso Controlado (CAP) al período en el que HCF accede al canal en un intervalo de contención. Consiste en uno o más *TxOP*'s, durante los cuales el punto de acceso puede transmitir SDUs que pertenecen a un flujo descendente o enviar un mensaje de *polling* (sondeo) a una o más estaciones, especificando el tiempo máximo durante el que pueden ocupar el medio.

En el estándar IEEE 802.11 no está limitado el tiempo que una estación puede estar enviando tramas. En HCCA es diferente, ya que el HC indica a cada estación la duración máxima de la TxOP. Esto hace posible que el retardo máximo esté acotado, a diferencia de PCF donde esto no sucedía.

Durante una TxOP, sólo una QSTA accede al medio. Hay dos tipos de oportunidad de transmisión *HCCA-TxOP* dependiendo del tipo de flujo en cuestión (flujo ascendente y flujo descendente):

- Una TxOP descendente para la transmisión desde un QAP a una QSTA.
- Una TxOP ascendente para la transmisión desde una QSTA a un QAP. La transmisión se inicia cuando un QAP le envía un mensaje de *polling* a una determinada QSTA. Este mensaje le indica a la QSTA que puede acceder al medio durante un tiempo limitado (*límite de la TXOP*). Si un flujo de tráfico de una determinada QSTA recibe un mensaje de *polling* pero no tiene tramas para transmitir, la QSTA envía una trama de respuesta al QAP indicándole esta situación y el QAP mandará un mensaje de *polling* a la siguiente estación registrada. El mismo intercambio de mensajes se produce cuando una QSTA determina que el tiempo que tiene disponible en su TXOP es insuficiente para poder transmitir el próximo paquete de su cola.

La representación gráfica de los parámetros de HCCA lo muestra la Figura 25:

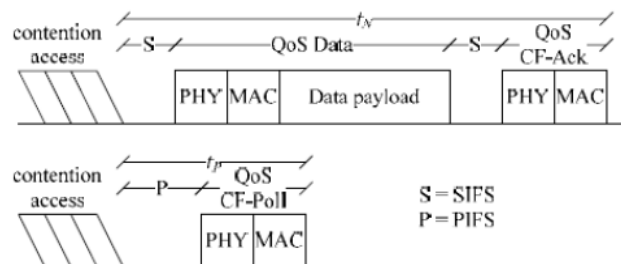


Figura 25. Tráfico en HCCA

No es obligatorio para un punto de acceso 802.11e tener soporte de HCCA. De hecho, es raro encontrar aún AP's capaces de funcionar en este modo.

3.4 Wi-Fi EN LARGAS DISTANCIAS

Aunque IEEE802.11 se diseñó desde el principio para redes de área local, con alcances máximos del orden de cientos de metros, algunas aplicaciones puntuales y los productos de algunos fabricantes han mostrado su posible utilidad para distancias superiores.

Algunas de las experiencias más conocidas son:

- La Corporación Aeroespacial Sueca (SSC) logró en 2002 un enlace punto a punto de 310Km en la banda de 2.4GHz entre un equipo terrestre y otro en un globo troposférico, empleando equipos de Alvarion [ALV03].
- La Red de Educación e Investigación en Redes Inalámbricas de Altas Prestaciones (HPWREN), sostenida por dos universidades de San Diego, logró también en 2002 un enlace de 116Km entre la costa continental y la Isla de San Clemente, por encima del Océano Pacífico.
- Estudiantes de la Weber University de Utah (USA) reportaron a la prensa en 2003 haber logrado un enlace de 132 km con equipamiento Cisco de la gama 350, transmitiendo 1.5W.
- Empresas como Mikrotik, en Letonia, y no pocos proveedores de acceso a Internet, sobre todo en países menos desarrollados en los que las redes de telefonía no brindaban los recursos necesarios para el acceso a redes de datos, experimentaron en estos años con enlaces punto a multipunto de hasta 12 km de distancia entre estaciones, y punto a punto de hasta 40Km.
- Gente del mundo de las redes inalámbricas ciudadanas, empezando por Rob Flickener y continuando por múltiples equipos de diversas partes del mundo, lograron en los mismos años enlaces punto a punto de más de 80 km en zonas montañosas. Todos estos ejemplos y algunos más coinciden en lograr enlaces con material estándar WiFi complementado con amplificadores bidireccionales y antenas externas directivas, y en reportarlo sin detalles de las prestaciones obtenidas.
- Enlace a la frecuencia de 5,8 GHz. Aunque la distancia es sólo de 16 km, uno de los extremos está a 4765 m de altura y está conectado a una cámara que transmite imágenes del Pico Bolívar, de 5000m de altura. Realizado por el *Merida Atmospheric research Station (MARS)*, Proyecto Conjunto Venezuela-Alemania. [WILAC]

3.4.1 Límites de WiFi como tecnología de largo alcance

La aplicación de WiFi para largas distancias supone una dificultad, puesto que es una tecnología concebida para entornos locales.

3.4.1.1 Capa Física

Analizando el estándar, al parecer ser que no existe ningún aspecto de la capa física que limite el alcance de las comunicaciones WiFi en términos de distancia. El balance de enlace o potencias puede ser el único que interfiera en la aplicación de esta tecnología para largas distancias.

Por tanto, los límites físicos de distancia alcanzable con WiFi dependerán, de los siguientes parámetros:

- **La máxima potencia transmitida:** PIRE, en ingles conocida como EIRP
- **Las pérdidas de propagación**
- **La sensibilidad de recepción**
- **La mínima relación señal a ruido:** dispuestos a aceptar como suficiente.

El propio estándar, Figura 26, determina que los límites de potencia que se puede transmitir dependen de la legislación de cada región geográfica. Para la banda de frecuencias ISM de 5GHz el estándar define lo siguiente.

Frequency band (GHz)	United States (Maximum output power with up to 6 dBi antenna gain) (mW)	Europe (EIRP)
5.15–5.25	40 (2.5 mW/MHz)	200 mW
5.25–5.35	200 (12.5 mW/MHz)	200 mW
5.470–5.725	—	1 W
5.725–5.825	800 (50 mW/MHz)	—

Figura 26. Niveles de Potencia transmitida (USA & Europa) [IEEE1107]

Frequency band (GHz)	Regulatory type	Japan
4.9–5.091	Fixed wireless access, licensed	< 250 mW EIRP, and < 50 mW/MHz EIRP for licensed access
4.9–5.091	Nomadic access, unlicensed	< 10 mW/MHz EIRP
5.15–5.25	Unlicensed	< 10 mW/MHz EIRP

Figura 27. Niveles de Potencia transmitida (Japón) [IEEE1107]

Además de los aspectos anteriores, se han de tomar en cuenta algunos parámetros limitadores en capa física de la estabilidad del enlace:

- **Velocidad:** 1, 2, 5.5 y 11 Mbps para 802.11b; 6, 9, 12, 18, 24, 36, 48 y 54 Mbps para 802.11a.
- **Fenómenos meteorológicos:** en zonas rurales o aisladas es frecuente que las condiciones climatológicas sean adversas.
- **Polarización:** el mejor comportamiento se consigue con una polarización vertical.
- **Interferencias:** menos usual pero se puede producir cuando el caso es comunicar zona rural con urbana.

3.4.1.2 Capa MAC

En ningún estándar de la familia IEEE802.11 se imponen restricciones explícitas de distancia, pero la experiencia deja claro que este tipo de limitación existe.

La capa MAC tiene multitud de tiempos constantes definidos que tienen diferente efecto en función de la distancia que haya entre estaciones. Del estándar base IEEE 802.11, se pueden extraer tres tipos de limitaciones: el temporizador de espera de los ACK's, la definición de tiempos relacionados con el tamaño de la ranura, y el cálculo del NAV para la detección de portadora virtual.

- **ACKTimeout:** se refiere al tiempo en que la estación transmisora espera la llegada del ACK de un paquete transmitido. Entonces para que una comunicación WiFi funcione a una determinada distancia se tiene que cumplir que el *ACKTimeout* sea mayor que el

tiempo de propagación de ida y vuelta más el *SIFS* que separa la recepción del paquete de la transmisión de su ACK en el receptor. Sin embargo, el estándar no da un valor claramente definido este parámetro por lo que los equipos WiFi del mercado varían notablemente en la implementación del ACKTimeout de uno a otro.

Cuando una estación intenta enviar un paquete a otra que está demasiado distante como para recibir de ella el ACK antes de ACKTimeout, transcurrido este tiempo se interpretará que la transmisión falló y se retransmitirá, esto mismo le ocurrirá a cada retransmisión, cada paquete se retransmitirá el máximo número de retransmisiones antes de descartarse y dejar paso al siguiente.

La capa WiFi de la estación transmisora “creará” que no logró mandar el paquete, pero de hecho lo probable es que hayan llegado correctamente varias copias de éste, de las que la primera se pasará a la capa superior en el receptor. El resultado es que el enlace funciona, pero con un rendimiento despreciable debido a que todo se retransmite varias veces (por defecto 7 máximo).

- **Tiempo de ranura e IFS:** El valor del tiempo de ranura, de SIFS y de DIFS imponen restricciones al funcionamiento del MAC de WiFi a partir de ciertas distancias. El estándar prevé que las estaciones que transmiten son oídas por las otras dentro del mismo *slot* en que se ha producido la transmisión, lo cual impone un límite de unos 3Km. Más allá de esa distancia, las prestaciones de los enlaces empeoran con la distancia, aunque aún resultan utilizables si el número de nodos activos es suficientemente bajo.
- **La vulnerabilidad con nodos ocultos:** En IEEE 802.11 se emplea el mecanismo RTS/CTS para evitar colisiones entre nodos ocultos; no obstante, ese mecanismo funciona si el cómputo del NAV se corresponde con el tiempo que verdaderamente el canal va a permanecer ocupado; puesto que el NAV no se calcula teniendo en cuenta el tiempo de propagación, a medida que la distancia aumenta su efectividad empeora; en enlaces punto a multipunto con distancias del orden de kilómetros, el RTS/CTS es prácticamente inservible, y no hay un mecanismo alternativo.

En conclusión, WiFi puede servir, aunque con cierta pérdida de prestaciones, para enlaces punto a punto de larga distancia si los equipos terminales permiten configurar el *ACKTimeout*. Por el contrario, para punto a multipunto el funcionamiento es notablemente peor a menos que la carga ofrecida y el número de nodos sean muy bajos.

Capítulo 4

IEEE802.16 - WiMAX

4 IEEE802.16 - WiMAX

4.1 INTRODUCCIÓN

La primera versión del estándar IEEE802.16 fue escrita por el grupo de trabajo establecido por el IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) en 1999, donde nace esta tecnología como solución para redes metropolitanas, lo que supone alcances de decenas de kilómetros y tasas de transmisión de varios Mbps. Este grupo de trabajo pertenece al Comité de Estándares IEEE802 LAN/MAN. La familia de estándares IEEE802.16 es llamada oficialmente *WirelessMAN (Redes Metropolitanas Inalámbricas)*, y ha sido comercializado bajo el nombre de “*WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access)*” por una alianza de empresas llamada *WiMAXForum [WMXForum]*, cuya misión es promover y certificar la compatibilidad e interoperabilidad de los productos inalámbricos de banda ancha basados en los estándares IEEE802.16.

En principio, era una tecnología orientada a frecuencias de operación por encima de los 10GHz por lo que no tuvo mucho éxito. La enmienda del estándar en el año 2003 amplía la gama de trabajo a las frecuencias entre 2 y 10 GHz, lo que permite mayor alcance, además, junto con la técnica OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) se logra transmitir incluso en ausencia de línea de vista. Con esta enmienda se proponía resolver las limitaciones fundamentales que tiene IEEE802.11, alcance y calidad de servicio (QoS), como tecnología de acceso en exteriores. Para estos fines, WiMAX utiliza un método de acceso al medio totalmente distinto y contempla una gran variedad de técnicas de modulación y de compartición del canal, con gran versatilidad al ofrecer soluciones tanto en espectro libre como en bandas licenciadas.

La reciente publicación de IEEE802.16-2009⁴ deja como obsoletos las versiones de IEEE802.16-2004 y IEEE802.16-2005, que actualmente son los anexos sobre los que se basa WiMAX en acceso fijo y móvil, respectivamente. Es importante señalar que este último estándar (2009) no está implementado comercialmente, sin embargo, después de analizar el texto y consultar con varios fabricantes, se puede decir que los equipos existentes en el mercado que están implementados con IEEE802.16-2004, versión fija del estándar y objeto de estudio del presente Proyecto Fin de Carrera, son totalmente compatibles con la nueva versión del nuevo estándar.

Las implementaciones que se han hecho hasta el momento en frecuencias libres de licencia (nuestro caso 5,8GHz) son fijas (basadas en IEEE802.16-2004), puesto que las

⁴ *Version actual: Air Interface for Fixed and Mobile Broadband Wireless Access System (combinación de 802.16-2004, 802.16-2004/Cor 1, 802.16e, 802.16f, 802.16g y P802.16i)*

aplicaciones móviles no son viables en bandas libres, o dicho de otra forma, son solo aplicables en bandas licenciadas. Esto no se debe a un problema de interferencias o de uso restringido del espectro (aunque también es importante), técnicamente es imposible soportar aplicaciones móviles en bandas de frecuencia con limitación de potencia, como es el caso de las bandas libres.

Con lo anterior concluimos que el propósito del siguiente estudio teórico y la posterior comparativa entre tecnologías que se basan en IEEE802.11 y IEEE802.16 serán para acceso inalámbrico fijo, enfocado en aplicaciones de nuestro interés (Voz y Datos) en escenarios de zonas rurales y largo alcance.

En adelante nos referiremos al estándar IEEE802.16 como tal o por su nombre comercial, WiMAX, indistintamente.

4.2 ARQUITECTURA DE RED

La versión actual del estándar IEEE802.16 (2009) define las especificaciones para las múltiples capas físicas (PHY), la capa de acceso al medio (MAC), y la capa que ofrece el servicio de convergencia entre subcapas (CS) para el transporte de IP, Ethernet y ATM. La estructura de protocolos por capas (OSI) según el estándar corresponde a la Figura 28.

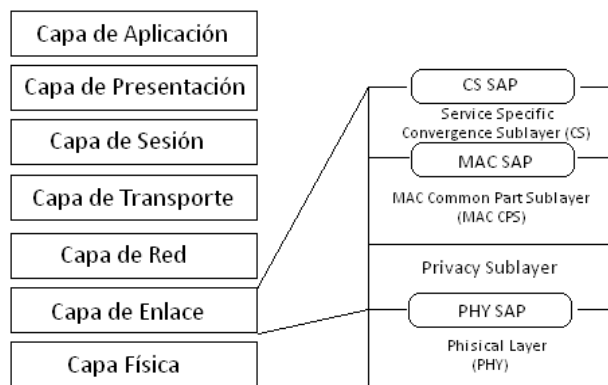


Figura 28. Estructura de capas en IEEE802.16

- **Convergente Sublayer (CS):** Los sistemas 802.16 deben soportar la operación con sistemas ATM o paquetizados (IP). La capa de convergencia es capaz de interactuar con estos dos modos de operación mediante el *Service Access Point* (CS-SAP). Por esta razón la función de la subcapa CS es interactuar entre las funciones de la capa MAC y la capa superior de la torre de protocolos.
- **MAC Common Part Sublayer (MAC CPS):** Esta subcapa es la más importante de la capa MAC. Contiene todas las funciones necesarias para realizar el intercambio de datos y el control de la capa MAC.

- **Privacy Sublayer:** Esta capa implementa todos los elementos requeridos de privacidad debido a la capa PHY. Por ejemplo: el intercambio de claves y los procesos de encriptado/descriptado. Está conectado a la capa PHY mediante el PHY SAP (*Service Access Point*).
- **PHY Layer:** Especifica las características de los diferentes modos de operación de la interfaz inalámbrica (o “aire”): WirelessMAN-SC, WirelessMAN-OFDM y WirelessMAN OFDMA.

4.2.1 ELEMENTOS DE LA RED

Se definen dos tipos de equipos en un sistema basado en IEEE802.16:

- **Estación base (BS - Base Station)** realiza las funciones de transmisión identificadas en el estándar IEEE802.16, además de proporcionar conectividad y mecanismos de control y gestión a las estaciones cliente.
- **Estación Suscriptor** o cliente (**SS - Subscriber Station**) también llamado **CPE – Customer Premises Equipment**, es la que incorpora las funciones del receptor identificadas en el estándar IEEE802.16 de forma que proporciona conectividad con la BS.

La Figura 29 muestra el esquema de interconexión entre los elementos de la red, SS y BS.

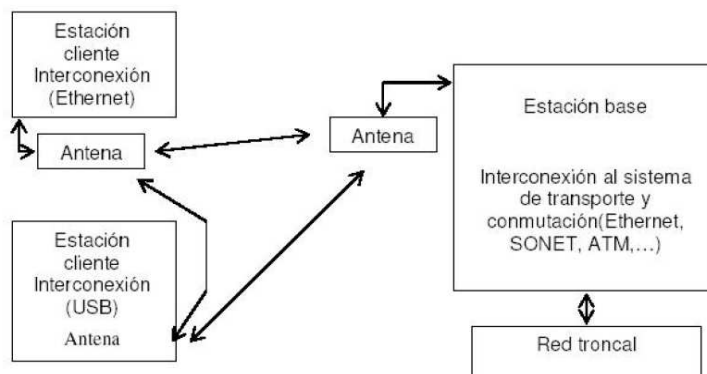


Figura 29. Esquema conexión entre SS y BS

4.3 ESTÁNDAR IEEE802.16

4.3.1 VISIÓN GENERAL

IEEE802.16 comercialmente llamado WiMAX, pertenece a la familia de estándares de LAN/MAN bajo el nombre de redes WMAN, que permite la conexión inalámbrica de banda ancha en una amplia zona de cobertura (áreas metropolitanas).

El IEEE define varios grupos de trabajo, dentro de la familia de 802 (LAN/MAN) tenemos la siguiente relación: IEEE802.11 (WLAN-Wireless Local Area Network - Local), IEEE802.15 (WPAN-Wireless Personal Area Networks - Personal), IEEE802.16 (WMAN-Wireless Metropolitan Area Network - Metropolitano), IEEE802.20 (BWA-Broadband Wireless Access - Móvil), IEEE802.22 (WRAN-Wireless Regional Area Network - Regional).

La Figura 30 ilustra gráficamente lo anterior:

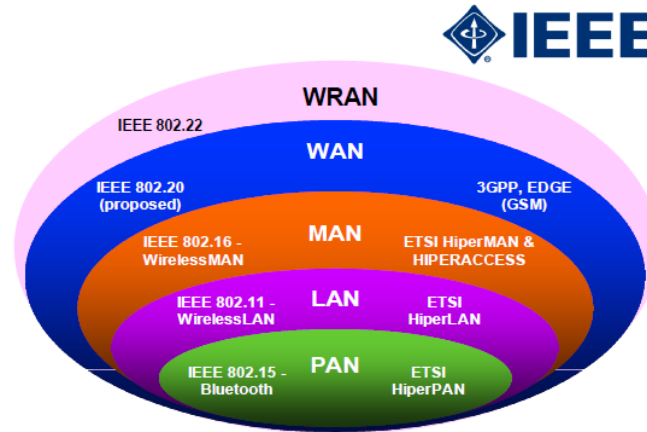


Figura 30. Estándares Inalámbricos – Cobertura

Como se ha explicado en el apartado de introducción, la última enmienda de este estándar es **IEEE802.16-2009**, aprobada en mayo 2009 que corresponde a una revisión del estándar IEEE802.16-2004, incluyendo funcionalidades móviles de IEEE802.16e (2005), bajo el título de: “Part 16: Air Interface for Broadband Wireless Access Systems” [IEEE1609].

WiMAX parece un concepto parecido a WiFi, y es inevitable su comparación. Se trata de dos tecnologías basadas en estándares del IEEE para redes inalámbricas, pero totalmente distintas en definición y operación. WiMAX no solo alcanza distancias mayores sino que su ancho de banda es superior, además de poder garantizar Calidad de Servicio (QoS). WiFi fue diseñado como una tecnología de interiores, como alternativa al sistema cableado. WiMAX, fue concebido como solución de última milla para redes metropolitanas.

WiMAX ofrece enlaces de PtP (Punto a Punto o “backhaul”) de hasta 50 km con capacidades de hasta 72 Mbps con LOS (*Line of Sight* o Línea de Vista) y rangos de NLOS (*Non Line Sight* o No Línea de Vista) de hasta 7 km para una distribución PtMP (Punto a Multipunto), (Figura 31). Es conveniente precisar que la técnica NLOS se puede utilizar en las frecuencias entre 2 y 11 GHz gracias a las funcionalidades de OFDM, mientras que en frecuencias de mayores a 11 GHz es posible solo utilizar modalidades LOS.

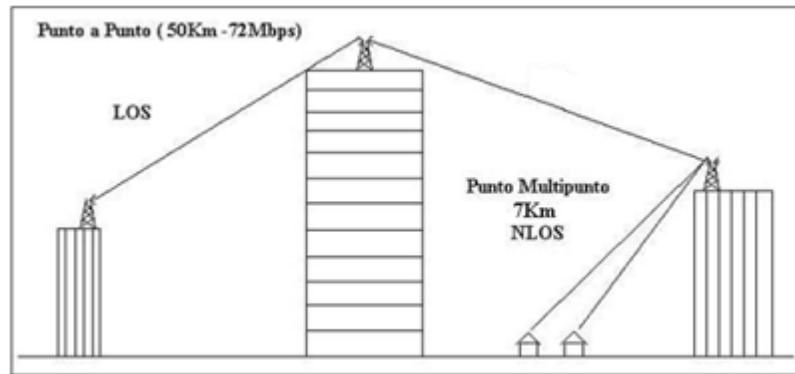


Figura 31. Esquema de propagación LOS y NLOS [OSIPTL]

Actualmente, esta tecnología es impulsada por la organización *WiMAXForum*, formado por un conjunto de más de 250 empresas cuyo propósito es certificar y promover la compatibilidad e interoperabilidad de los productos inalámbricos de banda ancha basados en el estándar IEEE802.16. Uno de sus principales propósitos es acelerar la introducción de estos sistemas en el mercado [WMXForum].

Son conocidas las características que este estándar ofrece para el acceso de banda ancha inalámbrico, además de sus ventajas frente a técnicas basadas en estándares parecidos. Algunas de las relevantes las señalamos a continuación:

- Utiliza la modulación OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) la que permite la transmisión en distintas frecuencias simultáneamente. Utiliza espaciado ortogonal con lo que se puede garantizar que no exista interferencia entre frecuencias.
- Soporta mecanismos de antenas inteligentes (MIMO - *Multiple-Input Multiple-Output*) que mejoran la eficiencia espectral en sistemas inalámbricos y distintos tipos de antenas.
- Soporta redes PtMP (Punto a Multipunto) y PtP (Punto a Punto).
- Es capaz de implementar Calidad de Servicio (QoS) para los operadores NLOS sin que la señal se distorsione severamente por la existencia de edificios y otras posibles causas de interferencia.
- Soporta las multiplexaciones TDM (*Time Division Multiplexing*) y FDM (*Frequency Division Multiplexing*), tal que permite la interoperabilidad entre los sistemas móviles (FDM) y los inalámbricos (TDM).
- Como medidas de seguridad, incluyen mecanismos de criptografía y seguridad propios del sistema.
- Posee un ajuste dinámico del tamaño del paquete de transmisión.
- Tiene aplicaciones de voz, datos y video.
- Un sistema que implementa IEEE802.16 (WiMAX) presenta técnicas de modulación adaptativa dependiendo de las condiciones de la relación señal a ruido (SNR).

- Técnicas como FEC (*Forward Error Correction*), codificación convolutiva, y otros algoritmos son usados para poder detectar y corregir errores, tal que ayudan a mejorar la SNR. Se incorpora, además, el ARQ (*Automatic Repeat reQuest*), para solucionar los errores que no puede solucionar la FEC.
- Se implementan algoritmos de control de potencia en las estaciones base de manera que sea posible regular los niveles de potencia en las SS (o CPE), de forma que la potencia recibida por la BS sea ya determinada. Con esto se logra un ahorro de la potencia consumida por parte de los CPE's.

4.3.2 EVOLUCIÓN DEL ESTÁNDAR

IEEE802.16 ha tenido varias revisiones o enmiendas, las más relevantes se resumen a continuación:

- **IEEE 802.16a**: publicada en Enero del 2003, éste estándar solo proporciona conectividad y es diseñado para aplicaciones de última milla. Soporta enlaces con y sin línea de vista (LOS y NLOS).
- **IEEE 802.16d**: publicada en Octubre del 2004, este estándar si proporciona cobertura y posee una velocidad de hasta 40Mbps. Así mismo proporciona accesos concurrentes en celdas, cuyos radios varían entre 3 Km. y 10 Km.
- **IEEE 802.16e**: publicada en Febrero del 2006, consiste en dar soporte de movilidad con un enlace asimétrico a las aplicaciones del estándar.
- **IEEE802.16j**: publicada en Junio 2009 se centra en la definición de multisaltos.
- **IEEE 802.16-2009**: se publica en Mayo 2009 como enmienda de IEEE802.16-2004. Especifica la interface aérea, incluyendo capa de acceso y control del medio (MAC) y capa física (PHY), combinando sistemas fijos y móviles de acceso PtMP de banda ancha que proveen múltiples servicios.

4.3.3 CAPA FÍSICA

En la capa física, el flujo de datos está formado por una secuencia de tramas de igual longitud. Los modos de operación FDD (*Frequency Division Duplexing*) y TDD (*Time Division Duplexing*), se consideran tanto para Uplink (UL) como para Downlink (DL).

En el modo **FDD**, las subtramas de UL y DL, son transmitidas simultáneamente y sin interferencia, ya que éstas son transmitidas a distintas frecuencias. En el modo **TDD**, las subtramas de UL y DL son transmitidas de manera consecutiva. Las longitudes de trama pueden ser de 0.5, 1 ó 2 ms [IEEE1609]. En este modo las posiciones de DL y UL pueden variar. En la Figura 32 se muestra el esquema y secuencia de las tramas.

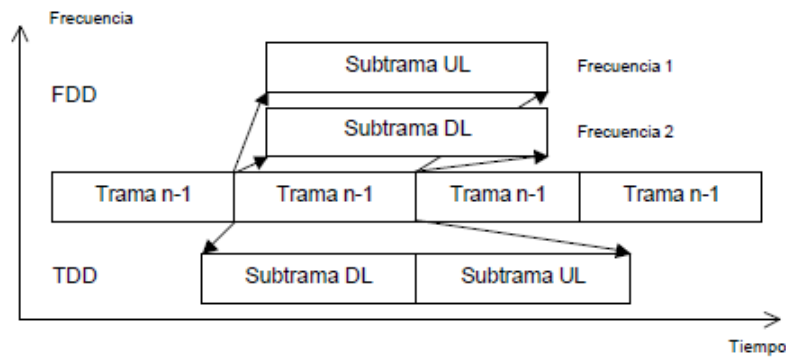


Figura 32. Esquema de FDD y TDD

En el estándar IEEE802.16 (versión 2009) se definen cuatro diferentes especificaciones para la capa física PHY que pueden usar en conjunto con la capa MAC para dar una conexión extremo a extremo fiable.

Estas especificaciones son las siguientes:

- **WirelessMAN-SC:** Se trata de la versión “*Single Carrier*” realizada para casos con línea de vista directa (LOS) en la banda de frecuencias de 10 a 66 GHz. Esta versión está enfocada para aplicaciones con flexibilidad de configuración, puesto que las antenas transmisora y receptora deben tener vista directa entre ellas, siendo esta una razón por la que la antena receptora debe situarse en lugares altos.
- **WirelessMAN-OFDM – 256 FFT:** Proyectada para operaciones sin línea de vista directa (NLOS) en bandas de frecuencias inferiores a 11 GHz (2-11GHz). Utiliza como base la modulación ortogonal (OFDM). Esta versión soporta subcanalización en el enlace uplink (UL), que representa una gran herramienta para la optimización en la cobertura del sistema.
- **WirelessMAN-OFDMA – 2048 FFT:** Soporta operaciones NLOS en bandas de frecuencias inferiores a 11 GHz (2-11GHz), y se basa en el esquema de múltiple acceso denominado OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*). Se trata de una extensión de la técnica OFDM para permitir el compartimiento del canal por múltiples usuarios. Además, soporta subcanalización en ambos enlaces, uplink (UL) y downlink (DL).
- **WirelessHUMAN:** Comprende funcionalidades específicas para funcionar en bandas sin licencia, siendo por esto llamada “*High Speed Unlicensed Metropolitan Area Network – HUMAN*”. Especifica la operación en las bandas 5 a 6 GHz, utilizando como base un esquema flexible de canalización que incluye canales de 10 y 20 MHz, con separaciones de 5 MHz.

La Tabla 1 muestra un resumen de las diferentes capas físicas, con las opciones soportadas por cada una de ellas, el rango de frecuencias y el modo de duplexado.

Descripción	Frecuencia	Opciones (apto.3.3.1.2)	Duplexión
WirelessMAN-SC (Release 1.0)	10-66 GHz	AAS ARQ STC	TDD FDD
Fixed WirelessMAN-OFDM	< 11 GHz bandas licenciadas	AAS ARQ STC	TDD FDD
Fixed WirelessMAN-OFDMA	< 11 GHz bandas licenciadas	AAS ARQ STC	TDD FDD
WirelessMAN-OFDMA TDD (Release 1.0)	< 11 GHz bandas licenciadas	AAS ARQ STC	TDD
WirelessHUMAN	< 11GHz bandas libres de licencia	AAS ARQ STC	TDD

Tabla 1. Tipos de capas físicas - Características [IEEE16d][IEEE1609]

En el estándar se define una quinta especificación como “Reservada”, en el antiguo estándar (IEEE802.16-2004) este lugar le correspondía a la especificación de *WirelessMAC-SCa*, suponemos que se implementará en próximas revisiones del estándar.

4.3.3.1 Tecnologías de Transmisión

4.3.3.1.1 OFDM (Ortogonal Frequency Division Multiplexing)

La tecnología OFDM (Multiplexación por División Ortogonal de Frecuencia), es en lo que se basa el interfaz físico *Wireless MAN-OFDM*, que está diseñada para enlaces NLOS. Esta tecnología cuenta con una cantidad de 256 subportadoras, para bandas de frecuencia por debajo de 11Ghz.

OFDM se basa en el principio de ortogonalidad de frecuencias adyacentes en el que cada una de ellas es modulada por un tren de datos de baja velocidad. Consiste en 256 portadoras, dentro de las cuales 8 son utilizadas como pilotos (-84, -60, -36, -12, 12, 36, 60, 84) y 56 portadoras son usadas como guardas, por lo tanto solo nos queda 192 portadoras para el transporte de datos.

En el dominio del tiempo la transformada inversa de Fourier (FFT) crea la forma de onda de OFDM cada intervalo de tiempo (T_s), tiempo conocido como tiempo útil de símbolo (T_b) mas una copia del último tiempo de guarda (T_g). El CP (prefijo cíclico) se utiliza para recorrer los múltiples caminos, mientras mantiene la ortogonalidad de los tonos.

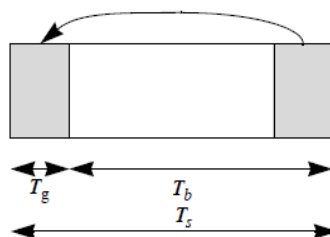


Figura 33. Estructura de símbolo OFDM (en tiempo) [IEEE16d][IEEE1609]

La energía del transmisor se incrementa con la longitud del tiempo de guarda, mientras la energía del receptor continúa sin variación. La codificación del canal es definida en 3 pasos:

- **Randomization:** se da en cada ráfaga de información, ya sea downlink (DL) o uplink (UL).
- **Codificación FEC:** consiste en una concatenación de un código *Reed-Salomon* de salida y un código interno de velocidad de conexión e interpolación compatibles.
- **Interleaving:** asegura que los bits adyacentes codificados sean mapeados en subportadoras no adyacentes. Así mismo evita la presencia de bits de poca confiabilidad, esto lo realiza mapeando una cantidad significativa de bits de constelación.

4.3.3.1.2 OFDMA (Ortogonal Frequency Division Multiple Access)

La tecnología OFDMA (Acceso Múltiple por División de Frecuencia Ortogonal), técnica base del tipo de interfaz físico *WirelessMAN-OFDMA PHY*, está diseñada para la operación NLOS para bandas de frecuencias debajo de 11 Ghz. En el caso de que se tratara de una banda licenciada, el ancho de banda permitido debe de limitarse por el ancho de banda provisional regulatorio dividido entre cualquier potencia de 2 no menor de 1 MHz. En este modo son soportados los tamaños 2048, 1024, 512 y 128 de FFT, lo que facilita el soporte de varios anchos de canal [IEEE1609].

Las subportadoras activas son divididas en subconjuntos de portadoras en donde cada una de estas será asignada a un canal diferente. Así mismo las portadoras que forman un canal no necesariamente deben de ser adyacentes.

Con respecto al dominio del tiempo, la estructura es la misma con respecto al OFDM, por tanto se corresponde en diagrama de estructura Figura 33. Así mismo el dominio de frecuencias y la codificación de canal tienen las mismas consideraciones que la técnica anterior, OFDM.

Algunas de las técnicas para compensar los efectos causados por la propagación multitrayecto se presentan a continuación:

- **AAS (Adaptive Antenna Systems)** para adaptar el diagrama de radiación a una dirección o direcciones particulares.
- **STC (Space Time Coding).** Mecanismos que realizan diversidad de transmisión.
- **ARQ (Automatic RepeatRequest):** Protocolos utilizados para el control de errores que retransmite aquellos paquetes que no llegaron correctamente a su destino.

4.3.3.2 Tipos de Modulación

En la arquitectura de WiMAX se usan diferentes normas propias de la familia IEEE802, especialmente 802.3 (Ethernet). En Ethernet la capa física (PHY) contiene los estándares de

medios físicos, como el cable clase 5 (propio de los servicios de conmutación local), es decir, tanto IEEE802.16 (WiMAX) como IEEE 802.11 (WiFi) son formas inalámbricas de Ethernet.

Se ha diseñado (por parte del *IEEE802.16 Working Group D*) un sistema para que en la máxima capacidad del sistema se ofrezca una confiabilidad del 99.999%, donde el nivel físico incluye OFDM, *Time Division Duplex* (TDD), *Frequency Division Duplex* (FDD), *Quadrature Phase Shift Keying* (QPSK) y *Quadrature Amplitude Modulation* (QAM).

De los tipos de modulación (BPSK, QPSK, 16QAM, 64QAM) que se usan de forma adaptativa en esta tecnología, BPSK es la menos eficiente, y se emplea donde las estaciones cliente (SS) están más alejadas de las estaciones base (BS), y por lo tanto se requiere mayor potencia para realizar la transmisión (P_{tx}). Por otro lado, se utiliza 64QAM, donde las SS están relativamente cerca del BS, y se requiere menos potencia para la transmisión. En la Figura 34 se muestran los tipos de modulación en función a su distancia con respecto a la BS.

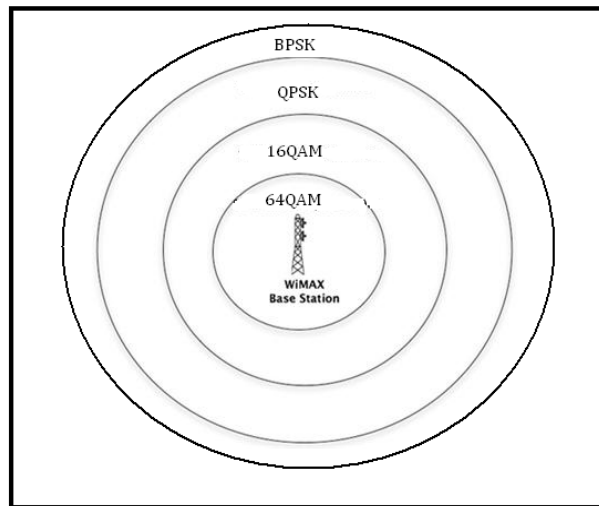


Figura 34. Tipo de Modulación según alejamiento de la BS [OSIPTL]

4.3.4 CAPA MAC

La capa MAC de IEEE802.16 está dividida en tres subcapas, tal como se puede observar en la Figura 28 y Figura 35, estas son:

1. **SS-CS (Service Specific Convergente Sublayer):** Se encarga de mapear cualquier información externa, recibida a través del punto de acceso a servicio MAC (MAC-SAP) para poder clasificarlas y asociarlas con su identificador de flujos de servicio (SFDI) correspondiente y otras veces serán asociadas con el identificador de conexión (CID).
2. **MAC CPS (MAC Common Part Sublayer):** Proporciona la funcionalidad central del sistema de acceso y la asignación del ancho de banda. Así mismo se encarga del establecimiento y mantenimiento de la conexión.

3. **Capa de Seguridad:** Esta capa provee autenticación, intercambio seguro de claves, encriptación y protección contra el robo del servicio. Para esto se cuenta con un protocolo de encapsulación para encriptar los datos a través de la red, para esto se cuenta con un juego de claves de encriptación, así como de algoritmos. Por otro lado también se cuenta con un protocolo de manejo de claves, el cual proporciona una distribución segura de la información de claves, este protocolo es llamado PKM (*Key Management Protocol*).

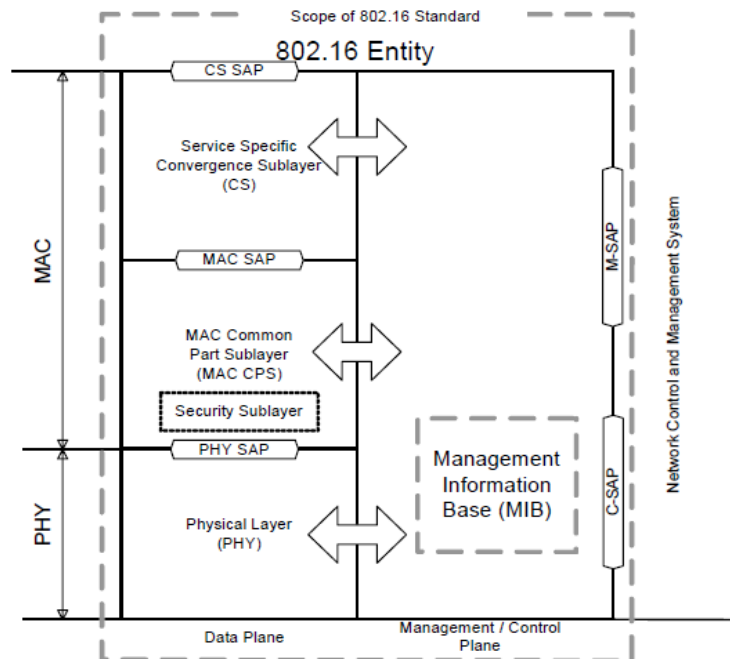


Figura 35. Estructura de capas MAC [IEEE1609]

La Figura 36 muestra un resumen de las funciones de las capas de convergencia y capa común de la MAC de 802.16.

Capa de convergencia				
IP	Ethernet	ATM	Clasificación de paquetes	Eliminación de cabeceras
Capa MAC				
Conexión a la red	Generar PDU	Reasemblar PDU	Control de conexión	
ARQ	Control privacidad y claves	Scheduling ráfagas PHY	Control de BW	
Capa física				

Figura 36. Funciones de las capas MAC

4.3.4.1 Topologías, Direccionamiento y Control

En el estándar IEEE802.16 (2009) se define la forma de operación **PtMP** (Punto a Multipunto), a pesar de no ser objetivo del presente proyecto de fin de carrera las estructuras *mesh*, es necesario indicar que a diferencia del estándar anterior IEEE802.16-2004, en este nuevo estándar no se incluye la operativa *mesh* que al igual que la especificación *WirelessMAN-SCa*, no existen en esta nueva enmienda, marcando estos dos apartados como *Reserved* suponemos que en revisiones posteriores se incluirán, pero actualmente no existen. Por tanto nos centraremos exclusivamente en esta operativa, PtMP.

La estructura PtMP está compuesta por una estación base (BS) y una antena sectorizada, la cual puede manejar simultáneamente múltiples sectores independientes. En un mismo sector de la antena todas las estaciones suscriptoras (SS) podrán recibir la misma información. La SS tendrá que tener una dirección MAC universal de 48 bits, la que será usada como parte del proceso de autenticación con la BS. Finalmente es necesario indicar que en cada sector los usuarios se adhieren a un protocolo de transmisión que controla la contención entre estos. La conexión se da por un identificador de conexión (CID) de 16 bits.

4.3.4.2 Formato de tramas PDU (Protocol Data Unit)

Las tramas PDU cuya estructura la tenemos en la Figura 37, están formadas por:

- **MAC Header:** es un campo de longitud fija.
- **Payload:** campo opcional y de longitud variable.
- **CRC:** campo opcional. El CRC (*Cyclic Redundancy check*), el cual es un mecanismo de control de errores.

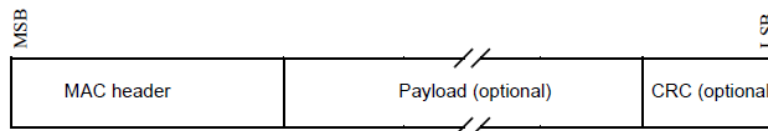


Figura 37. Formato de PDU MAC [IEEE1609]

La PDU de la MAC es la unidad de datos que intercambian la capa MAC de la BS y la del SS. Consiste en una cabecera de MAC de longitud fija y una carga útil de longitud variable y un ciclo redundante de control (CRC).

Dos formatos de cabecera son diferenciados (*HT-Header Type*): cabecera genérica y cabecera de requerimiento de ancho de banda. Donde se utilizan tres tipos de subcabeceras de la MAC:

- *Subcabecera de gestión de concesión:* es usada por la SS para transportar la gestión de ancho de banda necesaria por su BS.

- *Subcabecera de fragmentación (fragmentation)*: contiene información que indica la presencia y orientación en la carga útil de cualquier fragmento de SDU (*Service Data Unit*).
- *Subcabecera de empaque (packing)*: usada para indicar el empaquetamiento de múltiples SDU's en un único PDU.

Las cabeceras de gestión de concesión y de fragmentación pueden ser insertadas en el PDU de la MAC inmediatamente después de la cabecera genérica, y así indica el tipo de HT. La subcabecera de empaque puede ser insertada después de cada SDU de la MAC y es indicada por el tipo de HT.

4.3.4.2.1 Transmisión de tramas PDU

La MAC del estándar IEEE 802.16, soporta varios protocolos de capas superiores así como ATM o IP. Para que el proceso sea flexible y eficaz, se incorporan los procesos de fragmentación y de empaquetamiento. El proceso de fragmentación es donde un SDU de MAC es dividido en fragmentos. Y el proceso de empaque es en el cual varios SDU's de la MAC son empaquetados en una sola carga útil de PDU de la MAC.

Ambos procesos pueden ser usados tanto para downlink (DL) como para uplink (UL). El estándar IEEE 802.16 permite el uso de ambos procesos simultáneamente para un eficiente uso del ancho de banda, además de ser diseñado para soportar tanto FDD como TDD.

La MAC de la BS se encarga de crear una trama Downlink (*frame DL*), empezando con un preámbulo que es usado para la sincronización y la estimación del canal. Una cabecera de cuadro de control (*FCH-Frame Control Header*) es transmitida después del preámbulo para el resto de la trama. Esto es requerido debido a que la trama es transmitida con diferentes esquemas de modulación y codificación. El FCH es seguido por una o múltiples tramas DL las cuales consisten de un número entero de símbolos OFDM.

La localización del perfil de la primera trama de DL es especificada en el cuadro prefijo del downlink (*DLFP- Downlink Frame Prefix*), que forma parte del FDH.

La trama de datos es transmitida en orden de decrecimiento de robustez para permitir que el SS reciba datos confiables antes de arriesgar un error de trama que podría causar pérdida de sincronización. En el DL, una porción del TDM inmediatamente seguida del FCH es usada para UGS (*Unsolicited Grant Service*), útil para aplicaciones constantes de tipo binario con estrictas restricciones de retardo como la *VoIP*.

4.3.4.3 Mecanismo de Petición y Asignación de Ancho de Banda

Los requerimientos de ancho de banda de las SS pueden variar en el tiempo. Cuando esto sucede, la SS realiza una solicitud de aumento de ancho de banda a la BS. Las peticiones de ancho de banda pueden ser:

- **Incrementales**: la BS le añadirá según lo que crea que necesita la SS.

- **Agregables:** la BS añadirá lo que solicite explícitamente la SS.

Debido a la naturaleza del protocolo de petición y asignación de ancho de banda, la SS debe utilizar periódicamente peticiones de agregación. La periodicidad depende de la calidad del enlace y de parámetros de QoS.

Independientemente del tipo de solicitud realizada por la SS se pueden diferenciar dos modos de trabajo:

1. **Modo de petición para conexión** (*Grant Connection mode – GPC*), en este caso la BS asigna el ancho de banda a la conexión específica que lo solicita.
2. **Modo de petición para estación cliente** (*Grant per Subscriber Station Mode – GPSS*), el ancho de banda se asigna a la SS para que lo comparta con todas las conexiones que mantenga. Este modo puede ser útil para aplicaciones en tiempo real que requieren una respuesta rápida del sistema.

Las SS del tipo GPSS deben tener implementados sistemas más “inteligentes” para utilizar el ancho de banda que le ha asignado la BS para cada una de las conexiones, factor que puede restar eficiencia en el uso del ancho de banda. Por el contrario las del tipo GPC son más eficientes pero menos escalables puesto que es necesario indicar peticiones de ancho de banda para cada una de las conexiones que esté controlando en un determinado momento la estación cliente.

4.3.5 UTILIZACIÓN DEL ESPECTRO

Que haya una entidad que se encargue de garantizar la interoperabilidad entre los equipos que implementen IEEE802.16 (*WiMAXForum*), esto no implica que sea aceptada a nivel mundial. Las bandas de frecuencias de radio varían según la legislación de cada país, son las autoridades de cada región las que determinan el uso del espectro en su estado.

Existen bandas de frecuencia que pueden ser licenciadas o libres de licencia. Una empresa puede utilizar tanto un espectro licenciado o no licenciado, la diferencia entre uno y otro es que el espectro no licenciado es gratuito, es decir, no tiene un costo asociado a la utilización del espectro, lo cual reduce el costo de usuario que utiliza un servicio, sin embargo no está libre de posibles interferencias entre empresas operadoras.

Actualmente el estándar está enfocado en porciones del espectro que están en el rango de 2 a 6 GHz, bandas centimétricas donde el rango de los anchos de banda asignados son estrechos en comparación con los anchos de banda asignados entre 10 a 60 GHz bandas milimétricas. Las bandas milimétricas al tener bandas más amplias adecuan mejor mayores cantidades de información. Por lo que estas son usadas para sistemas con LOS y tasa de datos mayores. Mientras que las bandas en centímetros tienen muy buen desempeño para PtMP, NLOS y distribución en la última milla.

El ámbito de trabajo de este proyecto son las zonas rurales de la Sierra Peruana, Cusco, por lo que se hará especial mención a la asignación y gestión del espectro que se da en este país.

4.3.5.1 Distribución de Frecuencias

- Distribución de frecuencias en el rango de 2 a 6GHz:
 - **3.5GHz:** esta banda es un espectro licenciado que está disponible en muchos países de Europa y Asia. Esta banda tiene un ancho de 300MHz para el rango de 3.3 a 3.6GHz, ofrece gran flexibilidad para un gran portador para los servicios de la WAN. Cabe destacar que en el Perú se encuentra disponible la banda de (3.4-3.6) GHz para servicios públicos.
 - **Bandas de 5GHz U-NII & WRC:** la U-NII (*Unlicensed Nacional Information Infrastructure*), tiene las tres mayores bandas de frecuencia: Bandas U-NII bajas y medias (5150-5350 MHz), WRC (*World Radio Conference*) (5470-5725 MHz) y la banda superior U-NII/ISM (5725-5850 MHz). WiFi opera en el rango de bajas y medias.
 - **WCS** (*Wireless Communication Service*): Presenta dos bandas angostas gemelas de 15MHz que van de 2305 a 2320 y 2345 a 2360MHz. El espacio entre estas bandas fue atribuido para la DARS (*Digital Audio Radio Service*), lo que puede ser una fuente de posibles interferencias causadas por las repetidoras terrestres. El uso de estas bandas requiere una excepcional eficiencia en el uso del espectro, como son ofrecidas por OFDM.
 - **2.4GHz ISM** (*Industrial, Scientific and Medical*): la banda de 2.4GHz ISM es no licenciada y ofrece aproximadamente un ancho de banda de 80MHz. Esta banda es usada para WLAN.
 - **MMDS** (*Multichannel Multipoint Distribution Service*): este espectro incluye 31 canales separados 6MHz entre el rango de 2500 y 2690MHz e incluye al ITFS (*Instructional Televisión Fixed Service*). Se espera que esta banda tenga un significado comercial importante en los próximos años.

Desde el *WiMAXForum* se enfocando en las frecuencias de: MMDS, la banda licenciada de 3.5GHz, y la banda no licenciada mayor de U-NII 5GHz., por presentar menor interferencia, razonables niveles de potencia y un adecuado ancho de banda.

Esto podría ayudar a que WiMAX tenga una alta tasa de crecimiento a nivel mundial, por presentar un gran potencial comercial y actualmente a diferencia de unos años atrás (4 años) su precio ya no es prohibitivo y con tendencia decreciente en el tiempo. Por estas razones las expectativas del mercado para esta tecnología pueden ser buenas. Es interesante este matiz en zonas de rurales donde se habla de alcances con rangos mayores de 50 km y necesidad de servicios con QoS.

Esto podría contribuir al desarrollo tecnológico de zonas aisladas de a nivel mundial, tal como veremos en los próximos capítulos WiMAX se implementa cada vez con mas en países emergentes, como en África y Sudamérica.

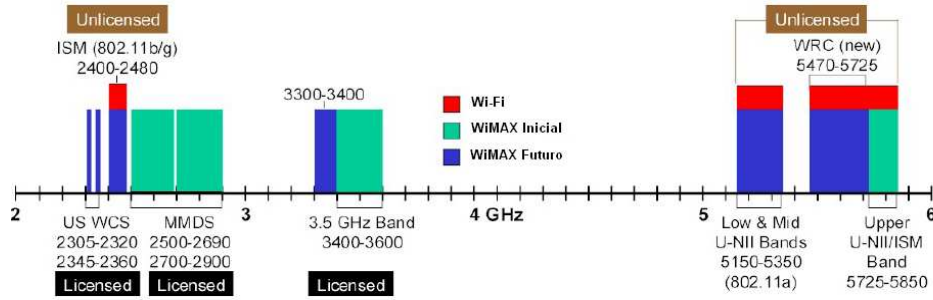


Figura 38 Utilización de bandas en WIMAX [FUJIT]

4.3.5.2 Distribución de frecuencias en Perú

En el Perú se ha definido que la banda de 3.4 GHz - 3.6 GHz, para los servicios de acceso fijo inalámbrico, el cual ha sido establecido por vía legislativa. La asignación para cada una de estas bandas se hace por concurso público, ante el Ministerio de Transportes y Comunicaciones.

Por otro lado la banda de 3400 a 3500 MHz es usada para el enlace de subida (UL) y la banda de 3500 a 3600 MHz es usada para el enlace de bajada (DL). A continuación, en la Tabla 2 y Tabla 3 se muestra la situación actual de la asignación de frecuencias en las bandas de 3400- 3500 MHz y 3500-3600 MHz.

UPLINK			
EMPRESA	BANDA	FRECUENCIA	ÁREA DE ASIGNACIÓN
Nextel del PERÚ S.A	A	3400 - 3425	Dptos: Lima, Ancash, Arequipa, Ica, La Libertad, Lambayeque, Piura y Tacna
Telefónica del PERÚ	B	3425 - 3450	Nivel Nacional
Americatel PERÚ S.A	C	3450 - 3475	Dptos: Lima y Callao, Arequipa, Ica La Libertad y Lambayeque
Telmex PERÚ S.A	D1	3475 - 3480	Provincias: Lima, Callao, Arequipa, Cajamarca, Cusco, Trujillo, Chiclayo, Maynas Piura y Coronel Portillo
	D2	3480 - 3485	Provincias: Lima, Callao, Arequipa, Cajamarca, Cusco, Trujillo, Chiclayo, Maynas Piura y Coronel Portillo
	D3	3485 - 3490	Provincias: Lima, Callao, Arequipa, Cajamarca, Cusco, Trujillo, Chiclayo, Maynas Piura y Coronel Portillo
	D4	3495 - 3495	Provincias: Lima, Callao
	D5	3495 - 3500	Provincias: Lima, Callao

Tabla 2. Asignación de Frecuencias (3400-3500MHz) UPLINK – PERÚ [MTCPE]

DOWNLINK			
EMPRESA	BANDA	FRECUENCIA	ÁREA DE ASIGNACIÓN
Nextel del PERÚ S.A	E	3500 - 3525	Dptos: Lima, Ancash, Arequipa, Ica, La Libertad, Lambayeque, Piura y Tacna
Telefónica del PERÚ	F	3525 - 3550	Nivel Nacional
Americatel PERÚ S.A	G	3550 - 3575	Dptos: Lima y Callao, Arequipa, Ica La Libertad y Lambayeque
Telmex PERÚ S.A	H1	3575 - 3580	Provincias: Lima, Callao, Arequipa, Cajamarca, Cusco, Trujillo, Chiclayo, Maynas Piura y Coronel Portillo
	H2	3580 - 3585	Provincias: Lima, Callao, Arequipa, Cajamarca, Cusco, Trujillo, Chiclayo, Maynas Piura y Coronel Portillo
	H3	3585 - 3590	Provincias: Lima, Callao, Arequipa, Cajamarca, Cusco, Trujillo, Chiclayo, Maynas Piura y Coronel Portillo
	H4	3595 - 3595	Provincias: Lima, Callao
	H5	3595 - 3600	Provincias: Lima, Callao

Tabla 3. Asignación de Frecuencias (3500-3600MHz) DOWNLINK – PERÚ

Un resumen del espectro radioeléctrico que se maneja en Perú, que afecta directamente a todas las tecnologías inalámbricas de comunicación, es:

Perú	2.3 GHz WiMAX	2.4GHz Wi-Fi	2.5GHz WiMAX	3.5GHz WiMAX	5.4GHz Wi-Fi	5.8GHz WiMAX
Uso		Libre		Licenciado	Libre	Libre

Tabla 4. Espectro radioeléctrico PERÚ [OSIPTL]

4.3.6 CALIDAD DE SERVICIO (QoS – Quality of Service)

La introducción de calidad de servicio (QoS) dentro de la capa MAC del estándar WiMAX es quizá el punto clave de este estándar. La capa MAC está orientada a conexión, y de este modo es posible ofrecer servicios de flujo constante característicos de ATM, o servicios de tiempo real en los que no se permite una latencia muy grande, como los servicios de voz sobre IP (VoIP).

Cada conexión de subida (UL) tiene asociado un servicio de programación que permite mejorar la eficiencia de los procesos de petición y concesión de ancho de banda. Durante el establecimiento de la conexión se negocian las necesidades del servicio y los parámetros QoS asociados. De este modo, la BS pueden anticipar las necesidades de velocidad y de retardo del tráfico de subida y actuar en consecuencia.

Se consideran cuatro servicios básicos:

1. El servicio no solicitado de concesión (**Unsolicited Grant Service – UGS**), pensado para servicios que generan unidades fijas de datos periódicamente. La BS asegura el

cumplimiento de los parámetros de conexión sin necesidad de efectuar peticiones, con lo que se elimina la sobrecarga y la latencia debida a los mensajes de petición. Generalmente, este modo se aplica a conexiones ATM CBR y a circuitos E1/T1 sobre ATM [FundWMX].

2. El servicio de peticiones en tiempo real (**Real-Time Polling Services – rtPS**), diseñado para servicios de tiempo real que generan periódicamente paquetes de tamaño variable, por ejemplo, transmisión de flujos de datos de video, voz sobre IP, etc. Las SS solicitan el ancho de banda que necesitan y la BS le concede sólo lo que realmente necesitan. Las peticiones aumentan la sobrecarga y la latencia del protocolo, pero este sistema optimiza el transporte de datos [FundWMX].
3. El servicio de peticiones en tiempo no real (**Non-Real-Time Polling Services – nrtPS**), es parecido al anterior, pero con la diferencia que las SS pueden intentar utilizar ancho de banda sobrante enviando peticiones a la BS. Está pensado para aplicaciones que toleran retardos largos, por ejemplo servicios FTP (Protocolo de transferencia de archivos - *File Transfer Protocol*) de banda ancha, o ATM GFR [FundWMX].
4. Servicios de mínimo esfuerzo (**Best Effort Service – BE**), no se garantiza la velocidad ni los retardos. Las SS envían peticiones cuando tienen la oportunidad. Los elementos clave de este servicio son velocidad mínima reservada, velocidad máxima sostenida y la prioridad de acceso [FundWMX].

La Tabla 5 resume las características de los servicios de programación de subida de datos.

SERVICIO	PETICIÓN DENTRO DE LA CONEXIÓN	APROBACION DE ANCHO DE BANDA	SOLICITUD (Polling)
UGS	No permitida	No se permite	Se utiliza el bit PM para solicitar ancho banda para conexiones no-UGS individuales
rtPS	Permitida	Se permite para el modo GPSS	Sólo se permite realizar solicitudes para conexiones individuales
nrtPS	Permitida	Se permite para el modo GPSS	El servicio obliga a que sólo se puedan realizar peticiones para conexiones individuales, o bien permitir cualquier otro tipo de conexiones
BE	Permitida	Se permite para el modo GPSS	Se permite cualquier tipo de conexión

Tabla 5. Servicios de QoS [IEEE16d] [IEEE1609]

El mecanismo principal para proporcionar QoS es asociar a los paquetes que atraviesen la interfaz MAC con un flujo de servicio. Las BS y las SS proporcionan el QoS de acuerdo con el conjunto de parámetros QoS definido por el flujo de servicio.

El Flujo de Servicio (*SF - Service Flow*) se define como un flujo bidireccional de paquetes con unos parámetros de QoS determinados. Cada uno de los flujos de servicio se

identifica con el SFID (*Service Flow Identifier*), además de un CID (*Connection Identifier*) si éste está activo. Los paquetes de la capa MAC incluyen el identificador de conexión CID de manera que son asignados al tipo de tráfico que se entregará en función de los parámetros de QoS del servicio (UGS, rtPS, nrtPS, BE).

El flujo de servicio es el concepto principal del protocolo MAC. Por ejemplo, un flujo de servicio puede estar asociado con varias o con ninguna PDU, pero una PDU sólo puede tener asociado un flujo de servicio.

Aunque hay más flujos de servicio, se deben destacar tres tipos básicos:

- **Flujos de servicio previstos:** la BS asigna un SFID a cada flujo de servicio previsto, pero no le reserva recursos hasta que se activa.
- **Flujos de servicio aceptados:** este protocolo permite un modelo de activación de dos fases: inicialmente, se admiten los flujos, y posteriormente, cuando se completa la negociación entre los dos extremos, se activan los flujos.

Con este modelo se consigue:

- o Reservar los recursos hasta que el proceso de conexión no se haya completado adecuadamente.
 - o Efectuar comprobaciones de acceso y controles de uso de recursos lo más rápidamente posible.
 - o Prevenir la posibilidad de robo de servicios por parte de terceros no autorizados.
- **Flujos de servicios activos:** tienen definidos los conjuntos de parámetros QoS y asignados los recursos que necesitan para transportar los paquetes de datos.

4.3.7 SEGURIDAD EN LA REDES WIMAX

IEEE802.16 incorpora mecanismos de seguridad dentro de la definición de los protocolos de la capa MAC, concretamente se define la capa *Security Sublayer*. En cuanto a seguridad el método más seguro para proteger las comunicaciones de los usuarios de redes es la encriptación de los flujos de datos entre la estación base (BS) y la estación cliente (SS), de tal forma que la red este protegida de accesos no autorizados, intrusos y posibles robos de servicios.

Para la autenticación se utiliza un protocolo de gestión de claves cliente-servidor en el cual la BS se encarga de la distribución del material de encriptación, protegido por claves, a las SS's. La robustez de estos mecanismos se incrementa añadiendo la autenticación de los clientes mediante certificados digitales.

Los mecanismos de seguridad ofrecidos por sistemas WiMAX, son:

1. Asociaciones de Seguridad (*SA-Security Association*)

Una asociación de seguridad es un conjunto de informaciones de seguridad que comparten una estación base y una, o más, estaciones cliente con el objetivo de

proporcionar comunicaciones seguras. De esta manera se identifican todos los parámetros de seguridad ligados a las conexiones entre BS y una o más SS.

Las SA se identifican por identificadores SAID (*Security Association Identifier*), y se definen tres tipos de SA:

- Primarias, durante el proceso de inicialización de la SS se establece una asociación primaria de seguridad que es exclusiva.
- Estáticas, las proporciona la estación base.
- Dinámicas, las establece y las elimina dinámicamente la BS como respuesta al inicio y a la finalización de flujos de servicios concretos.

La BS es la responsable de mantener información de todas las asociaciones de seguridad y además ha de asegurar que una SS sólo tenga acceso a las SA que ha sido autorizada. El material de encriptación (ej. las claves DES (*Data Encryption Standard*) y el VI (Vector de Inicialización)), tienen una fecha de expiración que la marca la BS. La SS ha de pedir nuevo material antes de que finalice este periodo. En el caso de que no se disponga del nuevo material de encriptación antes de la fecha, la SS ha de volver a entrar en la red.

2. Protocolo de autenticación

El proceso de autenticación de una SS se basa en el intercambio de certificados digitales, claves de reconocimiento, claves para encriptar claves, claves de autenticación de mensajes y la información sobre los protocolos que aceptan tanto la BS como la SS.

Las estaciones cliente utilizan el *Privacy Key Management* (PKM) para obtener de la BS autorizaciones y el material para encriptar el tráfico, e implementan las funciones necesarias para permitir la reautorización periódica y la renovación de claves.

El protocolo PKM utiliza:

- Certificados digitales X.509 (IETF RFC 22459)
- El algoritmo RSA de encriptación de clave pública (PKCS #1)
- Algoritmos simétricos robustos para el intercambio de claves entre BS y SS.

Funciona según el modelo **cliente – servidor**: la estación cliente (el cliente PKM) pide el material de encriptación a la estación base (el servidor PKM), que responde asegurándose de que cada cliente recibe únicamente autorizado para él.

Básicamente, el funcionamiento del proceso es el siguiente:

- Durante el proceso inicial de intercambio de autorizaciones la BS autentica la SS a partir de su certificado digital. Cada SS tiene un certificado digital X.509 único proporcionado por el fabricante, que contiene la clave pública de la SS y dirección MAC. Cuando la SS quiere una clave de autorización ha de presentar el certificado digital a la BS.

- La BS comprueba el certificado digital y utiliza la clave pública de la SS para encriptar la clave de autorización, que envía a la estación cliente como respuesta.
- La BS asocia la estación cliente autenticada con un cliente de pago y permite la utilización de todos los servicios que este cliente tiene autorizados. El uso conjunto de los certificados digitales y este mecanismo protege contra la suplantación de identidad por clonación de estaciones cliente.

3. Cifrado de los datos

La encriptación se aplica únicamente a los datos generales del servicio, en concreto a la carga de datos de las PDU MAC. La cabecera genérica MAC, todos los mensajes MAC de gestión y el CRC, se mandan en texto claro para facilitar el registro, acceso y las operaciones normales de la subcapa MAC.

El estándar define dos formas de encriptar los datos:

- *Data Encryption Standard (DES)* en modo *Cipher Block Chiang (CBC)*.
- *Advances Encryption Standard (AES)* en modo *Counter with CBC-MAC (CCM)*

Capítulo 5

Análisis DAFO de IEEE802.11 y IEEE802.16

5 ANÁLISIS DAFO

Según la definición de DAFO se refiere a una metodología de estudio de la situación competitiva de una empresa, nosotros lo aplicaremos a una tecnología, en su mercado (situación externa) y de las características internas (situación interna) de la misma, a efectos de determinar sus Debilidades-Fortalezas (internas) y Amenazas-Oportunidades (externas).

Desde mi punto de vista se hace necesario incluir una comparativa teórica entre las dos tecnologías a priori del trabajo realizado, para ello se ha escogido un modelo económico que muestra directamente cuales son las características positivas y negativas de estas tecnologías, en general y en el caso de largas distancias.

5.1 DAFO de WIFI

- Debilidades
 - No ofrece QoS ni diferenciación de flujos de servicio.
 - No es muy estable en cuanto a *throughput* en largas distancias.
 - La MAC de 802.11 presenta grandes limitaciones en enlaces largos como también en topologías PtMP.
- Fortalezas
 - Precio, es una tecnología de larga distancia muy competitiva en coste. Es la prefería en despliegues de larga distancia por su aplicabilidad en largo alcance. Característica que le permite mantener el dominio del mercado inalámbrico de largo alcance.
 - Trabaja en bandas ISM aunque con ciertas limitaciones de potencia.
 - Hardware fácilmente integrable en sistemas que soporten condiciones de clima adverso (ej. Cajas usadas en despliegues del grupo GTR).
 - Una clara ventaja de esta tecnología es el bajo consumo de potencia que tiene.

- Tecnología con gran éxito en el mercado, estandarizada y de fácil configuración esto influye directamente en el bajo coste de los equipos.
- Amenazas
 - MAC, su modo de acceso al medio supone una amenaza comparativa con otras tecnologías inalámbricas.
- Oportunidades
 - La continua actualización del estándar, y su nueva versión 802.11n con prestaciones similares a WiMAX la hacen competitiva con esta tecnología.
 - Y estándares que implementa QoS como 802.11e, a pesar de ser aun estadística, porque la tecnología de MAC no cambia, ya ofrece QoS para los servicios.

5.2 DAFO de WIMAX

- Debilidades
 - Su precio aun no es competitivo como el de WiFi y tardará en serlo si alguna vez se puede ofrecer equipos WiMAX a precio de WiFi.
- Fortalezas
 - Posibilidad de brindar servicios con QoS garantizada. Diferenciación de flujos.
 - Estándar específicamente diseñado para largas distancias. No necesita adaptación de fabricantes o propietarias como WiFi.
 - MAC determinista, total control de SS y apropiada para soluciones PtMP.
 - Instalaciones de BS y CPE rápidas sencillas y con interfaces de gestión gráficos e intuitivos.
 - Mayor ancho de banda, mayor *throughput*, variedad de anchos de canal y modulaciones adaptativas.
 - Clara ventaja en número de usuarios, como se trata de una tecnología celular donde la BS controla a usuarios y trafico, esta puede teóricamente soportar más de 64 usuarios por sector, en una topología PtMP.
 - Utiliza varios tipos de capa física, entre ellos el más importante utiliza la técnica OFDM que permite modulaciones ortogonales, modulación adaptativa y mejora en la tasa de bits a nivel físico.

- Amenazas
 - Es previsible que, incluso en largo plazo, WiMAX no cubra un escalón de costo que supone sus despliegues y siga siendo desplazado por WiFi en escenarios rurales.
- Oportunidades
 - Posibilidad de movilidad.
 - La economía de escala en la que se mueve su mercado hace que cada año el precio de los equipos bajen.

Parte III:

Descripción del trabajo realizado

*The Master said: "shall I teach you what knowledge is?
When you know a thing, to recognize that you know it,
and when you do not know a thing, to recognize that you do
not know it. That is knowledge."*

Confucio

Capítulo 6

Propuesta de Red Willay con IEEE802.16 - WiMAX

6 Red Willay en IEEE802.16-WiMAX

6.1 SITUACIÓN ACTUAL

Se describirá a continuación el estado, servicios y funcionamiento actual de la red de Willay.

La red WIFI para comunicaciones de voz y datos implementada en la provincia de Acomayo en la Capital de Provincia y los Distritos de Pomacanchi y Sangarará (Cusco - Perú), está enmarcada dentro del *Programa Willay* y del *Proyecto "Willay Cusco: Refuerzo institucional de entidades públicas de Acomayo a través de servicios de telecomunicación e información"*.

Dentro de los actores implicados en el Programa WILLAY tenemos a: ISF-Ingeniería Sin Fronteras (España y Perú), Fundación EHAS, GTR-Grupo de Telecomunicaciones Rurales de la Pontificia Universidad Católica del Perú y CEDITER - (Centro de Investigación en Comunicaciones Rurales) de la Universidad San Antonio Abad del Cusco.

El objetivo general del proyecto radica en demostrar que el uso "*adecuado*" de las TIC se puede mejorar el sistema de atención al público local en las zonas rurales de América Latina. Se plantea el uso de sistemas mixtos de comunicación de voz y datos a través de sistemas inalámbricos. Otro de los objetivos del Proyecto es la capacidad de ampliación, además de ser ejemplo a seguir para futuros proyectos en zonas parecidas.

6.1.1 SERVICIOS WIFI-RED WILLAY

6.1.1.1 SERVICIO DE VOZ-IP

Telefonía sobre IP (VoIP) permite a los usuarios realizar y recibir llamadas usando el Protocolo de Internet, también permite integrar voz con aplicaciones de datos. Con este servicio se elimina el costo de usar la PSTN⁵, simplificando el sistema de llamadas a equipos conectados a la misma red o conectados a través de Internet, se utilizan pasarelas de información para realizar llamadas hacia la PSTN.

⁵ Red Telefónica Pública Conmutada

6.1.1.2 SERVICIO DE DATOS SOBRE WIFI

La certificación WIFI se da a equipos que cumplen el estándar de redes inalámbricas IEE 802.11 a/b/g y permiten la interoperabilidad entre ellos con características parecidas. La red trabaja en banda libre de 5.8GHz (ISM), la norma que se utiliza es IEE 802.11b, por tanto, se puede transmitir a velocidades de hasta 11Mbps.

6.1.2 DESCRIPCIÓN TECNOLÓGICA

6.1.2.1 Placas y Tarjetas Inalámbricas

El objetivo de este apartado será la descripción de la tecnología utilizada tanto en Willay como en los despliegues implementados desde GTR-PUCP.

Los routers inalámbricos utilizados en el grupo para redes de largo alcance, se componen de placas tipo SBC (*Single Board Computer*) que se presentan en la Tabla 6, la misma relación se presenta en la Tabla 7 para tarjetas inalámbricas [WiLD09]. La necesidad de comunicaciones inalámbricas de largo alcance hizo que se desarrollaran sistemas operativos de desarrollo propietario como *RouterOS (Mikrotik)*[MIKRO], además de varias versiones que corren en Linux entre ellas el *Debian Voyage Linux [VOYAG]*.

Equipo	RAM del Sistema	Puertos Ethernet	Alimentación	Sistema Operativo	Precio(\$)
RouterBOARD333	64MB	3	12 a 28VDC fuente de 25W	Mikrotic Router OS	180
RouterBOARD600	64MB	3 soporta 1000Mbps	10 a 56VDC fuente de 35W	Mikrotic Router OS	245
Alix2C0600	128MB	2	7 a 20VDC fuente de 15W	iMedia ALIX Linux Voyage Linux Mikrotik RouterOS	116
net4826-48 600	128MB	1	6 a 28VDC fuente de 15W	Voyage Linux	200
net4526-30 600	64MB	1	6 a 20VDC fuente de 10W	Voyage Linux	150
RouterBOARD532A	64MB	3	6 a 22V o 25 a 56 VDC (x jumper) fuente de 24W	Mikrotic Router OS	200
Proghorn SBC-250	64MB	2	5VDC	AD|LinuxDistribution StarOS, Linux 2.6, Open WRT, IkarusOS	190

Tabla 6. SBC's para aplicaciones inalámbricas

Tarjeta	Estándar	Potencia Máxima	Sensibilidad	Corriente(mA)
SR2 Ubiquiti	g	26 @ 1-24Mbps	6Mbps-94dBm 12Mbps-91dBm	1.1
R52H Mikrotik	a/g	a- 26 @ 6Mbps g- 26 @ 6Mbps	6Mbps-90dBm (a/g)	0.8
SR5 Ubiquiti	a/g	26 @ 6-24Mbps	6Mbps-94dBm(a) 12Mbps-91dBm(g)	1.3
XR2 Ubiquiti	g	28 @ 1-24Mbps	6Mbps-94dBm(a) 12Mbps-91dBm(g)	1.3
XR5 Ubiquiti	a/g	28 @ 6-24Mbps	6Mbps-94dBm(a) 12Mbps-91dBm(g)	1.8
EMP-802+S EnGenius	a/g	a- 27 @ 6-24Mbps g- 22 @ 6-24Mbps	6Mbps-90dBm(a) 6Mbps-92dBm(g)	1
WLM54A-26dBm CompexSystems	a	26 @ 6-24Mbps	6Mbps-90dBm	1.5
WLM54G-6B-30 CompexSystems	g	30 @ 6-24Mbps	6Mbps-90dBm	1.5

Tabla 7. Tarjetas para WiFi de larga distancia

Todas las placas y tarjetas mencionadas anteriormente, cumplen los requisitos necesarios para su uso en zonas rurales, entre ellos:

- Bajo consumo
- Bajo coste
- Reducido tamaño
- Resistencia a condiciones climatológicas adversas
- Interfaces inalámbricas múltiples y adicionales disponibles

6.1.2.2 Antenas

Los dispositivos pasivos que se utilizan en zonas rurales para enlaces PtP y PtMP, con la distancia entre los puntos variable entre decenas y centenares de metros, y condiciones climatológicas en muchos casos poco favorables y extremas. En GTR-PUCP se utilizan equipos de la marca *Hiperlink* [HIPERL], por su gran disponibilidad además de que su relación calidad precio es de las más competitivas del mercado.

Es preciso mencionar que las antenas utilizadas para la frecuencia de 5.8GHz, son antenas de plato HG5829D de 29dBi (Figura 39(a)), grilla (o rejilla) HG5827G de 27dBi y de panel HG5819P de 19dBi (Figura 39 (c)).



Figura 39. ANTENAS de Hiperlik utilizadas

6.1.3 UBICACIÓN Y DISEÑO-RED WILLAY

NODOS	ALTITUD	COORDENADAS GEOGRÁFICAS	
		Latitud SUR	Longitud OESTE
ACOMAYO	m.s.n.m.		
Municipalidad Acomayo	3227	13° 55' 09.5"	71° 41' 01.3"
Colegio Tamasa Titto Condemayta	3271	13° 55' 20.2"	71° 40' 47.1"
Ugel de Acomayo	3222	13° 55' 24.2"	71° 40' 42.8"
Comisaría PNP Acomayo	3238	13° 55' 22.6"	71° 40' 46.6"
SANGARARA			
Municipalidad Sangarará	3790	13° 56' 50.8"	71° 36' 11.5"
Instituto Tecnológico Sangarará	3780	13° 57' 13.1"	71° 36' 00.2"
Colegio Libertadores de América	3742	13° 56' 57.4"	71° 36' 19.1"
Comiseria PNP Sangarará	3779	13° 56' 57.2"	71° 36' 18.7"
POMACANCHI			
Municipalidad Pomacanchi	3716	14° 02' 07.2"	71° 34' 17.1"
Instituto Pedagógico Pomacanchi	3718	14° 01' 53.7"	71° 34' 27.8"
Colegio Simón Bolívar Pomacanchi	3715	14° 01' 40.1"	71° 34' 23.5"
Colegio San Jose Obrero Pomacanchi	3733	14° 02' 20.6"	71° 34' 13.7"
Comisaria PNP Pomacanchi	3712	14° 02' 04.1"	71° 34' 14.1"

NODOS	ALTITUD	COORDENADAS GEOGRÁFICAS	
REPETIDORES (TRONCAL)			
Facultad de Eléctrica UNSAAC	3286	13° 31' 16.99"	71° 57' 24.02"
Repetidor Qosqojahuarina 1	4268	13° 39' 00.6"	71° 35' 17.9"
Repetidor Don Juan	4456	14° 00' 39.2"	71° 29' 24.8"
Repetidor Pantypallana	3938	14° 01' 26.3"	71° 34' 40.5"
Repetidor Laykatuyoc	4211	13° 55' 38.1"	71° 37' 38.0"
Repetidor Huascar	3520	13° 57' 16.7"	71° 43' 03.4"

6.1.4 Diagramas de Red Willay WiFi

6.1.4.1 Esquema de Red de Transporte Willay

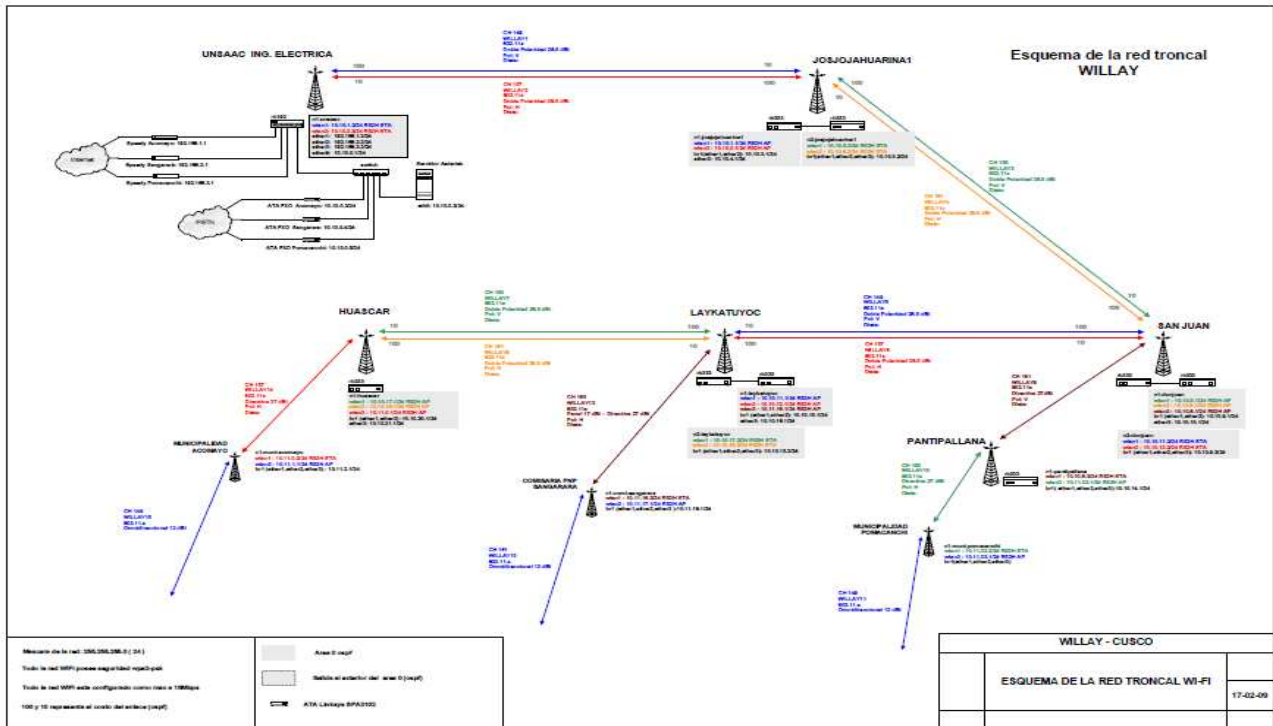


Figura 40. Esquema TRONCAL

6.1.4.2 Esquema Red de Distribución (clientes) Willay

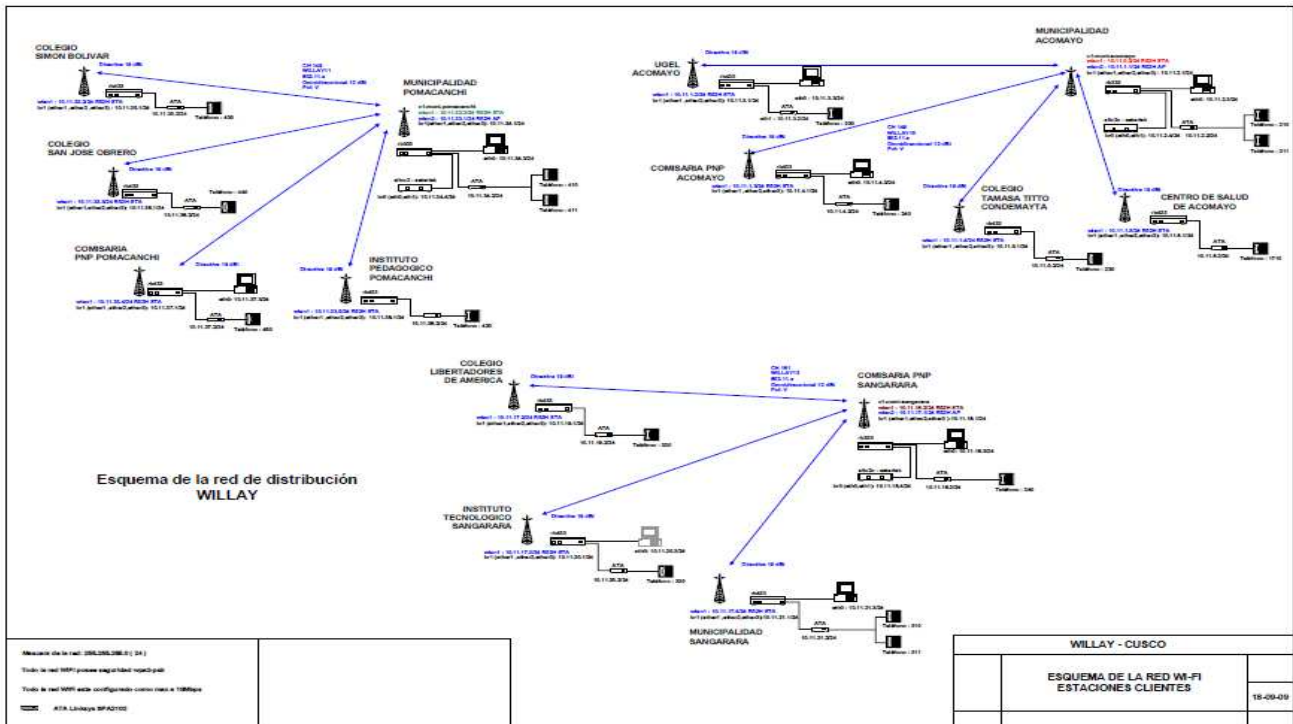


Figura 41. Esquema de DISTRIBUCIÓN

6.2 DISEÑO DE LA RED WIMAX

6.2.1 Introducción

Hasta hace un par de años hablar de un diseño teórico o no en WiMAX era complicado, no por la no existencia de redes o trabajos en esta tecnología, sino por la falta de información y por que el futuro de WiMAX era un tanto incierto.

El hermetismo en cuanto a información económica, y su inevitable comparación con WiFi, en cuanto a éxito de despliegue y sobretodo precio, hacían pensar en que no solo no tendría mucho futuro sino que incluso podría desaparecer, pero nada más lejos de la realidad, actualmente los despliegues de WiMAX son numerosos en Estados Unidos con empresas como Clearwire, Towerstream [WMXCities], donde se usan principalmente en grandes ciudades como red de *backhaul* para *hot-spots*, redes corporativas y movilidad a velocidades de hasta 100kmph (Figura 42).

En algunos países emergentes como Burkina Faso, Vietnam, India, Perú, Ecuador, Colombia [UNECO], los despliegues de redes de WiMAX para servicios como TV, Internet, Videoconferencia, Teleeducación, Telemedicina y VoIP son importantes y cada vez más numerosos. Resulta interesante saber que WiMAX supone una opción aceptable y elegible cuando se tratan redes inalámbricas de larga distancia en zonas aisladas.

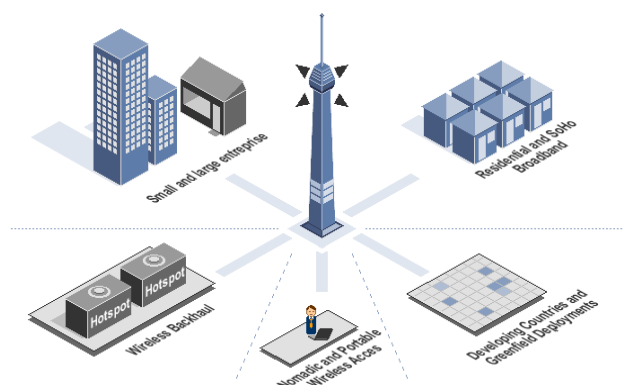


Figura 42. Escenarios IEEE802.16-WiMAX

El diseño de la Red WILLAY en WiMAX se ha hecho con equipos del fabricante español ALBENTIA, uno de los pioneros en fabricar equipamiento WiMAX en bandas libres de 5GHz y económicamente competitivos.

Albentia Systems, fabricante de equipamiento WiMAX es una empresa fundada en 2004 con sede en Madrid [ALBSYS]. Primer fabricante español de equipamiento WiMAX IEEE802.16, miembro del WiMAX Forum [WiMFOR09] desde 2006, fabrica y proporciona soluciones integrales basadas en WiMAX IEEE802.16.

Se ha escogido este fabricante debido a que es totalmente interoperable y certificado para trabajar en banda libre 5.4/5.8 GHz, sus equipos pueden operar con fabricantes como Tranzeo, RedLine, Alvarion entre otros [FABWIMAX09].

Tal y como se explicará en el punto 4 de este capítulo, estas decisiones son tanto técnicas como económicas. Los equipos de *Albentia* trabajan en la banda de frecuencia libre de 5.8GHz, los equipos de transporte permiten enlaces PtP, ALB258E, e incluso dejar abierta la posibilidad de enlaces PtMP con equipos ALB458, de varios sectores. Esta posibilidad hace que en esta red sea posible ampliar su cobertura cuando sea necesario, puesto que se trata de una zona rural con poca densidad de usuarios, no existe un problema de saturación de red.

6.2.2 Análisis teórico de los enlaces WiMAX en WILLAY-Cusco

El potencial de WiMAX es real y cada vez queda más claro con los despliegues existentes y proyectos en marcha [WXDev09][ALVLatin09], pero su evolución sigue dependiendo más de aspectos comerciales y políticos de los países que meramente tecnológicos. Sin embargo, WiMAX se va consolidando con el tiempo y la experiencia, pero no hay que olvidar que el presente trabajo está diseñado con **IEEE802.16-2004d** versión fija del estándar, hoy por hoy menos atractivo que IEEE802.16e versión móvil para los fabricantes, enfocando la primera a usos exclusivos de redes de *backhaul* o enlaces de largo alcance, como es el caso de estudio de la Red Willay.

Por lo anterior, se tiende a pensar en la obsolescencia de WiMAX-Fijo, pero de momento podemos decir que la versión más reciente del estándar IEEE802.16-2009 [IEEE16] no la descarta, por lo que el interés de las empresas del sector no se enfoca en eliminarla sino en asociarla a las prestaciones móviles, es decir, que actualmente en equipos como *HipeMAX*, *EasyST*, *ProST-2* de Airspan [Airspan] y *PaketMAX* de Aperto [Aperto], de gran éxito en el sector, poseen ambas funcionalidades. En ellos se destaca el uso de antenas inteligentes (*MIMO*), esenciales para WiMAX móvil y que ayuda a potenciar las prestaciones en el sistemas fijos y móviles [AirFixMov][Airspan] [Aperto].

Puesto que se trata de un estudio para una red que está en funcionamiento en WiFi, en el caso de WiMAX se han conservado varios parámetros de la red como la frecuencia de trabajo, 5GHz, puntos de instalación entre otros.

Una vez escogidos los equipos, con sus características se ha hecho el estudio RF (6.2.2.1 *Estudio RF Red Willay-WiMAX*) como con la ayuda del programa *RadioMobile* de todos los enlaces ya que este estudio no varía si se utiliza una tecnología u otra, en un principio se planteó WiMAX como tecnología más robusta, permitiría suprimir alguno de los puntos repetidores de la red (Ej. **Repetidor Pomacanchi**) aprovechando las ventajas de comunicación NLOS de esta tecnología.

Pero es necesario aclarar que la propiedad NLOS es utilizada en entornos urbanos donde se aprovecha la propiedad de reflexión directa de rayos en edificios y construcciones que se encuentren en la trayectoria del enlace (Figura 43 y Figura 44), pero esto mismo en un entorno rural o aislado no es aplicable, por tanto, el estudio de RF realizado respeta la línea de vista directa (LOS) en los enlaces.

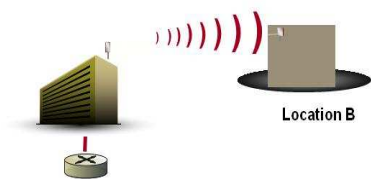


Figura 43. Caso LOS

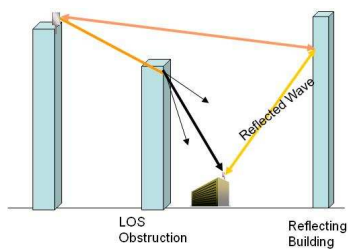


Figura 44. Caso NLOS

No es prioridad de este proyecto la simulación de una red WiMAX, por tanto no se ha seguido esta línea de investigación, pero se puede precisar que la información es escasa en cuanto a simuladores libres de redes WiMAX. Existen módulos de versión libre en NS-2 para simuladores WiMAX, pueden ser interesantes para estudio previo de despliegues [WIMAXNS-2].

Para los cálculos de las prestaciones de la red WiMAX tomaremos parámetros y características tanto de los equipos como del estándar (IEEE802.16-2009) [IEEE1609] [FundWMX07].

En la Tabla 8 se muestran las sensibilidades o potencias mínimas que los equipos elegidos necesitan para un óptimo funcionamiento, la columna de la izquierda nos servirá para señalar el perfil de transmisión por el enlace asignando un número a cada uno de estos (Id.Tx):

Id.Tx ⁶	Modulación	SNR	Ancho de Banda de Canal			
			10MHz	7MHz	3,5MHz	1,75Mhz
0	BPSK 1/2	6	-92	-94	-96	-99,5
1	QPSK 1/2	9	-89	-90	-93	-96,5
2	QPSK 3/4	12	-86,5	-89	-92	-94
3	16QAM1/2	15	-83,5	-86	-89	-91
4	16QAM3/4	18	-80	-83	-86	-87,5
5	64QAM2/3	22	-76	-79	-82	-83,5
6	64QAM3/4	24	-74	-74	-77	-81,5

Tabla 8. Sensibilidades ALB/ARBA

La capa física 802.16 emplea modulación OFDM con 256 subportadoras, de las que solo se emplean 200 portadoras (192 para datos y 8 pilotos, Figura 45). La separación entre subportadoras de 45kHz. La señal ocupa un ancho de banda total de 9 MHz.

802.16 emplea corrección de errores basado en códigos concatenados Reed-Salomon y Convolutiva. Las subportadoras se modulan de forma adaptativa con modulación BPSK, QPSK, 16QAM y 64QAM.

⁶ Id.Tx: Identificador de transmisión

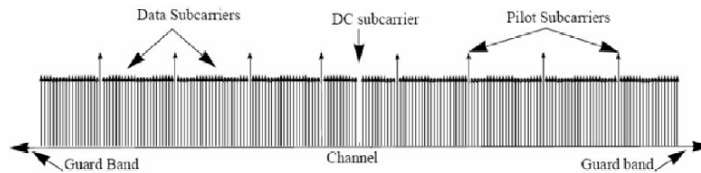


Figura 45. Modulación OFDM con 256 subportadoras

La longitud de símbolo es aproximadamente 22,2µs, a los que se añade un prefijo cíclico seleccionable que varía entre 100ns y 5,6µs para mitigar los ecos causados por la propagación de multitrayecto.

La modulación emplea 8 portadoras piloto distribuidas en los 9MHz de ancho de banda. Estos pilotos son suficientes para compensar los desvanecimientos selectivos y coherencia espectral típica de propagación en exteriores.

La capacidad de un símbolo OFDM modulado en 64QAM-3/4 es 864 bits, entre 192 portadoras de datos tenemos 4,5 bits por portadora. Dado que la duración de un símbolo completo es de 23,1 µs, la capacidad bruta máxima a nivel físico 802.16 es de **37,4 Mbps** (con tiempo de guarda de 1/32 ms).

Las modulaciones más altas serán las capaces de transmitir mayor información, como se puede observar en la Tabla 9.

Modulación	Bits de información /portadora	Subportadoras de Información	Bits de Información /símbolo OFDM
BPSK ½	0,5	192	96
QPSK ½	1	192	192
QPSK ¾	1,5	192	288
16QAM1/2	2	192	384
16QAM3/4	3	192	576
64QAM2/3	4	192	768
64QAM3/4	4,5	192	864

Tabla 9. ESQUEMAS DE MODULACIÓN

Una de las decisiones del diseño ha sido **capacidad máxima y caudal máximo**, para ello los equipos han de estar configurados con anchos de canal, **BW_{canal}, de 10 MHz** y con una **duración de trama de 10ms**.

Para el cálculo del **Bit Rate (BR)**, que se puede conseguir a nivel físico (PHY) será necesario utilizar la siguiente fórmula:

$$Mbps = \frac{N_{usados} \times b_m \times c_r}{T_s} = \frac{N_{bitsOFDM}}{T_s}$$

Donde:

- N_{usados} = Número de portadoras de datos de OFDM
- b_m = Número de bits en la codificación

- c_r = Prefijo cíclico
- T_s = Periodo de símbolo = $T_b + T_g$
- $N_{bitsOFDM}$ = Numero de bits de información por símbolo OFDM

El tiempo de guarda (T_g) ayuda a mitigar los efectos de la interferencia entre símbolos (ISI), se escoge un valor prudente $\frac{1}{8}ns$. Las siguientes tablas muestran los distintos **valores de BR a nivel PHY** que se puede lograr según el ancho de canal utilizado.

Id de Tx	MODULACIÓN BW=1,75MHz	Nused	bm	cr	Tb	Tg =tb/8	Ts		BR Mbps
0	BPSK 1/2	192	1	0,50	128	16	144	34	0,67
1	QPSK 1/2	192	2	0,50	128	16	144	34	1,33
2	QPSK 3/4	192	2	0,75	128	16	144	34	2,00
3	16QAM1/2	192	4	0,50	128	16	144	34	2,67
4	16QAM3/4	192	4	0,75	128	16	144	34	4,00
5	64QAM2/3	192	6	0,67	128	16	144	34	5,33
6	64QAM3/4	192	6	0,75	128	16	144	34	6,00

Tabla 10. BIT RATE con canal 1,75 MHz

Id de Tx	MODULACIÓN BW=3.5MHz	Nused	bm	cr	Tb	Tg =tb/8	Ts		BR Mbps
0	BPSK 1/2	192	1	0,50	64	8	72	69	1,33
1	QPSK 1/2	192	2	0,50	64	8	72	69	2,67
2	QPSK 3/4	192	2	0,75	64	8	72	69	4,00
3	16QAM1/2	192	4	0,50	64	8	72	69	5,33
4	16QAM3/4	192	4	0,75	64	8	72	69	8,00
5	64QAM2/3	192	6	0,67	64	8	72	69	10,67
6	64QAM3/4	192	6	0,75	64	8	72	69	12,00

Tabla 11. BIT RATE con canal 3.5 MHz

Id de Tx	MODULACIÓN BW=7MHz	Nused	bm	cr	Tb	Tg =tb/8	Ts		BR Mbps
0	BPSK 1/2	192	1	0,50	32	4	36	138	2,67
1	QPSK 1/2	192	2	0,50	32	4	36	138	5,33
2	QPSK 3/4	192	2	0,75	32	4	36	138	8,00
3	16QAM1/2	192	4	0,50	32	4	36	138	10,67
4	16QAM3/4	192	4	0,75	32	4	36	138	16,00
5	64QAM2/3	192	6	0,67	32	4	36	138	21,33
6	64QAM3/4	192	6	0,75	32	4	36	138	24,00

Tabla 12. BIT RATE con canal 7 MHz

Id de Tx	MODULACIÓN BW=10MHz	Nused	bm	cr	Tb	Tg =tb/8	Ts		BR Mbps
0	BPSK 1/2	192	1	0,50	22,4	2,8	25,2	198	3,81
1	QPSK 1/2	192	2	0,50	22,4	2,8	25,2	198	7,62
2	QPSK 3/4	192	2	0,75	22,4	2,8	25,2	198	11,43
3	16QAM1/2	192	4	0,50	22,4	2,8	25,2	198	15,24
4	16QAM3/4	192	4	0,75	22,4	2,8	25,2	198	22,86
5	64QAM2/3	192	6	0,67	22,4	2,8	25,2	198	30,48
6	64QAM3/4	192	6	0,75	22,4	2,8	25,2	198	34,29

Tabla 13. BIT RATE con canal 10 MHz

El estudio de la red WILLAY-Cusco pertenece a la Tabla 13, la misma que servirá de guía para saber el perfil de transmisión (Id de transmisión de las tablas: 10, 11, 12 y 13) que se está usando en cada enlace de la red.

Siguiendo con esta línea de cálculo y aplicándolo a la red WILLAY-Cusco, se mostrará el análisis teórico de la parte de distribución y transporte de la red de estudio.

En la **Red de Distribución**, los puntos donde se instalan las BS's, ARBA550 [ALB550], equipos PtMP, las cuales se conectarían en topología estrella a los clientes, estos últimos tendrán instalado un CPE (*Customer Premise Equipment*), TR-WMX-5-16-W [TRWMX5] de Tranzeo interoperable con la BS ARBA550.

El punto más importante de la topología PtMP de la red de distribución son las Estaciones Base (BS), cuyo esquema de instalación general corresponde a la Figura 46.

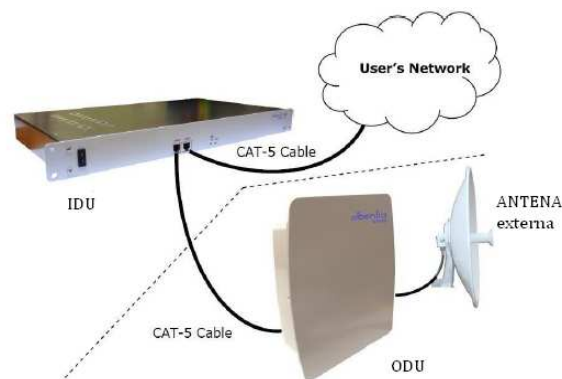


Figura 46. Esquema general de Instalación

Donde:

- IDU: Indoor Unit o Equipo Interno.
- ODU: Outdoor Unit o Equipo Externo
- Antena que puede ser interna o externa

Este esquema estaría instalado en la *Municipalidad de Acomayo, Comisaría de Sangarará y la Municipalidad de Pomacanchi*. Con las características técnicas de los equipos [ALB550][TRWMX5] (potencia transmisión, antenas, modos de transmisión...) y datos propios de la red (distancia, antenas, potencia de ruido...), con la fórmula para el balance de potencias:

$$P_{rx}(dBm) = P_{tx}(dBm) + A(dB)$$

Y la fórmula de Friis de transmisión:

$$A_{att-enlace}(dB) = 20 \log \frac{4\pi d}{\lambda} - G_{tx} - G_{rx}$$

Una aproximación de la ecuación anterior, más adecuada para nuestro calculo seria:

$$A_{att-enlace}(dB) = 32,45 + 20\log(f_{MHz}) + 20\log(d_{km}) - G_{tx} - G_{rx}$$

Se dimensiona el radioenlace WiMAX.

La Figura 47 muestra los resultados de aplicar los cálculos descritos:

Red DISTRIBUCIÓN				
	Mun.Acomayo	Ant.12dBi		
	PNP Acomayo	UGEL Acomayo	Colegio Tomasa Ttito	
Distancia	0,6	0,72	0,54	
Potencia Rx	-73,232	-74,815	-72,316	
Id Tx	6	5	6	
Antena	16dBi	16dBi	16dBi	
Descripción	64QAM 3/4 BR= 34,3Mbps	64QAM 2/3 BR= 30,5Mbps	64QAM 3/4 BR= 34,3Mbps	
	P.N.P Sangarará	Ant.12dBi		
	Inst.Tecnológico	Mun. Sangarará	Colegio Libertadores de América	
Distancia	0,74	0,29	0,3	
Potencia Rx	-75,053	-66,917	-67,211	
Id Tx	5	6	6	
Antena	16dBi	16dBi	16dBi	
Descripción	64QAM 2/3 BR= 30,5Mbps	64QAM 3/4 BR= 34,3Mbps	64QAM 3/4 BR= 34,3Mbps	
	Mun.Pomacanchi	Ant.12dBi		
	Ins.Pedagógico	PNP Pomacanchi	Colegio San José Obrero	Colegio Simon Bolívar
Distancia	0,53	0,13	0,43	0,86
Potencia Rx	-72,154	-59,947	-70,338	-76,359
Id Tx	6	6	6	5
Antena	16dBi	16dBi	16dBi	16dBi
Descripción	64QAM 3/4 BR= 34,3Mbps	64QAM 3/4 BR= 34,3Mbps	64QAM 3/4 BR= 34,3Mbps	64QAM 2/3 BR= 30,5Mbps

Figura 47. Red de Distribución

Para deducir el perfil de transmisión en cada enlace es necesario recordar la *Tabla 8. Sensibilidades ALB/ARBA* la misma que muestra las sensibilidades de la BS utilizada, disponibles en las hojas de características de los equipos [ALB550][ALB250] [ALB450], de dicha tabla el caso que nos ocupa es la columna de 10MHz como ancho de canal (zona resaltada).

De forma análoga y aplicando los mismos cálculos tenemos los datos correspondientes a la **Red Troncal**, la diferencia radica en que la red de *backhaul* posee equipos ALB258E y

ALB458 [ALB250][ALB450], en modo maestro/esclavo según se explica en el siguiente apartado (2.3 Desarrollo y Puntos de Instalación).

Red TRANSPORTE				
	de: UNSAAC ING.ELÉCTRICA		de: JOSJOAHUARINA	
	a: JOSJOAHUARINA		a: DON JUAN	
Distancia km	42,34		Distancia km	41,55
Potencia Rx	-79,204		Potencia Rx	-79,04
Id Tx	entre: 4 - 5		Id Tx	entre: 4 - 5
Ant.Tx	28,5dBi		Ant.Tx	28,5dBi
Ant.Rx	28,5dBi		Ant.Rx	28,5dBi
Descripción	16QAM 3/4 - 64QAM 2/3 BR= 22,86 - 30,48Mbps		Descripción	16QAM 3/4 - 64QAM 2/3 BR= 22,86 - 30,48Mbps
	de: DON JUAN		de: Rep.Pomacanchi	
	a: Rep.Pomacanchi	a: LAYKATUYOC	a: MUN.POMACANCHI	
Distancia km	9,6	17,5	Distancia km	1,44
Potencia Rx	-71,433	-73,529	Potencia Rx	-70,836
Id Tx	6	6	Id Tx	6
Ant.Tx	27dBi	28,5dBi	Ant.Tx	19
Ant.Rx	27dBi	28,5dBi	Ant.Rx	19
Descripción	64QAM 3/4 BR= 34,3Mbps	64QAM 3/4 BR= 34,3Mbps	Descripción	64QAM 3/4 BR= 34,3Mbps
	de: LAYKATUYOC		de: HUASCAR	
	a: HUASCAR	a: P.N.P SANGARARA	a: MUN.ACOMAYO	
Distancia km	10,26	3,44	Distancia km	5,39
Potencia Rx	-68,892	-70,4	Potencia Rx	-74,3
Id Tx	6	6	Id Tx	6
Ant.Tx	28,5dBi	23	Ant.Tx	23
Ant.Rx	28,5dBi	23	Ant.Rx	23
Descripción	64QAM 3/4 BR= 34,3Mbps	64QAM 3/4 BR= 34,3Mbps	Descripción	64QAM 3/4 BR= 34Mbps

Figura 48. Red Troncal

De la Figura 48 podemos concluir que el *backhaul* de la red es lo suficientemente robusto como para ofrecer una capacidad a nivel físico mayor a 20Mbps en promedio y en los enlaces más largos (>40Km).

Partiendo de la hipótesis de que con IEEE802.16 podemos transmitir mayor potencia, dentro de los márgenes de PIRE que se regula en el país, una de las ventajas de esta tecnología es la posibilidad de ahorrar en antenas ya que son necesarias antenas de menor ganancia. Incluso este ahorro se ve en que los equipos tienen antenas internas incorporadas.

6.2.2.1 Estudio RF Red Willay-WiMAX

En apartado se hará el estudio de radiofrecuencia de la red, tal y como se ha explicado anteriormente, se utiliza el programa Radio Mobile. Donde hemos introducido los parámetros de radio de los equipos [ALB550][ALB250][ALB450].

La siguiente tabla muestra un resumen de estos valores.

Estación MASTER-BS/SLAVE-CPE ALB200		
Pot.Tx	24 dBm	Potencia de Transmisión máxima para caudal máximo
Gan. Antena	28,5dBi	La misma utilizada para el caso WILLAY
Max.Sensibilidad	-92dBm	Para BWcanal de 10MHz
Estación MASTER-BS ALB400		
Pot.Tx	24 dBm	Potencia de Transmisión máxima para caudal máximo
Gan. Antena	28,5dBi	La misma utilizada para el caso WILLAY
Max.Sensibilidad	-92dBm	Para BWcanal de 10MHz
Estación BS ARBA550		
Pot.Tx	24 dBm	Potencia de Transmisión máxima para caudal máximo
Gan. Antena	12dBi	La misma utilizada para el caso WILLAY
Max.Sensibilidad	-92dBm	Para BWcanal de 10MHz
Estación Cliente-CPE TR-WMX-5-16		
Pot.Tx	20dBm	Potencia de Transmisión máxima para caudal máximo
Gan. Antena	16dBi	Antena interna del equipo. Mínimo valor, suficiente para enlace y mínimo precio.
Max.Sensibilidad	-89,5dBm	Para BWcanal de 10MHz

Tabla 14. PARÁMETROS DE RADIO. Equipos WiMAX

En el apartado siguiente (6.2.4Desarrollo y Puntos de Instalación) se explicará cuales son los equipos que se utilizan en cada enlace y la configuración de los mismos. El análisis RF muestra la viabilidad de los enlaces inalámbricos con los parámetros de equipos que utilizan el estándar IEEE802.16 [IEEE1604][IEEE1609]. Dicha viabilidad viene dada por la existencia de LOS entre transmisor y receptor, ya que como se ha comentado anteriormente, no es posible aprovechar la característica NLOS.

Además, de comprobar LOS en los enlaces se verifican los niveles de señal en recepción, por las condiciones del lugar Radio Mobile está configurado para que pinte una línea verde cuando el "RX relativo" supere los 3dB, pero por razones propias de los enlaces inalámbricos y de la zona como inestabilidad e inclemencias del tiempo, consideraremos un enlace aceptable, si el valor de "RX relativo" es superior a 10dB, además de asegurarnos que haya en cada enlace más del 60% de la primera zona de *Fresnel* despejada.

6.2.2.1.1 RED TRONCAL

En la RED TRONCAL o de TRASPORTE, tenemos:

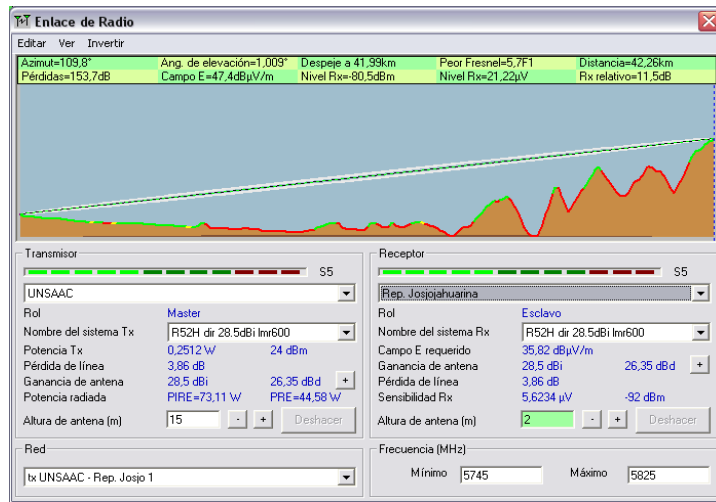


Figura 49. Enlace UNSAAC-JOSJOJAHUARINA

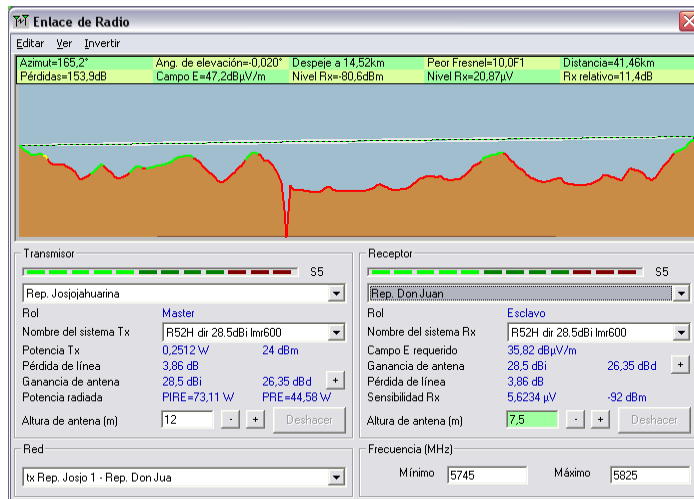


Figura 50. Enlace JOSJOJAHUARINA-DON JUAN

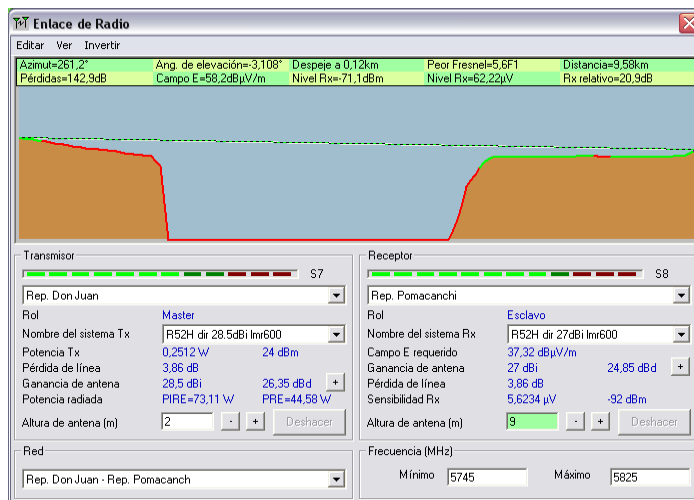


Figura 51. Enlace DON JUAN - REP.POMACHANCHI

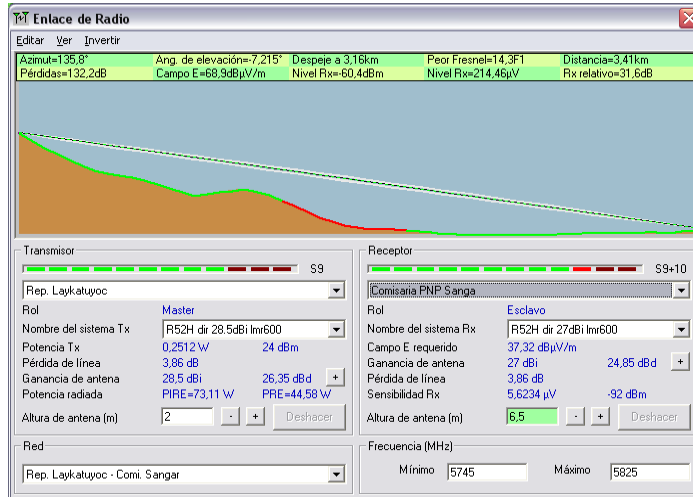


Figura 52. Enlace LAYKATUYOCK-PNP SANGARARÁ

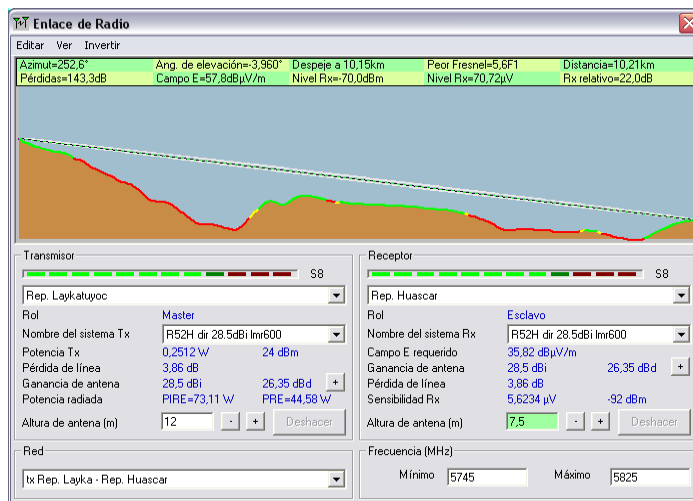


Figura 53. Enlace LAYKATUYOC-HUASCAR

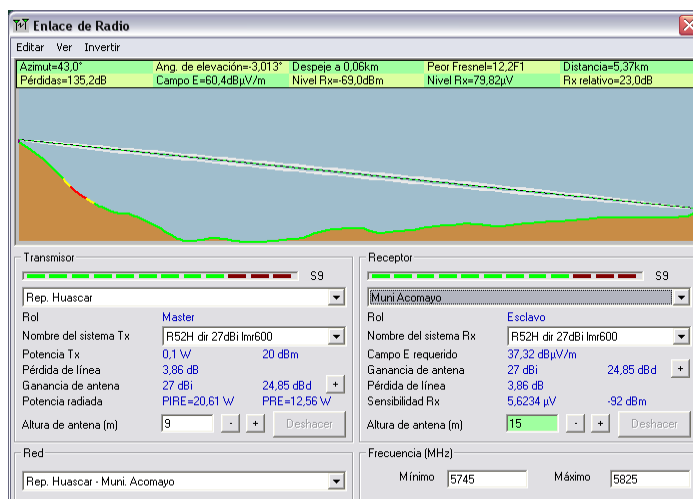


Figura 54. Enlaces HUASCAR-MUNI. ACOMAYO

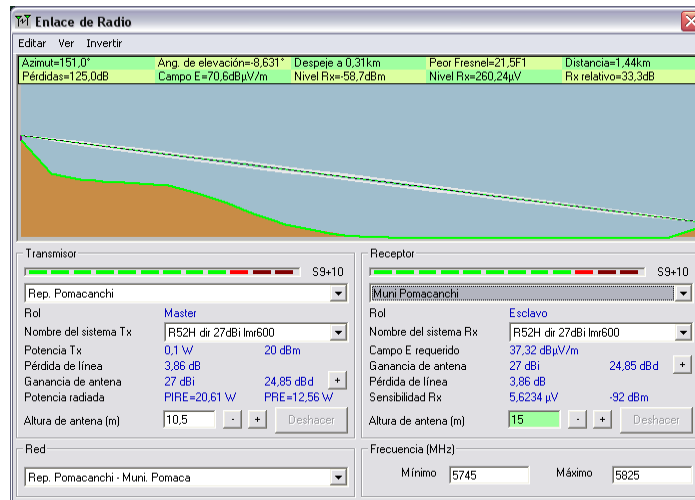


Figura 55. Enlace REP.POMACANCHI-MUNI.POMACANCHI

6.2.2.1.2 RED DE DISTRIBUCIÓN

En la Red de DISTRIBUCIÓN:

- Municipalidad de ACOMAYO:

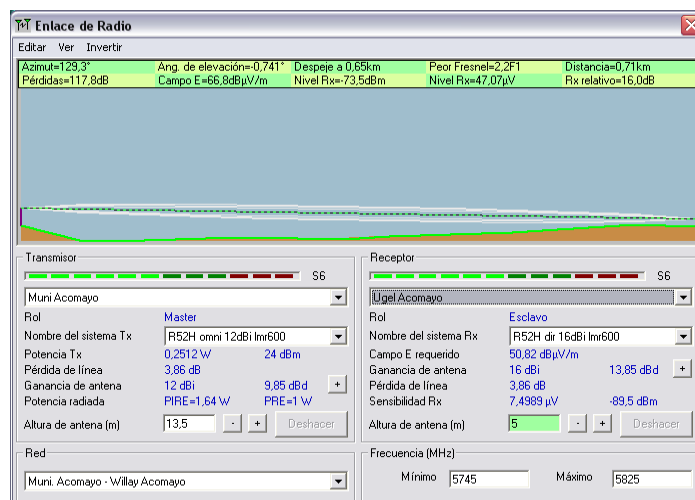


Figura 56. Enlace MUNI.ACOMAYO-UGEL

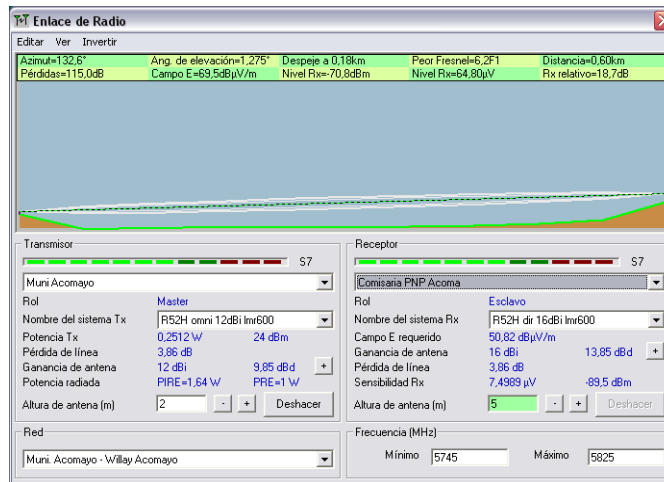


Figura 57. Enlace MUNI.ACOMAYO-PNP ACOMAYO

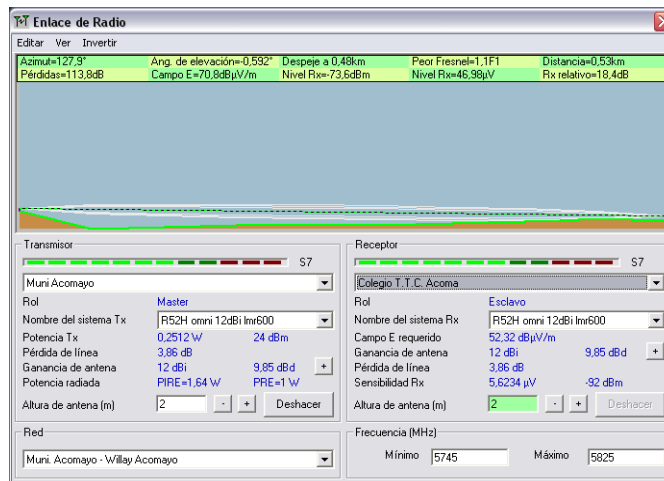


Figura 58. Enlace MUNI.ACOMAYO-COLEGIO T.T.C

- Municipalidad de POMACANCHI:

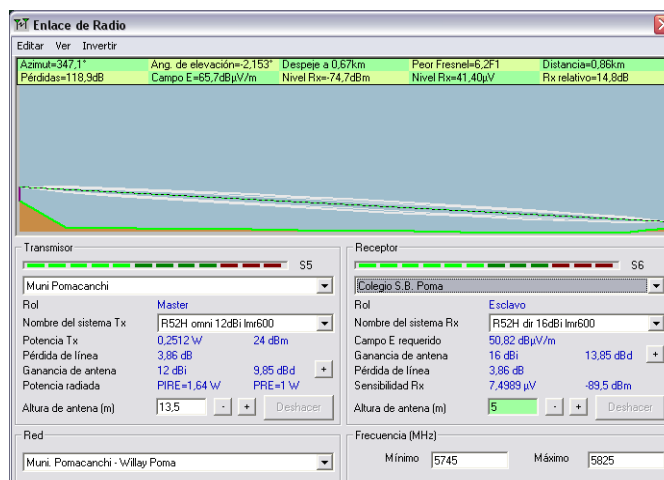


Figura 59. Enlace MUNI.POMACANCHI-COLEGIO Simón Bolívar

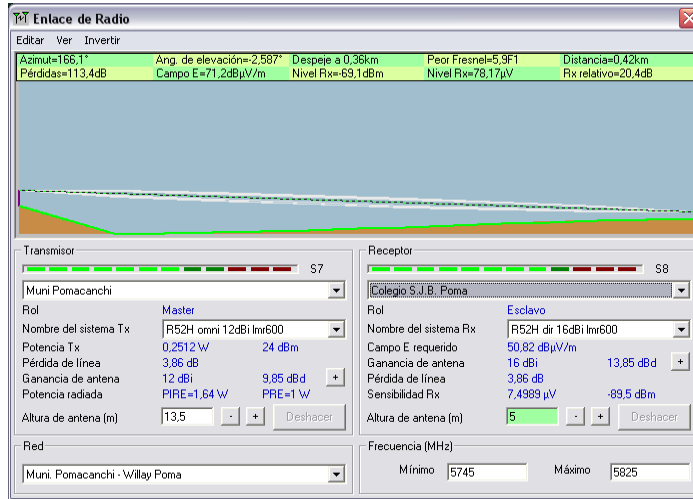


Figura 60. Enlace MUNI.POMACANCHI-COLEGIO S.J.B

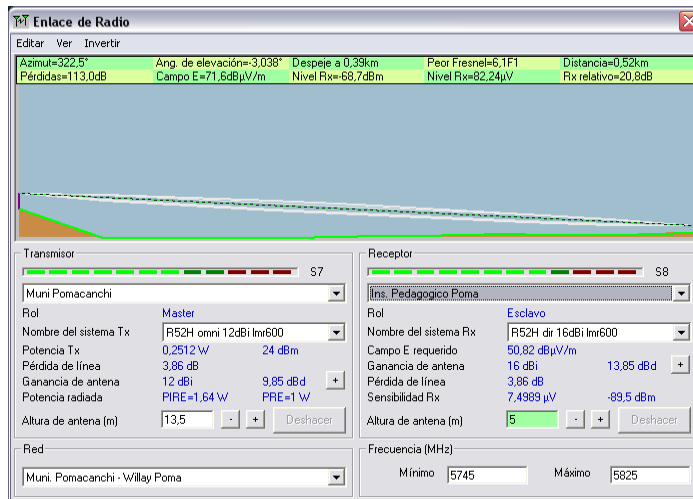


Figura 61. Enlace MUNI.POMACANCHI-INS.PEDAGÓGICO

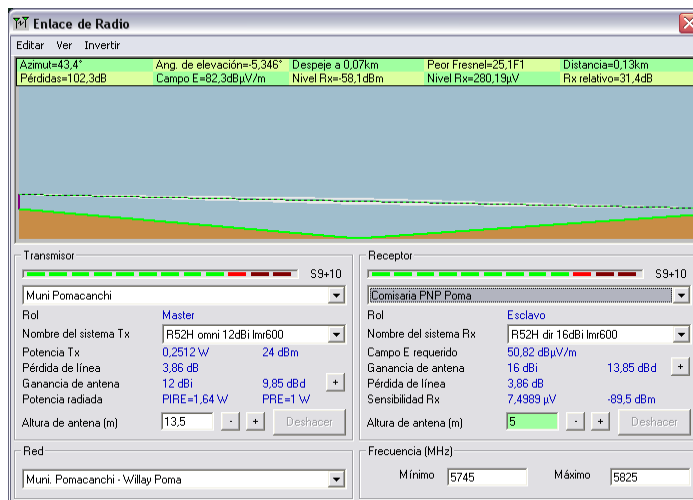


Figura 62. Enlace MUNI.POMACANCHI-PNP

- Comisaría PNP de **SANGARARÁ**:

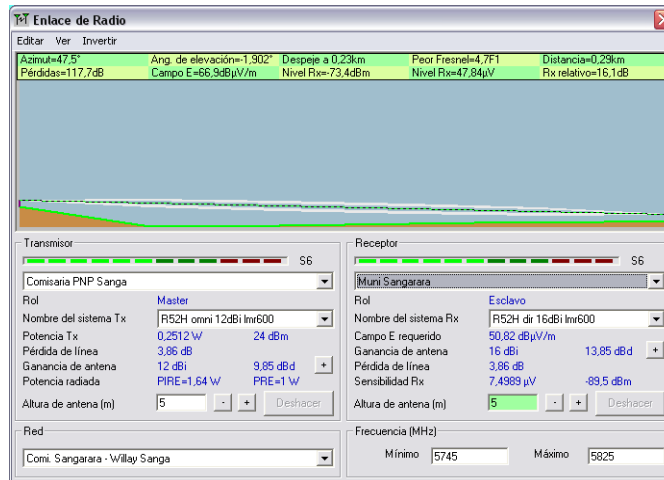


Figura 63. Enlace PNP-MUNI.SANGARARÁ

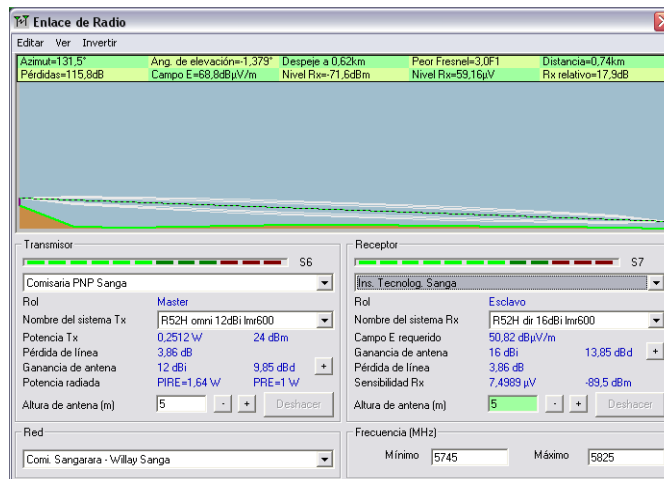


Figura 64. Enlace PNP- INSTITUTO TECNOLÓGICO

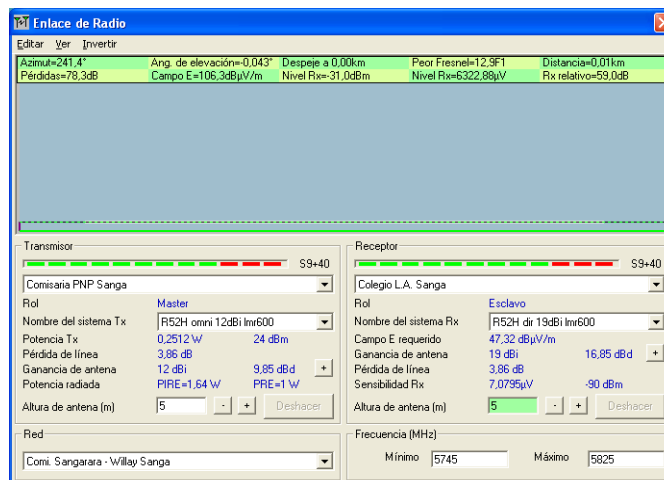


Figura 65. Enlace PNP-COLEGIO LIBERTADORES DE AMÉRICA

6.2.3 Diagrama de Red WILLAY - WiMAX

La Figura 66, representa gráficamente lo explicado en el apartado 6.2.4 *Desarrollo y Puntos de Instalación*. Este escenario corresponde a la Red Willay, ubicada en zona con orografía y clima de sierra. Se trata de un despliegue para comunicaciones inalámbricas en largas distancias, para el transporte de datos, en una zona rural.

Tal y como se muestra en el diagrama el diseño está hecho con equipos que implementan el estándar IEEE802.16, comercializado como WiMAX, con fabricantes certificados y pertenecientes al *WiMAX FORUM* [WMXForum] como Albentia [ALBSYS] y Tranzeo [TRANZ].

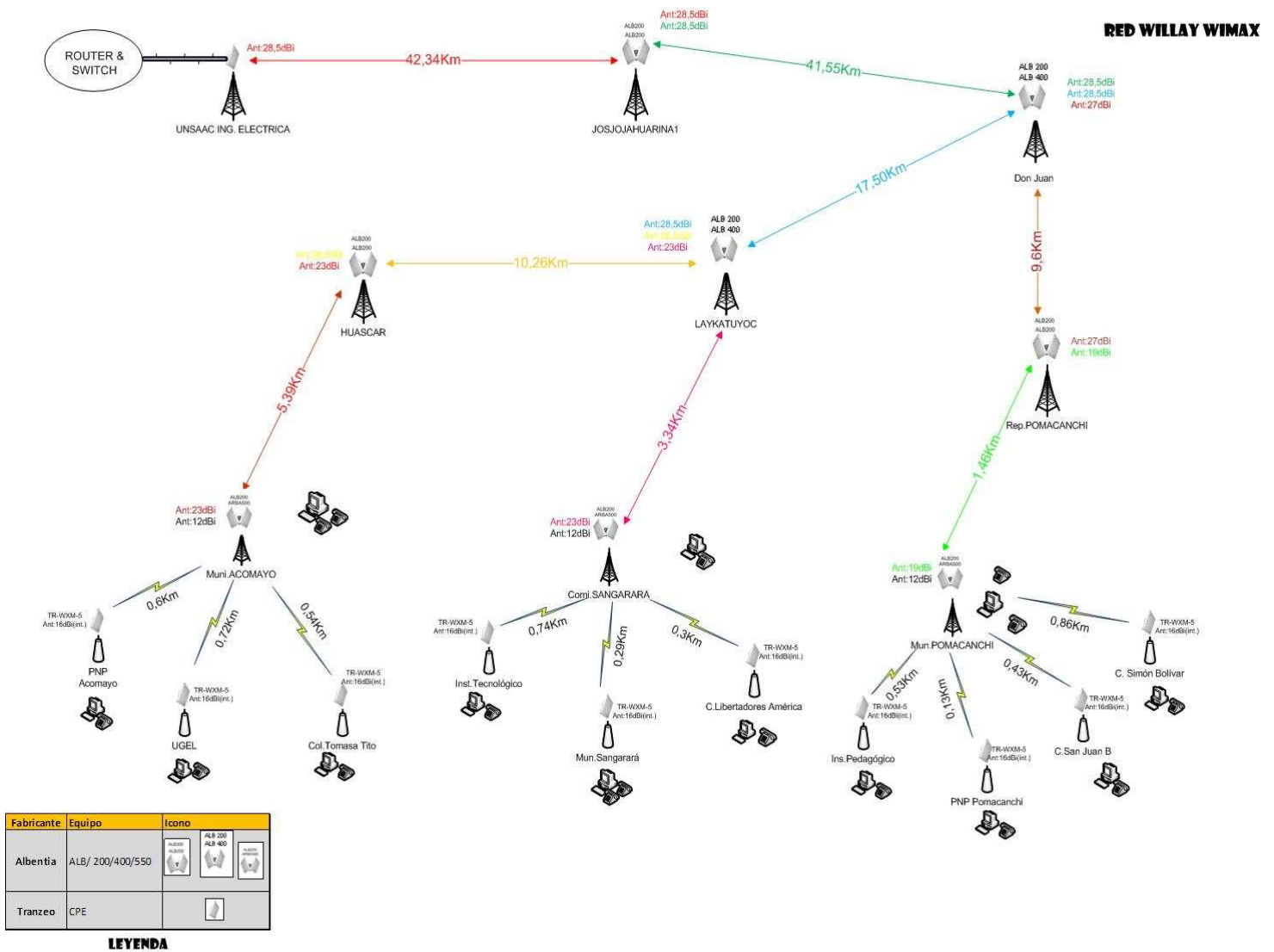


Figura 66. Red WILLAY en WIMAX

Siendo rigurosos con el diseño de una red, hemos de añadir la descripción de las antenas que se han de utilizar en el posible despliegue. Todos los equipos incluyen puertos adicionales (tipo N-hembra) para antenas externas por lo que son perfectamente válidas las antenas utilizadas hasta el momento (6.1.2.2 *Antenas*). De la Figura 66 podemos señalar el número exacto de equipos y de antenas necesarios en cada punto, siendo la relación la siguiente:

Antenas:

- UNNSAC: ALB250 (**28,5dBi**)
- JOSJOJAHUARINA: ALB250 (**28,5dBi**) - ALB250 (**28,5dBi**)
- DON JUAN: ALB250 (**28,5dBi**) – ALB450 (4interfaces) (**28,5dBi**) (**27dBi**)
 - Rep.POMACANCHI:ALB250 (**27dBi**) ALB250 (**19dBi**)
 - Muni. POMACANCHI : ALB250 (**19dBi**) – ARBA550(**12dBi**)
 - Pto.1. TR-WXA(**16dbi**)-integrada
 - Pto.2. TR-WXA(**16dbi**)-integrada
 - Pto.3. TR-WXA(**16dbi**)-integrada
- LAYKATUYOK: ALB250(**28,5dBi**)- ALB450(4interfaces) (**28,5dBi**)(**23dBi**)⁷
 - P.N.P. SANGARARA: ALB250(**23dBi**) ARBA550(**12dBi**)
 - Pto.1. TR-WXA(**16dbi**)-integrada
 - Pto.2. TR-WXA(**16dbi**)-integrada
 - Pto.3. TR-WXA(**16dbi**)-integrada
- HUASCAR: ALB250 (**28,5dBi**) - ALB250 (**23dBi**)
 - Muni. ACOMAYO: ALB250(**23dBi**) ARBA550(**12dBi**)
 - Pto.1. TR-WXA(**16dbi**)-integrada
 - Pto.2. TR-WXA(**16dbi**)-integrada
 - Pto.3. TR-WXA(**16dbi**)-integrada

Necesidad de: 8 de 28,5dBi, 2 de 27dBi, 2 de 23dBi, 2 de 19dBi, 3 de 12dBi para cubrir toda la red. Las antenas integradas de los equipos como ALB250 son de 23dBi, por lo que no serían necesarias incluirlas en presupuesto.

6.2.4 Desarrollo y Puntos de Instalación

Los equipos que se han escogido son de la familia de la Red de Transporte de Albentia, los ALB258E, ALB458 y ALBR550 [ALB550][ALB250][ALB450], los primeros están diseñados para redes de *backhaul*. En el diseño de la *Red Willay* se han identificado como *Red de Backhaul o Transporte* los repetidores: **UNSAAC, Josjojahuarina, Don Juan, Laykatuyoc, Huáscar y Repetidor de Pomacanchi**, actualmente la parte *troncal* de la red.

El primer equipo (ALB258E) se instala en la **UNSAAC Facultad de Ingeniería Electrónica** conectado a Internet, esta será nuestra primera puerta de red. Por medio de configuración software (6.2.4.1 *Software Proprietario de Gestión*), asignamos a este equipo el papel de

⁷ Opcional: 23dBi es la antena integrada en el equipo

maestro (master), entendiéndose por maestro como el equipo que será la Estación Base (BS) de la red PtP, la segunda parte de esta red es otro equipo ALB258E instalado en el punto **Josjojahuarina** configurado como *esclavo (slave)*, este modo de trabajo corresponde a un CPE de una BS. En este mismo repetidor se encuentra instalado un segundo equipo ALB258E conectado por Ethernet al primero en modo *maestro*, este punto constituye el primer tramo de la red de transporte.

Análogamente, se replica la configuración anterior en los puntos de la red que tienen dos interfaces, **Huáscar** y **Repetidor Pomacanchi**. Para terminar con la red de *backhaul*, los puntos **Don Juan** y **Laykatuyok** que tienen 3 interfaces, en estos puntos junto con el equipo ALB258E (modo esclavo) se conecta vía Ethernet un ALB458 (equipo PtMP), vía interface web se configura en modo *maestro*, es necesario recordar que el funcionamiento en este modo es idéntico al de una BS. Los ALB258E con el que se comunica inalámbricamente un ALB458, instalados en el **Repetidor de Pomacanchi y Comisaria de Sangarará**, deberán estar en modo esclavo, siendo este funcionamiento compatible entre estos dos equipos (CPE-BS). Además de trabajar en modo maestro es necesario que se configuren, vía interface web, en modo de funcionamiento *mode routing (6.2.4.2 Modos de Funcionamiento BS)*, de forma que se pueda mantener el diseño lógico (direccionamiento IP) del diseño WIFI.

Los equipos ALB458 dejan abierta la posibilidad de extender la red hacia más localidades en las que la condición del LOS se cumpla, los equipos que se han escogido son de 4 sectores, por razones de configuración IP cada uno de los dos interfaces existentes se direcciona en subredes distintas, dejando así la posibilidad de dos redes adicionales, desde los puntos **Don Juan** y **Laykatuyok** donde los equipos ALB458 estarían instalados.

De igual forma que lo anterior la *Red de Distribución*, lo que corresponde a una topología PtMP de una red WiMAX, es decir, una BS distribuye y controla los servicios y el tráfico hacia sus usuarios.

Existen tres puntos de distribución en la Red WILLAY: **Municipalidad Pomacanchi**, **Municipalidad Sangarará**, **Municipalidad Acomayo**, donde además de los ALB258E [ALB250] de la red troncal están conectadas vía Ethernet Estaciones Base tipo ARBA550 [ALB550], cuyo modo de funcionamiento será *mode bridging* puesto que todos los usuarios pertenecen a la misma red. Cada uno de los usuarios de las BS para tener acceso a los servicios de Internet y ToIP, tendrá instalado una estación suscriptor (SS-Suscriber Station o CPE) del tipo TR-WMX-5-16 [TRWMX5] del fabricante Tranzeo que además de ser interoperable con la BS ARBA550 son equipos económica y técnicamente recomendados.

6.2.4.1 Software Propietario de Gestión

Los fabricantes desarrollan su propio interfaz de monitoreo, configuración y gestión que soportados por el protocolo SNMP en la mayor parte de los casos. Los interfaces locales más comunes son Web y Command-Line Interface (CLI), los interfaces de gestión remota más utilizados son SNMP, XLM-RPC.

Las BS de nuestro ejemplo (ARBA550) posee un poderoso interface *Web*, probablemente este es el modo más simple de configurar los equipos WIMAX, es necesario un navegador como *Internet Explorer o Mozilla* para acceder a este interface, donde hace falta autenticarse. El protocolo HTTPS es usado para mayor seguridad de la comunicación.

Dependiendo de las características de la red, la gestión y/o configuración se pueden hacer por medio de una consola con comandos de línea (*CLI*), todas las operaciones que se pueden configurar en el interface web también están disponibles por este medio. A pesar de ser menos intuitivo y poco grafico ofrece las mismas funcionalidades que el acceso HTTPS, además de ser siempre la mejor alternativa cuando no está disponible un navegador de internet, es una opción interesante para la interoperabilidad con otros SW. En este caso es necesario establecer una conexión *SSH (Secure Shell)* a través de la dirección IP del equipo.

Una gestión *SNMP* está pensada para la gestión del estado del usuario, alarmas y proveer una visión general del sistema, permitiendo así una integración completa con los sistemas de gestión de redes.

En este equipo además se cuenta con un protocolo *open-source, XML-RPC* que puede ser usado y modificado por el usuario final. Trabaja con archivos basado en el estándar XML haciendo así la comunicación más simple.

Por último, Alentia como empresa fabricante de productos WIMAX y desarrolladora de su propio SW, implementa en sus equipos la solución de gestión *AMS (Alentia Management Solution)*, este interface permite trabajar con las más recientes versiones de SNMP. Siendo uno de los interfaces más avanzados e intuitivos para la gestión de los dispositivos.

Ejemplo de Interfaz de Gestión:

- **REDLINE: RMS-RedLine Management Solution:** Interfaz propio de REDLINE-Fabricante WiMAX

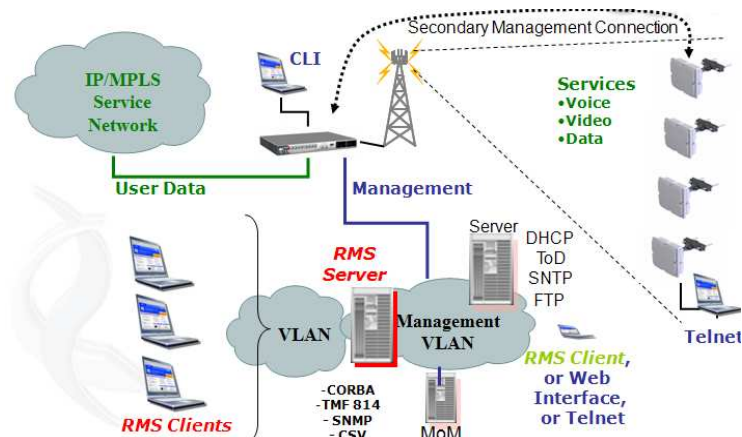


Figura 67. RedLine Interface de Gestión



Figura 68. RedLine Gestión de Equipos

La BS ARBA550 está preparada para trabajar en varios modos de Bridging, Routing, Multicast, NAT, Net-Hook.

6.2.4.2 Modos de Funcionamiento BS

Modo Routing: Está definido como el clásico funcionamiento o modo de trabajo donde las unidades tienen tablas de encaminamiento definidas y estas redirigen los paquetes por uno u otro interface siguiendo estas reglas previamente establecidas.

Modo Bridging: La BS permite un funcionamiento transparente en capa 2 entre diferentes subredes. La principal ventaja de este modo de funcionamiento tan simple y definido por defecto en los equipos (Plug-and-Play), es que no es necesario añadir manualmente la ruta hacia las unidades clientes ni a ningún otro equipo de la red.

Modo IP Multicast: este modo es interesante para las transmisiones broadcast o multicast.

6.3 TABLA COMPARATIVA IEEE802.11 e IEEE802.16

Parámetros	IEEE802.11				IEEE802.16			Comentarios	
	WIFI				WiMAX			IEEE802.11	IEEE802.16
Nombre Comercial	WIFI				WiMAX				
Versiones	802.11 a	802.11 b/g	802.11 n	802.11 n	802.16 d	802.16 e	802.16-2009		Última versión del estándar junta funcionalidades fija y móvil (2009)
Frecuencia	5GHz	2,4GHz	2,4GHz	5GHz	3.5GHz(lic) 5.8GHz	3.5GHz	3.5GHz(lic) 5.8GHz	El rango de frecuencias de la legislación de cada país. En Perú: - Bandas No Licenciadas: 2.4/5.4GHz	El rango de frecuencias depende de la legislación de cada país. En Perú: - Bandas Licenciadas: 3.5GHz - Bandas No Licenciadas: 5.8GHz
Aplicaciones	Voz Datos Video	Voz Datos Video	Voz Datos Video	Voz Datos Video	Voz Datos Video	Voz Datos Video	Voz Datos Video		
Potencia Transmitida (máxima)	24dBm	25dBm	24dBm	24dBm	24dBm	36dBm	...	La potencia transmitida depende de la frecuencia(*). - Experiencias realizadas en laboratorio, placas R52N de mikrotic, podemos observar que para lograr velocidades máximas teóricas la potencia baja hasta 11dBm .	También depende de la banda de trabajo. En <i>datasheets</i> se puede encontrar que la Ptx_max= 19dBm para 64QAM-3/4
Potencia Consumida	2.64Wmax 3.3V +/- 10% DC @800mA-max (600mA tipc)	2.64Wmax 3.3V +/- 10% DC @800mA-max (600mA tipc)	2.4W	2.4W	BS : <18W CPE : 3W promedio	BS : <25W CPE : 15W promedio	...		Depende mucho del fabricante, los datos mostrados (fija) son BS de Albetnia y CPE de transeo (basado en chipset de wavesat NP7256). Datos movil de Aperto[APERTO].
QoS	No	No	No	No	SI	SI	SI	Los equipos que implementen el estándar IEEE802.11e tienen capacidad de ofrecer QoS WIFI.	La QoS ofrecida por WiMAX es detrmnista y no estadística como la de WIFI. - QoS diseñada para voz/video. Diferenciación de servicios
Velocidad (máxima)	54 Mbps Ptx:19dBm/Srx:-70dBm	b: 11 Mbps Ptx:25dBm/Srx:-87dBm g: 54 Mbps Ptx:20dBm/Srx:-70dBm	144.4 Mbps (BW_chn: 20Mhz/ Ptx:15dBm/Srx:-76dBm)	144.4 Mbps (BW_chn: 20Mhz/ Ptx:15dBm/Srx:-75dBm)	70Mbps BWcanal 20Mhz 37,7 Mbps Bwcanal 10 Mhz	100Mbps BWcanal 20Mhz	70Mbps BWcanal 20Mhz 37,7 Mbps Bwcanal 10 Mhz	La capacidad bruta en WIFI es de 54Mbps, en 11a, ya que la señal ocupa mayor ancho de banda, pero debido a su control al medio aleatorio, WIFI no puede especificar el tráfico neto disponible que por lo general es inferior a 20Mbps.	
BIT RATE	2,7 bps/Hz: hasta 54Mbps en un canal de 20MHz				3.8bps/Hz: hasta 75Mbps en 20MHz 5bps/Hz: hasta 100 Mbps en 20 MHz	5bps/Hz: hasta 100 Mbps en 20 MHz (existen canales de hasta 40MHz)	...	Se trata de 64OFDM (802.11a)	Se trata de 256 y 1024 OFDM
Cientes (máximos)	..	..	..	..	512 / 1000	512	... <u>Estándar nuevo</u> no existe versión práctica	No existen datos cuantificados del número de clientes de un AP WIFI , pero en la práctica se puede considerar 10 clientes un número máximo y optimista en distancia cortas. Para largas distancias lo mejor son enlaces PTP (1 cliente).	# 6 sectores (60ºantena sectorial) BS - 512 SS activas. # 4 sectores (90º antena sectorial) BS - 1000 SS activas (4x250),(*) Funcionamiento adecuado (RedLine) 64 simultanea y correctamente por sector.
Cobertura	..	..	..	..				Para zonas rurales y aisladas es importante que se manejen distancias largas, esto depende de cómo se pueda configurar algunos parámetros de las tarjetas inalámbricas como ACKTimeOut, CTSTimeOut y SlotTime. Ej. - 48/48/9 son valores por defecto - con 40 Km tenemos 289/289/143 (con MAD WIFI)	Figura 34 y 72. - La máxima distancia se consigue con una modulación BPSK y se hablan de distancias de hasta 50Km, con equipos PTP con parámetros de potencia, sensibilidad, LOS...adecuados. - WiMAX ocupa solo 9MHz(de los 10MHz de Bwcanal), por lo que integra menos ruido, la sensibilidad del receptor WiMAX es 2,5 dB mejor que la de WIFI(por ej.), lo que se traduce en alcance en condiciones LOS de un 35%mayor.
Escalabilidad BW canal	Ancho de canal 20 Mhz				- Ancho de canales flexible de 1,5 MHz a 20 MHz para bandas licenciadas o no. - Reutilización de las frecuencias - Posibilidad de "cell planing "para servicios comerciales de proveedores			Valor FIJO - Solo 3 canales no se solapan (5 para 802.11a)	En 802.16 esta únicamente limitado por la disonibilidad del espectro
Gestión	HTTP(Web), CLI,SNMP	HTTP(Web), CLI,SNMP	HTTP(Web), CLI,SNMP	HTTP(Web), CLI,SNMP	Protocolos sobre los que se basan la gestión: HTTP(Web), CLI,SNMP, FTP(SW updates), SNMP, XML-RPC			Fabricantes como Mikrotik han implementado aplicaciones de configuración y gestión sobre protocolos SNMP. - En EHAS[EHAS] se utiliza la interfaz CENTRON, que se basa en el sistema de gestión Nagios. - Existen también ZenOss y Zabbix que resultan igualmente interesantes.	Software que soportado sobre protocolo SNMP Ej: SW de gestión Proprietario - RMS*:RedLine Management Suite (Figura23-24), - AMS***: Albetnia Management Solution
Notas:	(**) Dado que se trabajan en frecuencias que tiene limitacion de potencia. (**) Datos REDLINE (***) Datos ALBENTIA								

Es necesario indicar que la tabla anterior, se refiere a una descripción de parámetros para la comparativa entre WiFi y WiMAX tecnologías que implementan IEEE802.11 e IEEE802.16, respectivamente. Se hará especial hincapié en frecuencias de 5GHz de 802.11a y 802.16d, ya que son la versión actual y propuesta de la red Willay.

Las conclusiones de lo anterior son:

- WiFi emplea canales de 20MHz, mientras que WiMAX permite el uso de canales de 10 MHz, por lo que hay más canales disponibles en el mismo espectro RF en el caso de WiMAX.
- Ambos estándares emplean las mismas modulaciones de portadoras, por lo que ambas requieren la misma relación señal a ruido (SNR) para una misma modulación. Debido a que la señal WiMAX sólo ocupa 9 MHz frente a los 16,25 MHz de WiFi, por lo que el ruido integrado es menor, la sensibilidad del receptor WiMAX es 2,5 dB mejor que la de un receptor WiFi, lo que se traduce en un alcance en condiciones LOS de un 35% mayor.
- Con la hipótesis de que en IEEE802.16 se utiliza menor ancho de banda, la eficiencia espectral máxima a nivel físico es de 3,3 bps/Hz en WiFi frente a los 4,2 bps/Hz en WiMAX lo que se traduce en mayores velocidades para mismos alcances.
- El control de acceso al medio en IEEE802.11 es estadístico y con mecanismo de contienda, mientras que en IEEE802.16 es determinista y libre de contienda.
- WiFi transmite paquete a paquete y WiMAX transmite trama a trama.
- La capacidad bruta a nivel físico es superior en WiFi (IEEE802.11a), 54 Mbps, frente a WiMAX (37,7 Mbps-canal 10MHz-), debido al mayor ancho de banda ocupado por la señal. Sin embargo, y debido a su control de acceso al medio aleatorio, WiFi no puede especificar el tráfico neto disponible, que por lo general suele ser inferior a los 20 Mbps.
- WiMAX soporta mayor dispersión multitrayecto que WiFi. Es decir, con diferencias de recorridos superiores a 120 metros la señal WiFi se degrada (diseñado para propagación en interiores), mientras que WiMAX soporta dispersiones superiores a 2.000 metros, por lo que es una señal mucho más robusta en entornos exteriores.
- El número de clientes en WiMAX es notablemente superior que en WiFi. IEEE802.16 ofrece redes flexibles para extensión y mayor número de clientes con la misma BS reduciendo los costes que esto supone.
- Existe una “contienda” en WiMAX a la hora de identificarse en la red pero una vez dentro, puede disfruta de todas las ventaja que la red ofrece, entre ella QoS por servicios diferenciados.

- Los interfaces de gestión en WiMAX cada vez son más amigables y gráficos, aunque WiFi está ganando terreno en este sentido.
- WiMAX ya está diseñado para alcances más largos que WiFi por lo que lleva clara ventaja para largas distancias, además de ofrecer mayor estabilidad en este tipo de enlaces.
- Posibilidad de trabajo en NLOS aunque para poder beneficiarse de esta característica lo más recomendable son entornos urbanos donde las reflexiones (en edificios, casa, calles...) se puedan aprovechar para los enlaces, esto no funciona en entornos rurales... por tanto no aplica a nuestro caso. Esto no pasa en WiFi que necesariamente ha de existir LOS.

6.3.1 Figuras de Tabla Comparativa

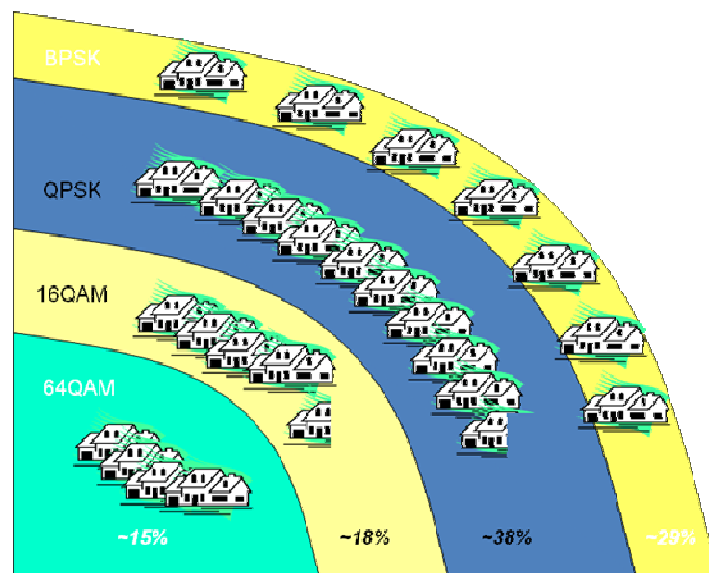


Figura 69. Cobertura WIMAX

6.4 SITUACIÓN ECONÓMICA-Caso I

6.4.1 INTRODUCCIÓN

El mercado WiMAX sigue una tendencia ascendente, por lo que si hace 3 ó 4 años adquirir un equipo e esta tecnología era casi prohibitivo para un operador de un país emergente, actualmente se pueden encontrar varias empresas con grandes despliegues en países del Sur [ALVLatin09][WXDev09]. Hoy en día aún los costes son elevados pero la relación precio/beneficio y las ventajas de WiMAX en cuanto a gestión compensan las inversiones iniciales de los despliegues. Los proveedores y clientes son contundentes en este aspecto, es indiscutible lo robusta que es esta tecnología.

Las relación de precios de los equipos WiMAX ha sido la parte más complicada del trabajo, puesto que no existen precios públicos exactos de los equipos, esto como es evidente depende del fabricante y de los requerimientos del despliegue (frecuencia de trabajo, velocidad, cobertura, etc...).

Los fabricantes son reticentes a un presupuesto sino se considera una posible compra, lo que ha hecho difícil la tarea de situación económica actual del mercado WiMAX.

6.4.2 EQUIPOS WIMAX. Precios y Características

Los equipos que se ha utilizado en el diseño de la red Willay son:

- **ALB258E**



El ALB258E pertenece a la serie de los ALB250 que funciona en banda 5725-5875 MHz y posee un conector tipo N para una antena externa. Este equipo pertenece a una familia de soluciones con altas prestaciones OFDM para conexiones *wireless* de *backhaul* y *bridging*, compatible con el estándar IEEE802.16-2004 diseñado para bandas no licenciadas. Tiene una capacidad neta máxima de 34.4Mbps. Es una solución IP orientada a enlaces PtP, puede también ser usada en enlaces PtMP gracias a su compatibilidad con los sistemas de backhaul ALB400. Este equipo es utilizado (apto. 2.3) en los enlaces PtP de la red de transporte y de distribución de la red Willay. Posee una MAC basada en tramas libre de contienda (*contentation free*) y una plataforma hardware robusta. Incorpora una *layer-2* avanzada que permite priorizar y asignar el recurso físico para la diferenciación múltiple de flujos de servicio lo que se traduce en *Calidad de Servicio-QoS*. Un enlace PtP completo está formado por dos unidades ALB258E, una actuando como maestro la otra como esclavo, cada estación consta de una unidad indoor y otra outdoor (*Outdoor Unit Weatherproof*) con una antena integrada de 23dBi(opcional), en Willay se utiliza en puerto externo para antena del ALB258E. Las dos unidades están conectadas por Ethernet (cable de categoría 5). La integración del sistema y la gestión están soportados por un intuitivo sistema de gestión basado en SNMP, web, CLI y XML-RPC (basado en la configuración remota del sistema).

Las características del sistema se recogen en la Figura 70:

Radio parameters			
Frequency Band	5470-5725 MHz (ETSI) or 5725-5875 MHz (FCC). See ordering options.		
Modulation	OFDM IEEE 802.16-2004 - 256 subcarriers, cyclic prefix 1/4, 1/8, 1/16 or 1/32		
Supported channel bandwidth	1.75, 3.5, 7 and 10 MHz		
Adaptive modulation	BPSK, QPSK, 16QAM and 64QAM		
FEC code rate	1/2, 2/3 and 3/4 concatenated Reed-Solomon and Viterbi		
Maximum output power	+24 dBm		
Transmit power control	> 40 dB		
Duplexing method	TDD (Time Division Duplexing)		
Uplink/Downlink allocation	Programmable from 4:1 to 1:4		
Dynamic Frequency Selection	Yes		
Antenna	23 dBi integrated antenna or N-type 50 ohms connector for external antenna		
RF parameters	Modulation	Sensitivity (1.75 MHz)	Sensitivity (10 MHz)
	BPSK-1/2	-99.5 dBm	-92 dBm
	QPSK-1/2	-96.5 dBm	-89 dBm
	QPSK-3/4	-94 dBm	-86.5 dBm
	16QAM-1/2	-91 dBm	-83.5 dBm
	16QAM-3/4	-87.5 dBm	-80 dBm
64QAM-2/3	-83.5 dBm	-76 dBm	
64QAM-3/4	-81.5 dBm	-74 dBm	
Data traffic and Throughput			
Maximum over-the-air data rate	37.7 Mbps (64QAM-3/4, 10 MHz BW)		
Ethernet aggregated throughput	34.4 Mbps (64QAM-3/4, 10 MHz BW)		
MAC efficiency	Aggregated Ethernet throughput is up to 91% of over-the-air rate		
ARQ support	Yes. Selectable per service flow		
Encryption	AES and 3DES		
Quality of Service (QoS)			
QoS control	Layer-2 QoS. Min/Max granted capacity per service flow		
Service differentiation	Layer-2	MAC source/destination address, EtherType, VLAN tag	
	Layer-3	DSCP ToS, IP source/destination address and subnet, Protocol type	
	Layer-4	TCP, UDP source/destination port range	
Differentiated service flows	Unlimited		
Management and Provisioning			
Management local interfaces	Web, Command-Line Interface		
Management remote interfaces	SNMP, XML-RPC		
Network functionality			
Layer-2 Network functionality	Bridging (IEEE 802.1), VLAN (IEEE 802.1q)		
Layer-3 Network functionality	Static/Dynamic routing, NAT, DHCP server/client		
Networking modes	Bridge mode, IP routing		
Data Interface	10/100 Base-T Ethernet RJ45		
Physical, Mechanical and Electrical			
Size	395 x 265 x 95 mm		
Outdoor Unit Weight	3.2 kg		
Power Supply	Basic	802.3af compliant (PoE)	
	Optional	12 or 48 Volts (separate connector for solar panel supply)	
Power Consumption	<18 Watts (full traffic conditions)		
Standards Compliance			
Radio	ETSI EN 301 893, ETSI EN 302 502		
Environmental	ETSI EN 300 019-1-4 C4.1E (ODU), ETSI EN 300 019-1-3 C3.2 (IDU)		

Figura 70. Características de ALB258E

Precio	2007	2009
	6000,00 € aprox.	4,500\$⁸ aprox.

▪ **ALB-450**



Una estación base ALB450 está formada por una unidad externa (ALB458) que trabaja en la banda de 5725-5875MHz, y una unidad interna ALB-IDU-4 unidad de 4 sectores, necesaria para los puntos donde existe más de una interfaz inalámbrica, unidades conectadas por Ethernet. Este equipo cumple las características del estándar IEEE802.16-2009, es un sistema PtMP que opera en bandas no licenciadas. Una BS ALB450 puede ser usada para proveer conexión inalámbrica de tipo PtMP con estaciones ALB200 como suscriptoras en modo esclavo. Tiene un caudal máximo de 35Mbps por sector. Tal y como está diseñada nuestra red son necesarias BS de múltiples sectores estas han de estar sincronizadas de forma que se cancele la

⁸ Estos precios son estimados, no implica que la empresa mencionada maneje estos precios exactamente.

interferencia entre sectores. Esta familia de BS implementa lo mejor del estándar, ARQ, QoS, múltiple convergencia de subcapas y alta diferenciación entre flujos de servicio por usuario. Se han escogido estos equipos, puesto que en la combinación PtMP, ALB450/250, se ha minimizado el *overhead* de la red lo que maximiza la capacidad de la capa MAC (hasta un 94%).

Las características del sistema se recogen en la Figura 71:

Radio parameters			
Frequency Band	5470-5725 MHz (ETSI) or 5725-5875 MHz (FCC). See ordering options.		
Modulation	OFDM IEEE 802.16-2004 - 256 subcarriers, cyclic prefix 1/4, 1/8, 1/16 or 1/32		
Supported channel bandwidth	1.75, 3.5, 7 and 10 MHz		
Adaptive modulation	BPSK, QPSK, 16QAM and 64QAM		
FEC code rate	1/2, 2/3 and 3/4 concatenated Reed-Solomon and Viterbi		
Maximum output power	+24 dBm (+20 dBm for 64QAM-3/4)		
Transmit power control	> 40 dB		
Duplexing method	TDD (Time Division Duplexing)		
Uplink/Downlink allocation	Programmable from 4:1 to 1:4		
TDD synchronization	External or internal references (10 MHz, 1pps). Requires ARBA-IDU unit		
Antenna connector	N-type, 50 ohms		
RF parameters	Modulation	Sensitivity (1.75 MHz)	Sensitivity (10 MHz)
	BPSK-1/2	-93.5 dBm	-92 dBm
	QPSK-1/2	-96.5 dBm	-95 dBm
	QPSK-3/4	-94 dBm	-96.5 dBm
	16QAM-1/2	-91 dBm	-83.5 dBm
	16QAM-3/4	-87.5 dBm	-80 dBm
64QAM-2/3	-83.5 dBm	-76 dBm	
64QAM-3/4	-81.5 dBm	-74 dBm	
Data traffic and Throughput			
Maximum over-the-air data rate	37.7 Mbps (64QAM-3/4, 10 MHz BW)		
Ethernet aggregated throughput	35 Mbps (64QAM-3/4, 10 MHz BW)		
ARQ support	Yes, per IEEE 802.16-2004 standard - Selectable per service flow		
Simultaneous registered users	Unlimited		
Encryption	AES and 3DES		
Quality of Service (QoS)			
Supported QoS types	UGS, RTPS, nRTPS and BE (IEEE 802.16-2004 standard)		
Service differentiation	Layer-2	MAC source/destination address, EtherType, VLAN tag	
	Layer-3	DSCP ToS, IP source/destination address and subnet, Protocol type	
	Layer-4	TCP, UDP source/destination port range	
Differentiated service flows	Unlimited differentiated services per user		
Management and Provisioning			
Management local interfaces	Web, Command-Line Interface		
Management remote interfaces	SNMP, XML-RPC		
User and service local provisioning	XML local database		
User and service centralized provisioning	AAA Radius, LDAP, XML-RPC		
Network functionality			
Layer-2 Network functionality	Bridging (IEEE 802.1), VLAN (IEEE 802.1q)		
Layer-3 Network functionality	Static/Dynamic routing, NAT, DHCP server/client		
Supported CS	Ethernet, IPv4oEthernet, VLAN, IPv4oVLAN		
Networking modes	Bridge mode, IP routing		
Data interface	10/100 Base-T Ethernet RJ45		
Physical, Mechanical and Electrical			
Size	395 x 265 x 95 mm		
Outdoor Unit Weight	3.2 kg		
Power Supply	Basic	802.3af compliant (PoE)	
	Optional	12 or 48 Volts (separate connector for solar panel supply)	
Power Consumption	<18 Watts (full traffic conditions)		
Standards Compliance			
Modulation	IEEE 802.16-2004		
Radio	ETSI EN 301 893, ETSI EN 302 502		
Environmental	ETSI EN 300 019-1-4 C4.1E (ODU), ETSI EN 300 019-1-3 C3.2 (IDU)		

Figura 71. Características de ALB450

Precio	2007	2009
	6000,00 € aprox.	4,500\$⁹ aprox.

⁹ Estos precios son estimados, no implica que la empresa mencionada maneje estos precios exactamente.

▪ **ARBA550**



La Estación Base ARBA550 opera en la banda no licenciada de 5GHz. Esta BS esta implementada siguiendo el estándar IEEE802.16-2009, provee un alto *throughput* gracias a su alta velocidad de datos OFDM a nivel de capa física y su alta eficiencia a nivel de capa MAC. Es muy útil en escenarios de difícil cobertura basado en un HW robusto. Totalmente escalable ofrece control de QoS en la múltiple diferenciación de servicios y usuarios, total control de los parámetros de la red, ARQ, encriptación de datos y varios interfaces de gestión. Se trata de una BS interoperable con varios CPE de bajo coste de otros fabricantes un ejemplo es el utilizado en el presente diseño TR-WX-5-16 de *Tranzeo*. Puede ser usada tanto en mono como en multisección, además de tener un *throughput* comparable con el de una banda licenciada gracias a usar un ancho de canal de hasta 10MHz. Uno de sus valores añadidos es la facilidad de instalación además de su bajo consumo de potencia, condiciones ideales para su implementación en áreas rurales. Análogamente a los equipos anteriores los interfaces de gestión están basados en SNMP, web, CLI y XML-RPC (protocolo de acceso remoto).

Las características del sistema se recogen en la Figura 72:

Radio parameters			
Frequency Band	5470-5725 MHz (ETSI) or 5725-5825 MHz (FCC). See ordering options.		
Modulation	OFDM IEEE 802.16-2009 - 256 subcarriers, cyclic prefix 1/4, 1/8, 1/16 or 1/32		
Supported channel bandwidth	1.75, 3.5, 7 and 10 MHz		
Adaptive modulation	BPSK, QPSK, 16QAM and 64QAM		
FEC code rate	1/2, 2/3 and 3/4 concatenated Reed-Solomon and Viterbi		
Maximum output power	>24 dBm		
Transmit power control	>40 dB		
Duplexing method	TDD (Time Division Duplexing)		
Uplink/Downlink allocation	Programmable from 4:1 to 1:4		
Dynamic Frequency Selection	Yes		
TDD synchronization	External or internal references (10 MHz, typical). Requires ARBA-IDU unit		
Antenna connector	N-type, 50 ohms		
RF parameters	Modulation	Sensitivity (1.75 MHz)	Sensitivity (10 MHz)
	BPSK-1/2	-93.5 dBm	-82 dBm
	QPSK-1/2	-96.5 dBm	-89 dBm
	QPSK-3/4	-94 dBm	-86.5 dBm
	16QAM-1/2	-91 dBm	-83.5 dBm
	16QAM-3/4	-87.5 dBm	-80 dBm
	64QAM-2/3	-83.5 dBm	-76 dBm
64QAM-3/4	-81.5 dBm	-74 dBm	
Data traffic and Throughput			
Maximum over-the-air data rate	37.7 Mbps (64QAM-3/4, 10 MHz BW)		
Max Ethernet aggregated throughput	Basic	20 Mbps (40Mbps in 20MHz)	
	Advanced [1]	34.0 Mbps (69.8Mbps in 20MHz)	
ARQ support	Yes, per IEEE 802.16-2009 standard - Selectable per service flow		
Simultaneous registered users	Basic	20	
	Advanced [2]	Unlimited	
Encryption	AES and 3DES		
Quality of Service (QoS)			
Supported QoS types	UGS, RTPS, nRTPS and BE (IEEE 802.16-2009 standard)		
Service differentiation	Layer-2	MAC source/destination address, EtherType, VLAN tag	
	Layer-3	DSCP ToS, IP source/destination address and subnet, Protocol type	
	Layer-4	TCP, UDP source/destination port range	
Differentiated service flows	Basic	One bidirectional service per user	
	Advanced [3]	Unlimited differentiated services per user	
Management and Provisioning			
Management local interfaces	Web, Command-Line interface		
Management remote interfaces	SNMP, XML-RPC		
User and services local provisioning	XML local database		
User and services centralized provisioning	AAA Radius, LDAP, XML-RPC		
Network functionality			
Layer-2 Network functionality	Bridging (IEEE 802.1), VLAN (IEEE 802.1d)		
Layer-3 Network functionality	Static/Dynamic routing, NAT, DHCP server/client		
Supported CS	Ethernet, IPv4/Ethernet, VLAN, IPv4/VLAN		
Networking modes	Bridge mode, IP routing		
Data interface	10/100 Base-T Ethernet RJ45		
Physical, Mechanical and Electrical			
Size	395 x 265 x 95 mm		
Outdoor Unit Weight	3.2 kg		
Power Supply	Basic	802.3af compliant (PoE)	
	Optional	12 or 48 Volts (separate connector for solar panel supply)	
Power Consumption	<18Watts (full traffic conditions)		
Standards Compliance			
WiMAX	IEEE 802.16-2009 OFDM PHY		
Radio	ETSI EN 301 893, ETSI EN 303 502		
Environmental	ETSI EN 300 019-1-4 CA.1E (ODU), ETSI EN 300 019-1-3 C3.2 (IDU)		

Figura 72. Características de ARBA550

Precio	2006	2008	2009
	8000,00 € aprox.	5000,00 € aprox.	4,500\$¹⁰ aprox.

▪ **TR-WMX-5-16**



Este equipo se trata de una unidad suscriptora (SS) de la familia TR-WMX-5GHz de Tranzeo dentro de las unidades de “low cost units” del fabricante, basado en el estándar IEEE802.16-2004. Basado en NP7256 Wavesat chipset.

Las características del sistema se recogen en la Figura 73:

RADIO																																									
Product Operation	LOS, NLOS Point-to-Multipoint Subscriber Unit																																								
RF Band	5.15 to 5.875 GHz ²																																								
Channel Bandwidths	3.5MHz, 5 MHz, 7MHz, 10MHz selectable																																								
Frequency Resolution	500KHz steps																																								
Spectral Efficiency	5 bits/sec/Hz (64-QAM unencoded)																																								
Receive Sensitivity typical at BER <10 ⁻⁴	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Burst Type</th> <th>3.5MHz</th> <th>5MHz</th> <th>7MHz</th> <th>10MHz</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>BPSK 1/2</td> <td>-95</td> <td>-93</td> <td>-92</td> <td>-89.5</td> </tr> <tr> <td>QPSK 1/2</td> <td>-93</td> <td>-91</td> <td>-90</td> <td>-88</td> </tr> <tr> <td>QPSK 3/4</td> <td>-91</td> <td>-89</td> <td>-88</td> <td>-85.5</td> </tr> <tr> <td>16-QAM 1/2</td> <td>-88</td> <td>-86</td> <td>-85</td> <td>-82.5</td> </tr> <tr> <td>16-QAM 3/4</td> <td>-85</td> <td>-83</td> <td>-81</td> <td>-79</td> </tr> <tr> <td>64-QAM 2/3</td> <td>-80</td> <td>-78</td> <td>-77</td> <td>-74.5</td> </tr> <tr> <td>64-QAM 3/4</td> <td>-78</td> <td>-76</td> <td>-75</td> <td>-72.5</td> </tr> </tbody> </table>	Burst Type	3.5MHz	5MHz	7MHz	10MHz	BPSK 1/2	-95	-93	-92	-89.5	QPSK 1/2	-93	-91	-90	-88	QPSK 3/4	-91	-89	-88	-85.5	16-QAM 1/2	-88	-86	-85	-82.5	16-QAM 3/4	-85	-83	-81	-79	64-QAM 2/3	-80	-78	-77	-74.5	64-QAM 3/4	-78	-76	-75	-72.5
Burst Type	3.5MHz	5MHz	7MHz	10MHz																																					
BPSK 1/2	-95	-93	-92	-89.5																																					
QPSK 1/2	-93	-91	-90	-88																																					
QPSK 3/4	-91	-89	-88	-85.5																																					
16-QAM 1/2	-88	-86	-85	-82.5																																					
16-QAM 3/4	-85	-83	-81	-79																																					
64-QAM 2/3	-80	-78	-77	-74.5																																					
64-QAM 3/4	-78	-76	-75	-72.5																																					
Modulation	OFDM (BPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM)																																								
Radio Access Method	TDD																																								
RF Output Power (64QAM)	+20 dBm max (5.725-5.875GHz)+17dBm (5.15-5.725GHz)																																								
RF Output Dynamic Range	30 dB																																								
Antenna Options	16, 20, or 24dBi integrated antenna or N-type connector																																								
<small>²Not all channels approved for use in all areas</small>																																									
DATA COMMUNICATIONS																																									
RF	IEEE 802.16-2004																																								
Data	IEEE 802.3 CSMA/CD																																								
VLAN support	IEEE 802.1Q																																								
Error Control Coding	Concatenated Reed-Solomon Convolutional Code																																								
Polarization	Horizontal or Vertical																																								
MANAGEMENT																																									
LED Display	Link / status / signal strength / power																																								
Network Protocol	TCP/IP																																								
Encryption Protocol	DES-CBC, AES-CCM																																								
Subscriber Unit monitoring	SNMP, Web-based GUI, Telnet, SSH																																								
Subscriber Unit management	Web-based GUI																																								
Ethernet Connector	10/100Base-T (water tight RJ-45)																																								
ENVIRONMENTAL																																									
Operating Temperature	-40C to +55C																																								
Power requirement	IEEE 802.3 (PoE) and Auxillary POE																																								
STANDARDS AND REGULATIONS																																									
CE/Industry Canada, FCC Part 15, EMC: EN 301 489, Safety: EN 60950, Radio: EN 302 502, EN 301 893, IP67, RoHS																																									
WARRANTY																																									
3 years parts and labor																																									

Figura 73. Características de TR-WX-5-16

Precio	2006	2009
	350 \$ aprox.	243 \$¹¹ aprox.

¹⁰ Estos precios son estimados, no implica que la empresa mencionada maneje estos precios exactamente.

La distribución de estos equipos se ha explicado con detalle en apartados anteriores (6.2.4 *Desarrollo y Puntos de Instalación*).

6.4.3 COMPONENTES ADICIONALES

Como cualquier instalación de tipo Telecomunicaciones se utilizan una serie de accesorios, además de los propios equipos, una idea de lo necesario en este tipo de implementación la tenemos en la Tabla 15:

Descripción	Precio
Equipos y accesorios Eléctricos :	
PoE	\$ 10
Batería de 12VDC-240Ah (Ritar) [Ritar]	\$ 490
UPS	\$ 450
Fuente de 3ª	\$24
Accesorios Generales:	
Cable cat.5 (Ethernet)	\$ 15,95
Cable de Red UTP de 8 hilos	\$ 20
Canaletas	\$ 25
Toma Corrientes	\$ 10
Enchufes	\$ 8
Cinta Aislante	\$ 5
Elementos de Ferretería	\$ 50

Tabla 15. *Costes adicionales*

Los accesorios que se pueden utilizar dependen mucho del tipo de red y del estado de la misma. En nuestro caso y dado que la red esta operativa, la reutilización de infraestructura (torres y soporte mecánico) es lo más acertado, después de analizar los posibles cambios y comprobar que no son posibles, instalar todo el HW necesario en los mismo puntos en los que se tiene la Red Willay-WiFi es la mejor opción.

Además, de los equipos necesarios harán falta cables, enchufes, cintas aislantes..etc, catalogados como accesorios de uso general y algunos de ferretería. El mayor “problema” que puede surgir en tema de accesorios y/o equipos es el sistema eléctrico, en 4.1 *EQUIPOS WIMAX. Precios y Características* según la información técnica de las unidades es necesario mayor suministro de alimentación, por lo que además de lo que instalado es necesario fuentes y baterías de mayor capacidades. El mayor inconveniente de estos dispositivos en despliegues de zonas rurales es la potencia consumida, por lo que las fuentes han de ser de mayor amperaje al utilizado en placas WiFi.

En este apartado se ha querido presentar un *valor aproximado* que supondría adicionalmente al coste total la migración de esta red a la tecnología WiMAX. No es objetivo

¹¹ Estos precios son estimados, no implica que la empresa mencionada maneje estos precios exactamente.

de este apartado mostrar coste futuros de mantenimiento, por lo que no se incluyen posibles equipos y/o accesorios necesarios para este fin, sin incluir así presupuesto adicional de mantenimiento.

6.4.4 COSTES DE LA TOPOLOGÍA

A continuación detallaremos cual es coste total de la red Willay, diseñada por completo en WiMAX. La referencia, tipo y número de unidades, que se ha utilizado para la siguiente tabla de precios se han detallado en apartados anteriores (6.2.4Desarrollo y Puntos de Instalación):

Descripción	Cantidad	Precio Unidad	Precio Total	
Equipo técnico	Equipos			
	ALB200	12	4500	\$ 54.000,00
	ALB458	2	4500	\$ 9.000,00
	ARBA550	3	4500	\$ 13.500,00
	TR-WX-5-16	10	243	\$ 2.430,00
	Antenas			
	Antena de 28.5dBi	8	280	\$ 2.240,00
	Antena de 27dBi	2	95	\$ 190,00
	Antena de 19 dBi	2	90	\$ 180,00
	Antena de 12dBi	3	105	\$ 315,00
Suministro Eléctrico y Control	Electricidad			
	Batería			\$ -
	Fuentes			\$ -
	Paneles Solares			
				\$ -
	Control Eléctrico			
UPS			\$ -	
Accesorios	General			
	Valor aproximado	1	200	\$ 200,00
	Electricos aprox ¹²			\$ 2200,00
Total			\$ 84.255,00	

Tabla 16 .Coste de la Topología

El objetivo de este apartado es mostrar el *coste total aproximado* que supondría la implementación de una red como la detallada anteriormente (2.3 Desarrollo y Puntos de Instalación), con equipos de un fabricante certificado como ALBENTIA SYSTEMS con CPE de bajo coste de TRANZEO totalmente compatibles con estaciones base de fabricantes certificados.

En el apartado anterior se ha detallado un posible *costo adicional* que suponen materiales accesorios para esta topología, con lo descrito hasta el momento podemos concluir que esto supondría un 0,5% del coste total, como podemos apreciar y en esta tecnología no es significativo con respecto al costo de equipos propiamente dichos.

¹² Este valor adicional corresponde a posibles gastos de batería y UPS's que sean necesarios.

Capítulo 7

Caso de Estudio Red WiMAX de Cerro Pasco de GAMACOM en Perú

7 Red Cerro Pasco GAMACOM

7.1 RED HUAYLLAY Y SANTANA DE TUSI-PASCO GAMACOM

7.1.1 Antecedentes

La necesidad de comunicación en la sierra peruana, los distritos de HUAYLLAY Y SANTANA DE TUSI- PASCO, dan lugar a este proyecto cofinanciado por el Ministerio de Transportes y Comunicaciones por medio de FITEL (Fondo de Inversión en Telecomunicaciones) [FITEL09] y ejecutado por la empresa GAMACOM [GAMA09]. El objetivo es la Implementación de telefonía domiciliaria y locutorios telefónicos utilizando la tecnología WiMAX.

Distrito de Huayllay situado a en la vertiente de los andes sudamericanos, en la zona central del Perú, en la llanura intramontaña de la meseta de Bombón, se encuentra a 4200msnm. Tiene una superficie de 630,81km² con una densidad poblacional de 13 hab./km².

El distrito de Santa Ana de Tusi pertenece a la región de Pasco, se encuentra situado en la cuenca del Tahuarmayo, parte central de los Andes Peruanos con una altitud de 3640msnm y 300km². El clima del distrito es diverso, desde seco en las zonas bajas hasta gélido en ocasiones en las regiones de Tundra pasando por frío templado en algunas de sus comunidades.

El gobierno peruano desde hace varios años ha mostrado su interés por apoyar esta clase de proyectos, por medio de FITEL, un fondo destinado a la provisión del Acceso Universal a las telecomunicaciones, creado como mecanismo de equidad que financia la provisión de servicios de telecomunicaciones en áreas rurales y lugares considerados de preferente interés social.

Gamacom[GAMA09] es una empresa que con amplia experiencia en el sector de las telecomunicaciones cuenta con un moderno Telepuerto en Lima, actualmente tiene presencia a nivel nacional a través de *Cabinas Públicas de Telefonía* (13 en Lima y 45 en provincias), instaladas en la ciudad de Lima, Iquitos, Tumbes, Arequipa, Cusco, Huánuco, Juliaca, Cajamarca, Moquegua, Huaraz, Cerro de Pasco, Tacna e Ilo.

En julio de 2006 el proyecto piloto es aprobado, declarando su viabilidad dentro del marco del Sistema Nacional de Inversión Pública. Finalmente en diciembre de 2008, el proyecto se pone en marcha cumpliendo con la implementación de una red de

telecomunicaciones rurales, basada en *Tecnología Satelital en Banda C*, una red WiMAX y Protocolos de VoIP, permitiendo ofrecer servicios como :

- Telefonía Pública, en la modalidad de locutorios.
- Telefonía domiciliaria, con abonados interconectados mediante Tecnología WiMAX.

Que beneficia directamente a **25,031** personas de las zonas involucradas, posteriormente, se proveerá servicio de internet, lo que supondrá mayor cobertura tanto de servicios como de beneficiarios directos e indirectos.

Con la puesta en marcha de este programa, los pobladores de Huayllay y Santa Ana de Tusi podrán realizar llamadas cobradas por segundo. Antes de la prestación de este servicio, los pobladores de la zona, agricultores en su mayoría, tenían que caminar durante varias horas para poder comunicarse telefónicamente y, cuando lo lograban, pagaban elevadas sumas de dinero que se encontraban fuera del alcance de sus bolsillos.

Este proyecto supone un gran avance en el desarrollo de las localidades beneficiarias en los 2 distritos del departamento de Pasco, mejorando el servicio de comunicaciones existente.

7.1.2 OBJETIVO:

El objetivo general de este apartado es mostrar un ejemplo práctico de funcionamiento de una red WiMAX, se mostraran a continuación un estudio de los equipos usados en la red de Santana de Tusi y Huayllay de Pasco por Gamacom. Se intenta mostrar la eficiencia de gestión de los equipos WiMAX, ventaja clara sobre tecnologías como WiFi.

Los equipos utilizados en esta red son del fabricante RedLine [REDLI_09], estaciones base (BS's) de tipo AN100U [AN100_09]. Los interfaces de gestión de la BS de RedLine están soportados en protocolos como HTTP, CLI y SNMP.

La *Interfaz Web de la BS AN100U del paquete RedMAX de RedLINE*, será la que usaremos como ejemplo para detallar el monitoreo, configuración, gestión de una red como esta.

RED GAMACOM CERRO PASCO

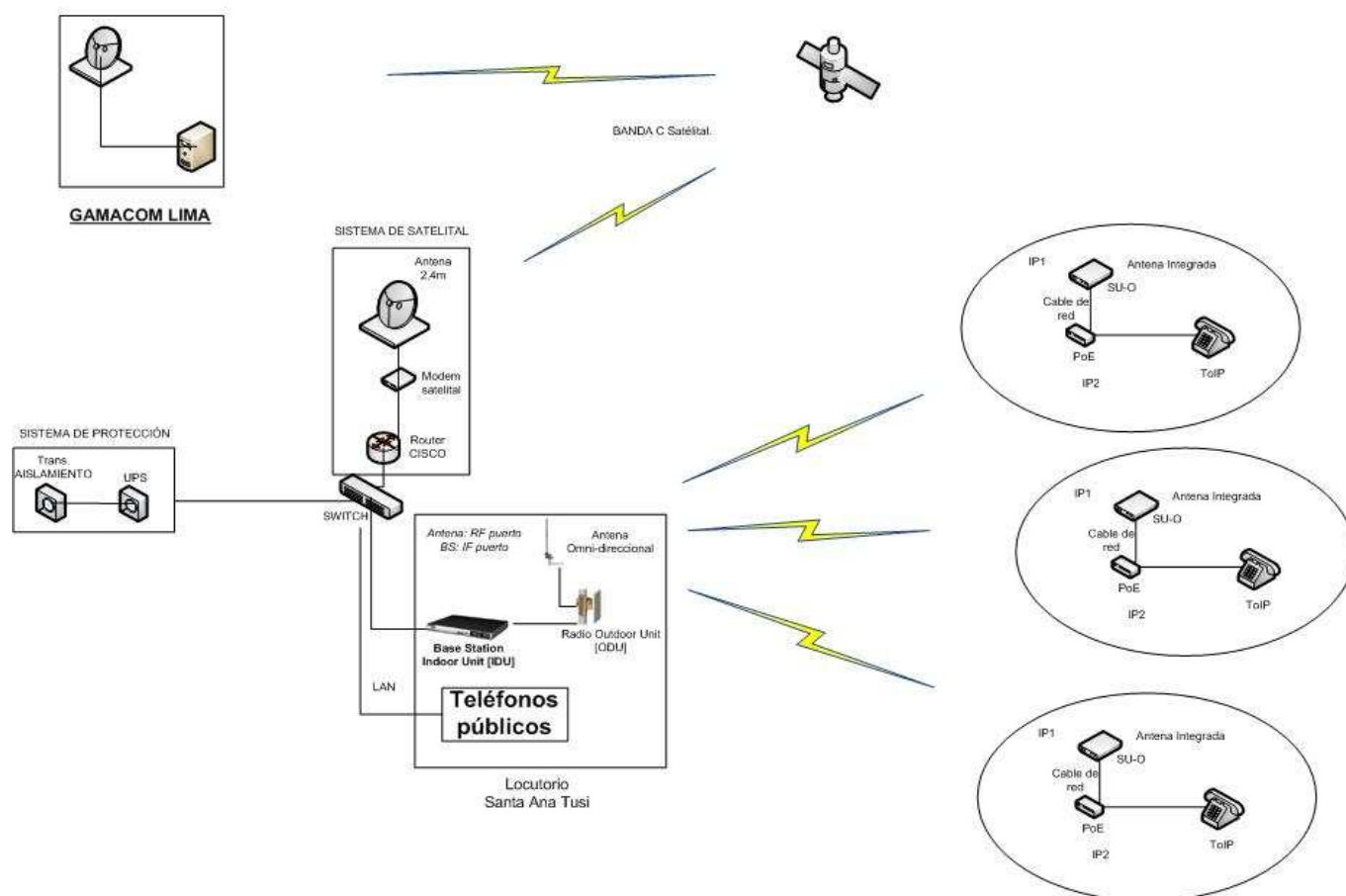


Figura 74. Red GAMACOM de Cerro de Pasco - Perú

7.1.3 VISIÓN GENERAL DE UNA ESTACIÓN BASE

7.1.3.1 INTRODUCCIÓN

Las BS que se han analizado cumplen condiciones del estándar IEE 802.16-2004 [IEEE16_09], también llamado WiMAX-fijo, para despliegues tanto point-to-point (PtP) como point-to-multipoint (PtMP).

Las Estaciones Base (BS), consisten en una unidad indoor (IDU), una outdoor (ODU) y antena. Cada estación suscriptor se registra y establece un enlace de datos bidireccional con la BS. La BS funciona como un central hub o concentrador conectado a un punto de acceso de una red WAN, gestionando los enlaces inalámbricos por suscriptores remotos. Las BS se esfuerzan en ofrecer *Calidad de Servicio (QoS)*, controlando los parámetros de tráfico de Uplink (UL) y de Downlink (DL), basado en tráfico de no contención con características predecibles de transmisión.

7.1.3.2 OPERACIÓN BÁSICA

Como se ha comentado en apartados anteriores (3 y 4), WiMAX es muy diferente a tecnologías como Ethernet o inalámbricas como WiFi, un poco más cercano a tecnologías como GSM o UMTS.

WiMAX está concebida para Redes de Área Metropolitana (MAN), antes que para redes de área local (LAN) como lo está WiFi.

Este tipo de concepto se basa en llevar todo el control desde el medio radio a través de la BS, la cual es responsable de gestionar las tramas de la transmisión WiMAX. Este método garantiza total control en las transmisiones, además de asegurar Calidad de Servicio.

La transmisión está basada en protocolo de paquetes (PDUs), esta filosofía de orientado a conexión permite reservar recursos y garantizar QoS.

7.1.3.3 SISTEMAS DE TOPOLOGÍA

WiMAX está basada en una topología de estrella con un máster y varios esclavos. El número de estaciones esclavo pueden variar desde 256 (Albentia) hasta 512 (RedLine) por sector teóricamente (11.2 Anexoll. Hojas de Características). El nodo máster en cualquier caso será la BS, los esclavos serán las SS (Subscriber Station) o también llamados CPE (Customer Premise Equipment). Prácticamente toda la inteligencia de la red está en la BS, la cual controla muchos de los parámetros de la red y provee del servicio a las SS.

La siguiente figura, Figura 75, muestra un ejemplo de funcionamiento básico en un escenario PtMP formado por una BS y 3 SS. Se usa el mismo canal de radio para las tres estaciones, la BS tiene tres usuarios identificados con ID 100/200 y 300, y un total de 8 flujos de servicio unidireccionales-FS.

Cada par de FS está diseñado para llevar un tipo de aplicaciones de servicio. Siendo esta la verdadera ventaja de WiMAX, a pesar de que el medio físico sea el mismo para todas las estaciones conectadas a la BS, la estructura interna de flujos de servicio permite aplicar distintas características de QoS para cada servicio final, con lo que se consigue total control sobre las comunicaciones.

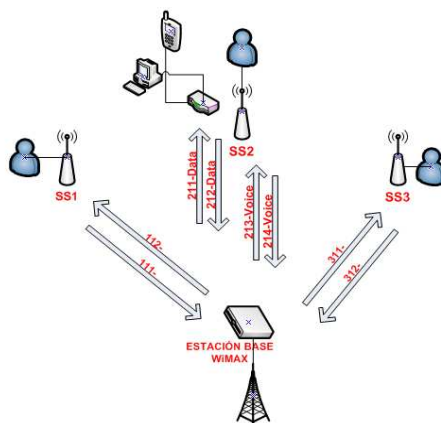


Figura 75. Ejemplo de SS's y FS's

7.1.3.4 PARÁMETROS WIMAX

Desde la capa física WiMAX es un sistema completamente tramado donde los *time slots* son reservados por cada conexión, con lo que los parámetros extremo a extremo de QoS son garantizados para cada servicio. La duración de la trama es variable y controlada por la BS. Las tramas son transmitidas periódicamente junto con otros parámetros específicos de la red el estándar define duraciones de trama de 2,5 a 20 ms.

Dependiendo del sistema y tipo de configuración, hay dos formas de multiplexar tramas: FDD (*Frequency Division Duplex*) y TDD (*Time Division Duplex*). En la FDD, usada típicamente por bandas licenciadas, hay dos canales de radio independientes para DL y UL con lo que el 100% de la duración de la trama es usada siempre en ambas direcciones cada una en un canal de radio independiente. Mientras que TDD implementa multiplexación en el tiempo, la BS decide cual es la duración de la trama que se reservara para el DL y cual para el UL, por lo que existe un único canal de radio para transmitir y recibir alternativamente.

Las BS del mercado trabajan en TDD (se puede observar en las hojas de características, anexos de este proyecto). Una BS es responsable de gestionar todos los usuarios conectados. Cada usuario que está conectado correctamente a la BS tiene un único identificador (ID). La BS está encargada de dividir cada subtrama (subtrama UL y subtrama DL) en *time slots* que pueden ser asignados a distintos usuarios.

En este sentido WiMAX es básicamente un sistema TDM dinámico, por tanto, la longitud de trama, posición y codificación son elegidas dinámicamente por la BS, los parámetros de QoS y las necesidades de ancho de banda (BW) dependen de las necesidades de red y servicios estos también son elegibles en la BS.

7.1.3.5 CONTROL SOBRE LOS PARÁMETROS DE RADIO

El IEEE 802.16 estándar define la modulación OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) con 256 subportadoras que permiten optimizar la comunicación en las condiciones de canal más severas, gracias a que optimiza el uso del canal con una mejor eficiencia espectral que 802.11a (por Ej.) y soporta mayor dispersión multirrayecto .

Además, la modulación adaptativa de cada subportadora es usada dependiendo de la SNR (*Signal Noise Ratio*- Relación Señal a Ruido) del enlace radio. Por lo general, en las BS hay 7 tipos de modulaciones disponibles: BPSK-1/2, QPSK-1/2, 16QAM-1/2, 16QAM-3/4, 64QAM-2/3, 64QAM-3/4, que será escogido por la BS dependiendo de las condiciones del enlace. BPSK proporciona la modulación más robusta a cambio de reducir el caudal efectivo (*throughput*), sin embargo, su demodulación es sencilla por lo que la sensibilidad del receptor es pequeña por tanto la distancia de cobertura es mayor. Por otra parte, 64QAM es óptima para enlaces de corta distancia y alta velocidad de transmisión.

Estas técnicas adaptativas permiten una alta utilización del ancho de banda disponible y una alta eficiencia espectral.

Fijándonos en la potencia transmitida, las SS's implementan control de ganancia, AGC (*Automatic Gain Control*), el principal objetivo de esta técnica es que se pueda transmitir en

cualquier momento con la potencia que la BS requiera, lo que implica una reducción de la potencia de consumo, tan importante en nuestros escenarios de actuación.

En la BS el control de potencia debería ser hecho por el operador de forma manual, tal y como se ha explicado antes, la BS controla y selecciona muchos de los parámetros de comunicación: modulación, duración de trama, ancho de canal etc...la potencia de la BS solo se puede ajustar de forma manual, la potencia de las SS's se van ajustando automáticamente siguiendo las órdenes que reciben desde la BS. Cuando una SS es encendida está empieza un escáner de potencia incrementando su potencia hasta que es detectada por la BS, cuando la BS nota que hay una SS ha iniciado su escáner de potencia, está le indica a la unidad la óptima potencia de transmisión que se tiene que usar para establecer correctamente la comunicación.

7.1.3.6 CAPA MAC

Probablemente la capa MAC es la capa más importante del estándar, esta es la mayor diferencia entre WiMAX y otras tecnologías competidoras. Esta capa es diseñada extremadamente eficiente para mejorar el canal radio.

Otras tecnologías usan capa MAC *estadísticas con acceso por contienda y transmisión por ráfagas* (como en el caso de WiFi), lo que significaría que todos los usuarios luchan por usar el mismo canal. Si dos o más usuarios transmiten al mismo tiempo se producen colisiones y el caudal efectivo (throughput) se vería drásticamente reducido. En estas condiciones donde cada usuario depende de la forma de uso de los demás es imposible garantizar QoS. Adicionalmente este mecanismo establece tiempos de "no-transmisión", por lo que el medio no está siendo usado de forma eficiente, reduciendo así el caudal efectivo.

Por otro lado, WiMAX usa una MAC *determinista* donde la comunicación se establece usando tramas predefinidas. Estos sistemas *son libres de contienda*, los usuarios no compiten por usar el canal (hay solo una contienda al inicio-entrada, pero una vez dentro no hay mas contienda). Hay un *nodo máster (BS)* que decide quien transmite, por cuanto tiempo y el tipo modulación a utilizar. La asignación de los *frame slots* es descrita por la BS al inicio de cada trama, la SS simplemente sigue las instrucciones de la unidad maestra y transmite solo durante los *time slots* asignados al UL.

La BS ha de conocer en todo momento las necesidades de los SS conectados, para poder controlar los parámetros de QoS y equilibrar las asignaciones de *time slots*. Adicionalmente, la SS's solo pueden transmitir cuando la BS lo decide, no hay ningún tipo de colisión o slots no usadas, por tanto el canal es usado de forma más eficiente que en el caso de MAC estadística (propio de WiFi), incrementando así el caudal efectivo.

7.1.3.7 CAPAS DE CONVERGENCIA

Las capas que especifica el estándar, IEEE 802.16-2004, se muestran en la Figura 76, donde se puede ver que la capa MAC se encuentra sobre la capa PHY. La capa MAC está dividida en 3 subcapas: Convergencia, Parte Común y de Seguridad.

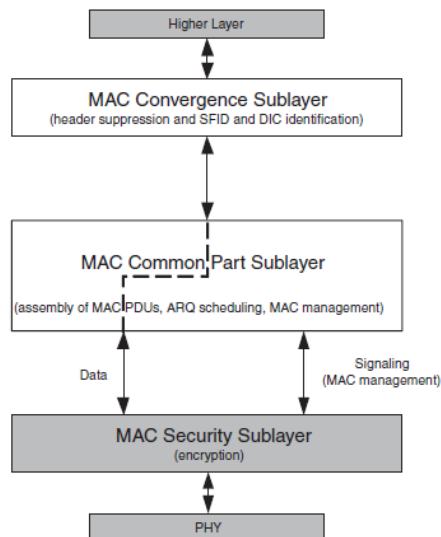


Figura 76. Capa MAC de WIMAX

CSL (Convergence SubLayer) es la responsable de adaptar las unidades de datos de los niveles superiores al formato MAC-SDU en ambos sentidos. Se preocupa del control de QoS, se encarga de *clasificar* las SDU entrantes siguiendo unos criterios establecidos y envía datos de flujos diferenciados a las subcapas inferiores.

La subcapa más importante es la CPS (Common Part Sublayer), la cual tiene las funcionalidades de acceso al sistema, la gestión de ancho de banda, establecimiento de las conexiones y el mantenimiento de las conexiones. Lo que hace es coger los flujos de datos ya clasificados, y busca recursos para la asignación. Se trata del “Organizador (Scheduler)” es el responsable de la asignación de recursos y permite la asignación de un recurso determinístico de acuerdo con la QoS acordada para cada servicio. Esta capa está fuertemente relacionada con la subcapa de seguridad.

La capa MAC tiene una subcapa de seguridad adicional que permite proveer de autenticación, intercambio de claves y encriptación. Cuando se define esta capa se mejora el intercambio de PDU entre la capa MAC y la capa PHY [FundWMX07].

7.1.3.8 ACCESO E INICIALIZACIÓN DE LA RED

El estándar IEEE 802.16-2004 establece los procedimientos aplicables para el ingreso y el registro de un nuevo SS o un nuevo nodo a la red. La SS inicia su proceso de inicialización.

Las fases de inicialización de una SS son:

1. Escáner y Sincronización de la DL
2. Obtener los parámetros de DL
3. Obtener los parámetros de UL
4. Ranging inicial y Ajustes Automáticos
5. Negociación de Capacidades Básicas
6. Autorización de la SS e Intercambio de claves
7. Registro

8. Establecimiento de Conexiones Provisionales

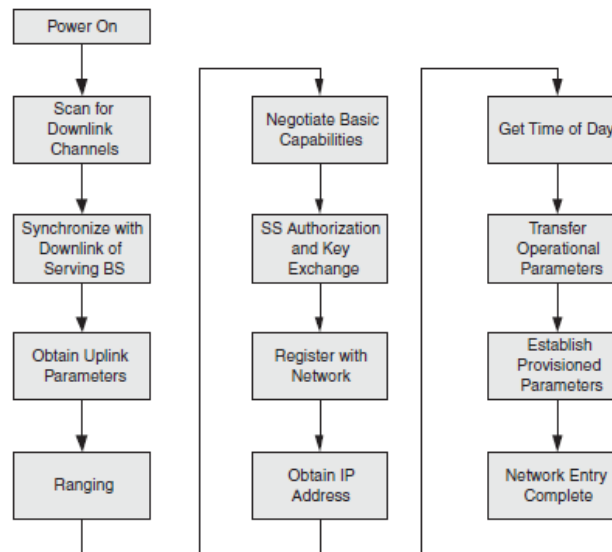


Figura 77. Proceso de Inicialización en una red WiMAX

7.1.3.9 CONTROL DE QoS

QoS se puede definir como una serie de mecanismos que puede garantizar la transmisión de una cierta cantidad de datos en un tiempo máximo específico, o que pueda controlar los recursos asignados entre los nodos de manera que se pueda mejorar la comunicación. La garantía de QoS es una característica deseable para operadores y proveedores ya que esto les permite a ellos garantizar un mínimo de condiciones a sus clientes, entre ellas un mínimo ancho de banda o un retardo máximo extremo a extremo. Esto puede ofrecer prioridades a diferentes usuarios o flujos de datos. Garantizar unos ciertos niveles de calidad es crítico en algunas aplicaciones como VoIP, IPTV o video en tiempo real, especialmente con capacidad limitada de red o con altos número de usuarios.

Cualquier equipo que implemente QoS debería ofrecer como mínimo clasificación y asignación de los recursos. Como se muestra en la Figura 78:

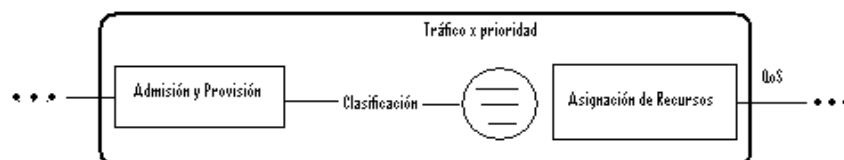


Figura 78. Mecanismo de QoS

En una primera fase los paquetes son clasificados en diferentes flujos de datos usando los criterios disponibles de: DSCP/TOS, VLAN, IP o direcciones MAC, puertos origen y destino. Una vez creados estos flujos y los datos clasificados, el equipo encaminara los paquetes de forma determinista, enviando primero los de mayor prioridad.

En conclusión, esta estructura de diferenciar flujos de datos permite la implementación de mecanismos QoS que puede garantizar algunos parámetros mínimos.

WiMAX es una tecnología que implementa mecanismos de QoS de hasta capa 2, y soporta 5 tipos diferentes de servicios: BE, RTPS, ERTPS, NRTPS, UGS.

1. **UGS-The Unsolicited Grant Service:** está diseñado para soportar flujos en tiempo real, estos flujos suelen ser periódicos y con una dimensión fija. Ej. T1/E1 y VoIP. Este servicio ofrece dimensiones de los flujos, no necesita que la SS solicite específicamente ancho de banda así elimina el *overhead* y el retardo que esta solicitud implica.
2. **rtPS-The real-time Polling Services:** está diseñada para soportar flujos en tiempo real que generan paquetes de datos con dimensión variable, como MPEG¹³ video. En este servicio la BS proporciona un *polling* unidireccional de oportunidades a la SS para que solicite ancho de banda, estas suelen ser suficientes para garantizar una latencia permitida en servicios de tiempo real. Estos servicios requieren un *overhead* mayor que el anterior.
3. **nrtPS-The non-real-time Polling Services:** es muy similar al anterior pero la SS puede también usar *polling* basado en contienda en la solicitud de ancho de banda del UL. Adecuado para FTP-File Transport Protocol que requiere garantizar paquetes de dimensión variable a una velocidad mínima. El parámetro más importante a considerar en este tipo de flujo de servicio es reservar un mínimo de velocidad de tráfico solo para estos FS's.
4. **BE- The Best-effort Service:** provee poco soporte de QoS aplicable únicamente a servicios que no tiene necesidades estrictas de QoS. Los datos son enviados en cualquier momento que los recursos estén disponibles y no requeridos por ningún otro servicio (UGS,rtPS...). Las SS solo usan la oportunidad de *polling* basado en contienda para solicitar ancho de banda.
5. **ertPS- The extend real-time Polling Service:** es un nuevo servicio introducido por el estándar IEEE802.16e, ideado sobre la eficiencia de UGS y rtPS. En este caso, las asignaciones periódicas UL hacia las SS pueden ser usadas tanto para transmisión como para peticiones adicionales de BW, esto permite a ertPS acondicionar servicios de datos cuyos requerimientos de BW cambien en el tiempo. Es importante notar que en el caso de UGS, en ertPS la SS puede solicitar BW adicional durante la asignación de UL.

¹³ MPEG: Motion Pictures Experts Group

Service Flow Designation	Defining QoS Parameters	Application Examples
Unsolicited grant services (UGS)	Maximum sustained rate Maximum latency tolerance Jitter tolerance	Voice over IP (VoIP) without silence suppression
Real-time Polling service (rtPS)	Minimum reserved rate Maximum sustained rate Maximum latency tolerance Traffic priority	Streaming audio and video, MPEG (Motion Picture Experts Group) encoded
Non-real-time Polling service (nrtPS)	Minimum reserved rate Maximum sustained rate Traffic priority	File Transfer Protocol (FTP)
Best-effort service (BE)	Maximum sustained rate Traffic priority	Web browsing, data transfer
Extended real-time Polling service (ErtPS)	Minimum reserved rate Maximum sustained rate Maximum latency tolerance Jitter tolerance Traffic priority	VoIP with silence suppression

Tabla 17. Flujos de Servicio soportado por WiMAX [FundWMX]

7.1.3.10 INTEROPERABILIDAD

En tecnología 802.16 la referencia en cuanto a interoperabilidad es el *WiMAX Forum [WMXForum09]*, una organización formada por operadores, fabricantes de equipos y componentes. Esta organización es fruto de la industria, que fue creada para certificar y promover la compatibilidad e interoperabilidad de productos de banda ancha inalámbricos basados en el estándar IEEE802.16/ETSI HiperMANS. Uno de los objetivos del WiMAX Forum es acelerar la existencia de estos equipos en el mercado. Los productos con *WiMAX Forum Certified™* son totalmente interoperables que soportan servicios de ancho de banda fijo, portable y móvil.

Muchos fabricantes diseñan y distribuyen soluciones propietarias para ofrecer soluciones inalámbricas de banda ancha y largo alcance en bandas licenciadas y no-licenciadas. Pero todos estos para que garanticen que son interoperables con otros fabricantes han de tener el *WiMAX Forum Certified™*, caso de RedLine, Albentia, Aperto, Alvarion, Trango... entre otros fabricantes certificados.

Probablemente la ventaja que ofrece este estándar, IEEE802.16, es que en su definición se concibe la *interoperabilidad* como prioridad, esto supone que las BS sea capaz de registrar, comunicar e intercambiar información con SS's de cualquier otro fabricante siempre y cuando ambos fabricantes estén certificados, esto garantiza la interoperabilidad entre ellos.

7.1.4 ASPECTO FÍSICO DE UNA ESTACIÓN BASE

7.1.4.1 UNIDAD INDOOR ESTACIÓN BASE (IDU)

Una estación base es propietaria, es decir el fabricante es el que decide el aspecto que tendrá la BS. Como ejemplo orientativo tomaremos el caso de RedLine (AN-100U).

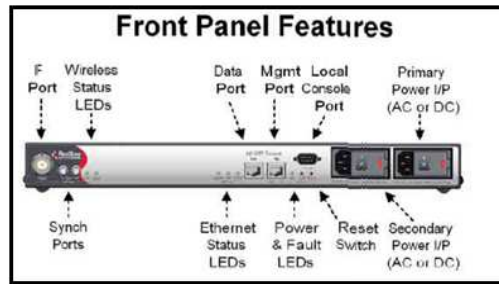


Figura 79. Unidad Indoor-IDU

7.1.4.1.1 Sección Wireless

En esta parte describe el puerto wireless:



Figura 80. Puerto Wireless

Puerto IF (Radio Control): un conector tipo N que da conexión vía cable coaxial. Este cable brinda las siguientes funcionalidades:

- Oscilador de señales local para la sincronización entre terminal y radio.
- Señales telemétricas para el control y monitoreo del modem.
- Datos modulados IF de /a la radio (interface inalámbrico)
- La potencia DC para el transceptor (AN 100 son VDC).

Sincronización del tiempo puerto: El interfaz de sincronización tiene dos conectores hembra SMA localizados generalmente en la parte frontal del panel. Su importancia radica en que la información ha de estar sincronizada para minimizar la interferencia entre sectores.

Leds indicadores: Las BS están compuestas por indicadores tipo led, uno de ellos respecto al enlace inalámbrico (*link led*) el cual se enciende cada 8 tramas. Esto indica que la comunicación con la Unidad externa (ODU) es apropiada y que el entramado es correcto. Si este led no está encendido es imposible establecer la comunicación inalámbrica.

El led de señal (*signal led*), se enciende cada vez que recibe que recibe un mensaje de una estación suscriptor. Los mensajes incluye: peticiones de ancho de banda y tráfico de datos de usuario.

7.1.4.1.2 Sección ETHERNET



Figura 81. Puerto Ethernet

Los puertos de datos están siempre activos, pueden ser programados para operar en modo *full* o *half dúplex* a 10 Mbps o 100Mbps.

Data Link/Act: luz verde cuando la LAN está funcionando adecuadamente.

Data Port 100: luz verde cuando el terminal está operando a 100 Mbps y apagado cuando trabaja a 10 Mbps.

Data FD/Col: luz verde cuando el puerto está operando en modo full dúplex, intermitente cuando una colisión es detectada. En enlaces *half dúplex* siempre hay colisiones.

Mgt Port: es usado para la gestión fuera de banda y diagnóstico, puede ser habilitado o deshabilitado, además, puede trabajar en modo *full* o *half dúplex* a 10 o 100 Mbps. Este puerto tiene indicadores led que se encienden cuando el enlace está establecido.

7.1.4.2 UNIDAD OUTDOOR RADIO (ODU)

El radio modem está alojado en una estructura resistente al agua e inclemencias del tiempo, normalmente está hecha en aluminio, algunas características son las siguientes:



Figura 82. Unidad Outdoor-ODU

HB Radio: estos radios trabajan con 24 VDC.

Puerto IF: este modem tiene un puerto tipo N-hembra para conectar al terminal mediante un cable coaxial. A través de este puerto y cable, el modem puede:

- Enviar/Recibir datos IF modulados desde/hacia el terminal.
- Transmitir información de estado hacia el terminal.
- Recibir información de control del terminal.
- Recibir potencia DC desde el terminal.

Puerto RF: el puerto RF es un puerto tipo N hembra es usado para enviar/recibir la información RF desde la antena.

7.1.4.2.1 ANTENA:

La antena va conectada al puerto RF (conector hembra tipo N) es para enviar/recibir la señal de/hacia el módem.

7.1.5 MONITOREO DE ESTACIÓN BASE (BS) RED LINE AN 100U

7.1.5.1 INTERFAZ WEB

La conexión para el monitoreo de la BS se hace a través de la dirección IP del equipo, <http://192.168.102.3>, después de la autenticación accedemos al interface web de la BS.

Dentro del interfaz web tenemos:

Function	Screen Title	Guest Access	Admin Access	Debug Access	Description
Monitoring	General Info	X	X	X	View general system information, Ethernet settings, and wireless settings.
	Status	X	X	X	View statistics for the wireless interface, Ethernet data port, and management port.
	SS Info	X	X	X	View system information, Ethernet settings, and wireless statistics for active subscribers.
	Event Log	X	X	X	View system activity and error messages.
	Auto Refresh		X	X	Select the rate to automatically refresh the web screen.
Service Flow Configuration	Subscribers		X	X	Summary of registered subscribers.
	Service Classes		X	X	Define the set of service classes.
	Service Flows		X	X	Define service flows based on the service classes.
	Classifiers		X	X	Define classifiers for each service flow.
	Manage		X	X	Activate service flows.
Interfaces	Wireless Interface		X	X	View and modify RF, PHY, and MAC settings for the wireless interface.
	Ethernet Interface		X	X	View and modify the Ethernet network interface settings.
	Management Interface		X	X	View and modify the IP and DHCP network interface settings.
Admin Tools	Advanced Config			X	View and modify advanced wireless interface settings.
	Software Upgrade		X	X	Upload new system software and select the software version to load at startup.
	Backup and Restore		X	X	Backup and restore configuration settings using remote FTP server.
Accounts Management			X	X	Add users & change password.
Reboot			X	X	Reboot the base station terminal.

Tabla 18. Contenido en el Interfaz Web de BS

Siguiendo con nuestro ejemplo, la *Información General* muestra el estado general del sistema del puerto de gestiones además del estado de los LEDs del panel frontal del equipo (7.1.4 ASPECTO FÍSICO DE UNA ESTACIÓN BASE):

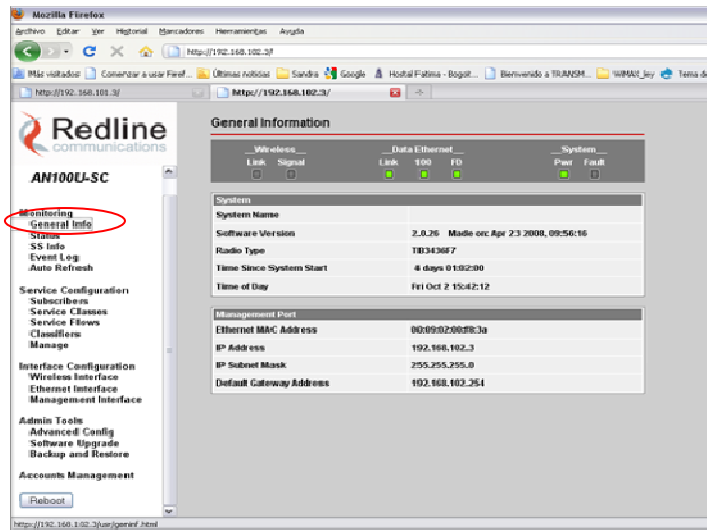


Figura 83. Panel de Información General-BS AN100U

La Figura 84 muestra que el estado de la comunicación wireless, *Wireless Status*:

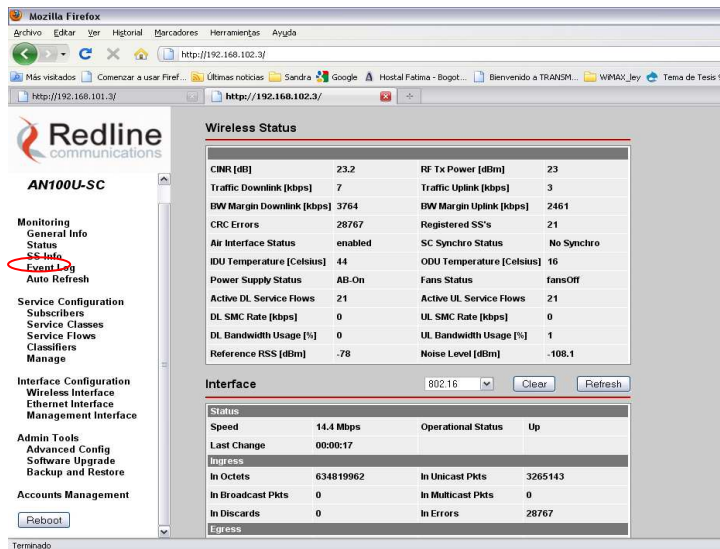


Figura 84. Panel de Wireless Status-BS AN100U (I)

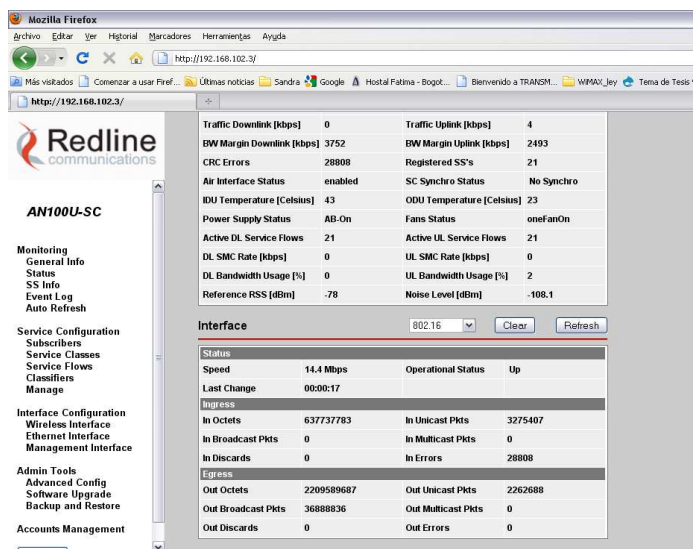


Figura 85 Panel de Wireless Status-BS AN100U (II)

Como se puede observar en la parte inalámbrica tenemos un dato llamado CINR [dB], referido a la *relación entre portadora principal y la interferencia más el ruido*, de 23.4dB. Esta medida por la BS basada en la señal recibida del suscriptor, según este valor la BS le puede solicitar al suscriptor que cambie su modulación.

En el apartado de **Interface** (Figura 85) tenemos información estadística de: enlace inalámbrico (802.16), los datos (802.3 Data) y los de gestión (802.3 Mgmt). En el **interfaz inalámbrico** tenemos una **velocidad de 14,4 Mbps**. La parte *Ingress* muestra lo recibido por la BS y la *Egress* lo transmitido por la BS.

La red ejemplo que se presenta tiene 21 suscriptores activos e identificados con servicio de VoIP (Figura 74). El estado de los suscriptores que presenta los 21 suscriptores en el interface web es el siguiente:

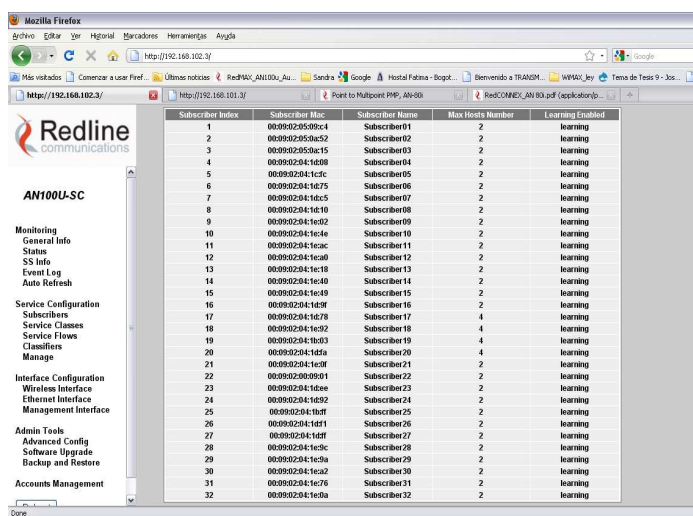


Figura 86. Estado de las SS's

La información que en la BS principal de la red ubicada en Santana de Tusi, Cerro de Pasco, acerca de sus SS's se muestra en la Figura 87:

Name	IP	Mgm	DL Mod	UL Mod	Min CINR	Max CINR	Curr CINR	UL CRC	DL CRC	RSSI	Tx Pow	Dist
Subscriber17	192.168.102.116	yes	64QAM3/4	BPSK1/2	3	7.8	3	69	0	-62	4.8	0.1
Subscriber19	192.168.102.124	yes	64QAM3/4	64QAM3/4	18.7	23.6	21.3	26	0	-90	-10	0.4
Subscriber21	192.168.102.126	yes	64QAM3/4	64QAM2/3	18.3	25.8	23.2	61	0	-77	-7	0.3
Subscriber27	192.168.102.132	yes	64QAM3/4	16QAM3/4	3	26.2	18.3	89	0	-83	-2	0.3
Subscriber29	192.168.102.134	yes	64QAM3/4	16QAM3/4	14.6	23.6	21.3	28	0	-80	-3.5	0.2
Subscriber04	192.168.102.114	yes	64QAM3/4	64QAM3/4	19	26.2	24.3	89	0	-76	2.5	0.2
Subscriber12	192.168.102.117	yes	64QAM3/4	64QAM3/4	16.1	26.2	23.2	28	0	-77	5	0.2
Subscriber20	192.168.102.123	yes	64QAM3/4	QPSK3/4	3	28.8	14.2	796	0	-81	12	0.3
Subscriber13	192.168.102.121	yes	64QAM3/4	64QAM3/4	19	25.8	24.3	48	0	-77	-6.5	0.4
Subscriber09	192.168.102.115	yes	64QAM3/4	64QAM3/4	16.1	25.5	21.3	48	0	-80	0.6	0.3
Subscriber11	192.168.102.120	yes	64QAM3/4	64QAM3/4	19.5	25.8	24.3	89	0	-77	-4	0.2
Subscriber05	192.168.102.130	yes	64QAM2/3	16QAM3/4	3	24.7	19.8	843	0	-63	20	0.3
Subscriber07	192.168.102.111	yes	64QAM2/3	QPSK1/2	3	28.8	12	1251	0	-85	17.5	0.6
Subscriber15	192.168.102.118	yes	64QAM3/4	64QAM2/3	3	28.8	23.2	73	0	-77	4.8	0.4
Subscriber25	192.168.102.128	yes	64QAM3/4	64QAM3/4	17.2	27	24	63	0	-77	6.5	0.4
Subscriber26	192.168.102.131	yes	64QAM2/3	16QAM1/2	7.8	21.3	17.2	92	0	-82	20	0.8
Subscriber31	192.168.102.136	yes	64QAM3/4	16QAM3/4	11.2	24.3	20.2	43	1	-81	2.5	0.2
Subscriber28	192.168.102.133	yes	64QAM3/4	16QAM3/4	14.6	22.1	21	50	0	-80	1.5	0.2
Subscriber30	192.168.102.135	yes	64QAM3/4	16QAM3/4	3	28.8	21	823	0	-81	18	0.2
Subscriber14	192.168.102.129	yes	64QAM3/4	16QAM3/4	3	22.8	19.5	24	0	-82	5	0.3
Subscriber19	192.168.102.122	yes	16QAM1/2	QPSK3/4	3	17.6	13.5	2109	0	-88	20	0.5

Figura 87. Estado de SS's

Actualmente la red de ejemplo, tiene 21 usuarios activos, la Figura 87 muestra de cada suscriptor: dirección IP, estado, tipo modulación en ambos sentidos (DL y UL), mínimo y máximo CINR, un promedio de ambos, una estadística de errores para los enlaces UL y DL el indicador RSSI (Recived Signal Strenght Indicator) valor medido en base a la señal recibida de cada suscriptor, la potencia transmitida de cada suscriptor y las distancia calculada por la BS de cada suscriptor. Además, existe un botón de *refresh* para actualizar los datos de la red.

Es importante apuntar que la potencia de los equipos suscriptores (SU-O) tiene un rango de -20dBm hasta +20dBm y una antena interna de 14dBi, en los enlaces cortos, en algunos casos la columna de *TxPot* muestra valores negativos, valores que se pueden compensar con la ganancia de la antena por lo que no es necesario aumentar la potencia transmitida. Esta es una aclaración a los valores que aparecen en panel, perfectamente normales en este equipo.

En cuanto a la creación y configuración de flujos de servicio (**Service Flows-SF**), existen 4 pasos asociados a la creación de flujos de servicio.

Clase de Servicio (Service Class - SC): cada clase de servicio define un conjunto de parámetros de QoS que pueden ser asociados con flujos de servicio. Múltiples definiciones de clase de servicio pueden ser agregadas para crear una biblioteca de clases de servicio.

Flujo de Servicio (Service Flow - SF): todos los flujos de servicio están basados en la definición de clases de servicio ya existentes. Son necesarios distintos flujos de servicio para el tráfico de DL y UL. Cada definición necesita que se identifique al suscriptor (por su dir.MAC), dirección de flujo, clase de servicio, y tipo de clasificador.

Clasificador (Classiffier): un único conjunto de clasificadores puede ser definido para cada SF, dependiendo el tipo de clasificación seleccionado cuando el flujo de servicio es creado. Todos los clasificadores son borrados cuando el flujo de servicio es borrado.

Activación: un nuevo flujo de servicio no es activo hasta que un clasificador es asignado. Si el suscriptor deseado esta registrado en Dynamic Addition Session (DSA) sesión es iniciada. Durante la sesión DSA, el flujo de servicio se encuentra en petición, si la DSA es exitosa en estado cambia a *activo*, caso contrario es *rechazado*. Si el suscriptor deseado no está registrado, la petición de flujo de servicio se guarda hasta que el suscriptor sea registrado. Así, el registro del suscriptor implica la activación de todos los flujos de servicio asociados a este.

La gestión adecuada, de creación, manejo, entendimiento y uso de los SF es crucial para el funcionamiento optimo de la red, de esto depende la QoS que ofrecen los equipos WiMAX.

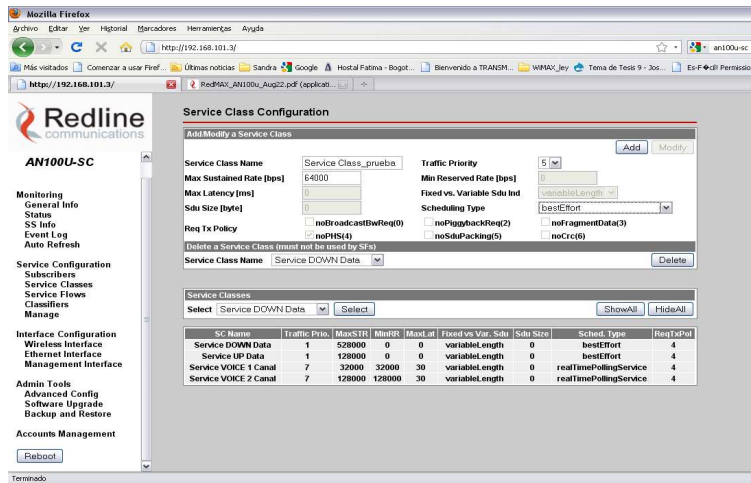


Figura 88. SF Gestión

En esta red se tienen creados 4 clases de servicio (ServiceClass), dos de ellos para datos uno de UL y otro de DL con calidad *BE-Best-effort* y prioridad de tráfico 1, configuración típica de servicios para el uso de internet, además de otros dos canales destinados a la voz, con la mejor calidad, *rtPS-RealTimePollingService* y prioridad 7.

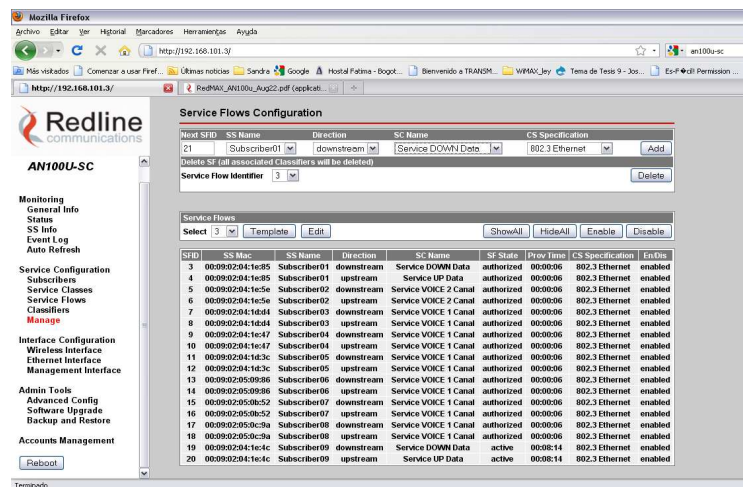


Figura 89. Asignación de SF a SS

Para la configuración de flujos se asigna a cada suscriptor un *SC-ServiceClass*, Figura 89, el sentido (UL o DL) en el que se asigna y su especificación. En nuestro ejemplo tenemos asignados servicio de datos en dos suscriptores y servicio de voz en el resto de ellos. Los flujos de servicio se pueden habilitar, deshabilitar y borrar cuando sea necesario.

7.1.5.2 INTERFAZ INALÁMBRICO

Una de las partes más interesantes de la configuración de una estación base es la parte de *interfaz inalámbrico*.

En la parte de *Wireless Interface* del menú, se pueden modificar los parámetros de la BS de MAC, PHY y RF.

Para caso, red de Santa Ana de Tusi se trabaja en una banda de frecuencias licenciada 3.5775 GHz y una potencia transmitida de 23dBm. En la capa PHY se trabaja con canales de 3,5 MHz y un intervalo de guarda de $\frac{1}{4}$. Por último, entre los parámetros MAC tenemos una duración de la trama de 10ms, un rango de celdas de 3 Km sin modo de sincronización puesto que se trata de una red PtMP, suficiente para el escenario que se presenta.

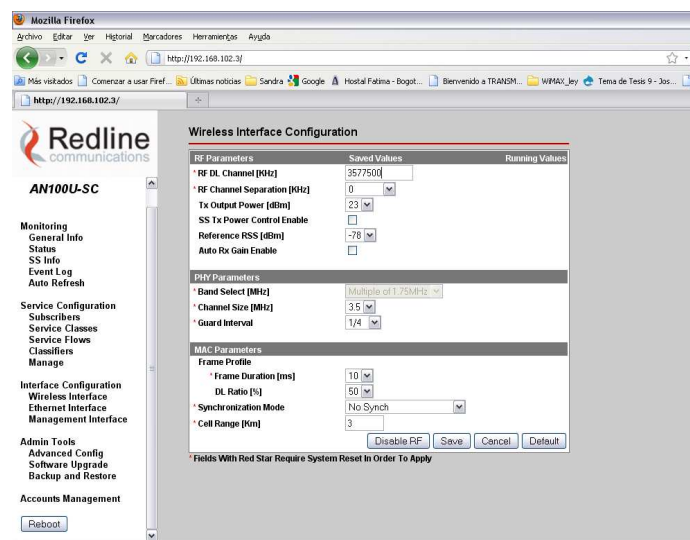


Figura 90. Configuración Interfaz Wireless (I)

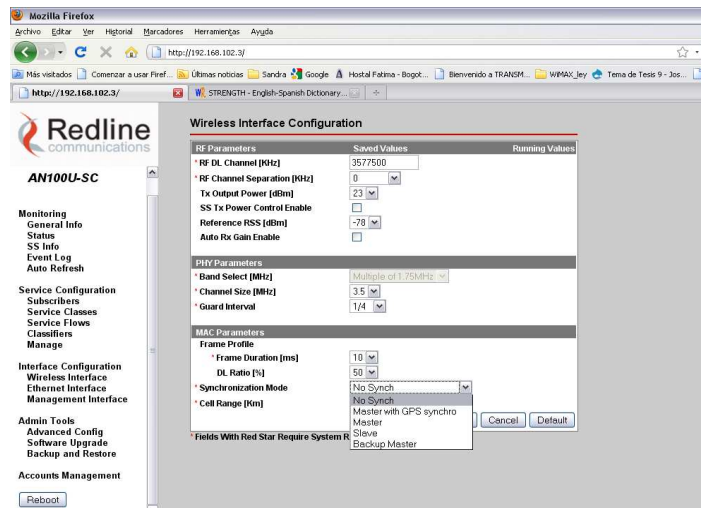


Figura 91. Configuración Interfaz Wireless (II)

Resulta importante indicar todos y cada uno de los parámetros a configurar, pues de ello dependerá que la red funcione según lo requerido:

RF DL Channel KHz: se asigna el canal de frecuencia que todos los suscriptores usarán en el sector. Esta selección de frecuencia ha de cumplir con las condiciones regulatorias del espectro en el país (4.3.5.2 Distribución de frecuencias en Perú) [REGWMX].

Tx Output Power dBm: seleccionar el nivel de potencia (dBm) de radio. La potencia máxima de la BS de RedMAX, AN100U, es 23 dBm.

SS Tx Power Control Enable: esta opción permite a la BS el ajuste automático del nivel de potencia transmitida de los suscriptores. Cuando se habilita la BS continuamente monitorea a los suscriptores y ajusta la potencia transmitida para mantener el valor de RSSI (Received Signal Strength Individual) requerido.

Reference RSS: se trata del valor objetivo en promedio de Received Signal Strength (RSS) esperado de las señales RF de los suscriptores, recibida por la BS. Permite el ajuste automático de la potencia transmitida por las SS, para el óptimo funcionamiento de sistema con la mínima interferencia. Los valores por defecto de este parámetro son -75dBm para 3.5MHz y -72dBm para 7MHz.

Estos valores cambian de acuerdo al despliegue del sector, nuestro caso nos lleva a un valor de -78dBm con 3,5MHz. El valor RSSI (dBm) de cada SS puede ser monitoreada usando la *Base Station SS Info* del interfaz web. Los ajustes de potencia están basados en una serie de factores, y diferencias de hasta 7dB.

Auto RX Gain Enable: este parámetro implica habilitar el ajuste automático del receptor de sensibilidad.

7.1.5.2.1 Parámetros físicos:

Band Select MHz: se selecciona el tipo de canalización de acuerdo a los perfiles de un sistema 802.16 OFDM PHY.

Channel Size MHz: selecciona el tamaño de canal. En el menú la selección siempre esta basada en el tipo de radio instalado, el caso que tratamos se refiere a un radio capaz de trabajar a 3,5 MHz o 7 MHz de ancho de canal.

Guard Interval: selecciona el prefijo cíclico.

7.1.5.2.2 Parámetros de MAC:

En esta parte lo que se configura es el **perfil de trama** (importante en la transmisión).

Frame Duration ms: selecciona la duración de la trama inalámbrica en ms. Esta selección esta basada en el ancho de canal utilizado, este parametro afecta al retardo (*latency*) del sistema.

DL Ratio %: se asigna el % que va a usar DL del tamaño de la trama, en el ejemplo se apunta un 50% lo que indica una utilización simetrica de la trama (50% para DL y 50% para UL). Este parámetro da forma a los perfiles de tráfico de DL y UL.

La relación *DLRatio* es dinámica y puede cambiar en cualquier momento sin tener que reiniciar parámetros y demás. El valor de selección de este parámetro en la configuración de la interfaz inalámbrica.

Los límites de la BS de RedLine (basada en duración de trama, ancho de canal e intervalo de guarda) se presentan en Tabla 19:

Channel Size (MHz)	Frame Duration (ms)	Guard Interval	Lowest DL Ratio (%)	Highest DL Ratio (%)
3.5	5	1/16	50	75
		1/4	58	75
	10	1/16	25	80
		1/4	26	80
7	5	1/16	20	80
		1/4	25	80
	10	1/16	30	85
		1/4	25	85

Tabla 19. Límites de distribución de trama

La topología de nuestro ejemplo, Figura 74. Red GAMACOM de Cerro de Pasco - Perú, usa PtMP por lo que a nivel de MAC una red PtMP responde a la siguiente forma Figura 92:

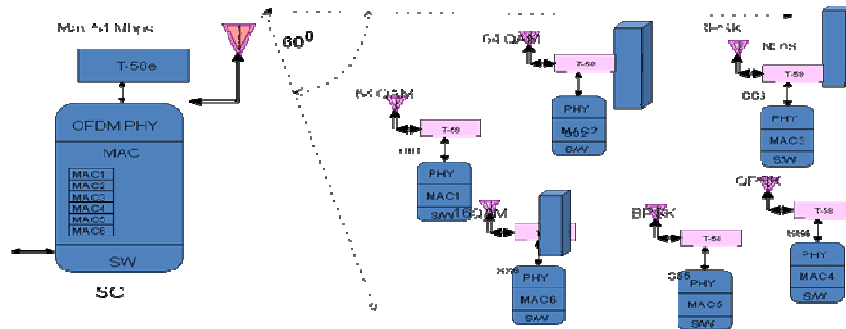


Figura 92. PtMP a nivel de MAC

Las BS de RedMAX, AN100U-SC pueden cubrir hasta 512 usuarios¹⁴, CPE, este parámetro es una referencia básica de los equipos a la hora del planteamiento de una red PtMP. Condiciones que en un escenario rural como el de Santa Ana de Tusi-Pasco, se cumple con facilidad.

7.1.5.2.3 Modos de Sincronización de una BS

Las opciones de sincronización a nivel MAC existentes en una BS, como la del ejemplo, son:

No Synch: Opción deshabilitada.

Master: La BS en este modo da un pulso de sincronización máster para cada esclavo conectado a la BS (sin GPS fuente de reloj).

Master with GPS Synchro: La BS está conectada a un reloj GPS y da un pulso de sincronización máster a cada esclavo conectado a la BS.

Backup Master: si una BS opera como esclavo (de otra), si la estación master falla, y esta opción está habilitada, entonces esta BS pasará a operar en modo master. Opción que puede operar o no con reloj GPS.

Slave: la BS en este modo sincroniza sus operaciones con el pulso de sincronización de su estación máster o backhaul máster.

Cell Range: representa la distancia a la que el mayor suscriptor está localizado.

Por último, incluimos la Tabla 20 que muestra las velocidades de los equipos Red Line, estos valores son teóricamente calculados con parámetros dados por el fabricante.

La BS de la red de Santa Ana de Tusi se ha configurado para trabajar con un ancho de canal de 3,5MHz, el *tiempo de bit* (T_b) utilizado por estos equipos para este ancho de canal es

¹⁴ Teóricamente y según fabricante

64μs, un tiempo de guarda configurado de $T_g=tb/4$, lo que supone un tiempo de símbolo (T_s) de 80μs, lo que nos permite los siguientes valores velocidades:

Perfil de Tx	BW=3,5MHz	Nused	Bm	cr	Tb(us)	Tg =tb/4	Ts	BR Mbps	Ts [Tg =tb/8]	BR Mbps	Ts [Tg =tb/16]	BR Mbps	Ts [Tg =tb/32]	BR Mbps
0	BPSK ½	192	1	0,50	64	16	80	1,20	72	1,33	68	1,41	66	1,45
1	QPSK ½	192	2	0,50	64	16	80	2,40	72	2,67	68	2,82	66	2,91
2	QPSK ¾	192	2	0,75	64	16	80	3,60	72	4,00	68	4,24	66	4,36
3	16QAM1/2	192	4	0,50	64	16	80	4,80	72	5,33	68	5,65	66	5,82
4	16QAM3/4	192	4	0,75	64	16	80	7,20	72	8,00	68	8,47	66	8,73
5	64QAM2/3	192	6	0,67	64	16	80	9,60	72	10,67	68	11,29	66	11,64
6	64QAM3/4	192	6	0,75	64	16	80	10,80	72	12,00	68	12,71	66	13,09

Tabla 20. Velocidades en BS RedMAX

Como se puede observar el caudal máximo de esta configuración es de **10,80Mbps** con modulación **64QAM3/4**, para suscriptores dentro de un radio de cobertura menor a **5km**, condiciones que cumple la red de ejemplo donde los servicios ofrecidos son principalmente **VoIP** y eventualmente internet.

7.1.5.3 INTERFAZ ETHERNET

Así mismo, en esta parte se puede configurar la *Interface de Ethernet* y el *Interface de Management*, el primero de forma general se sugiere mantener sus valores por defecto.

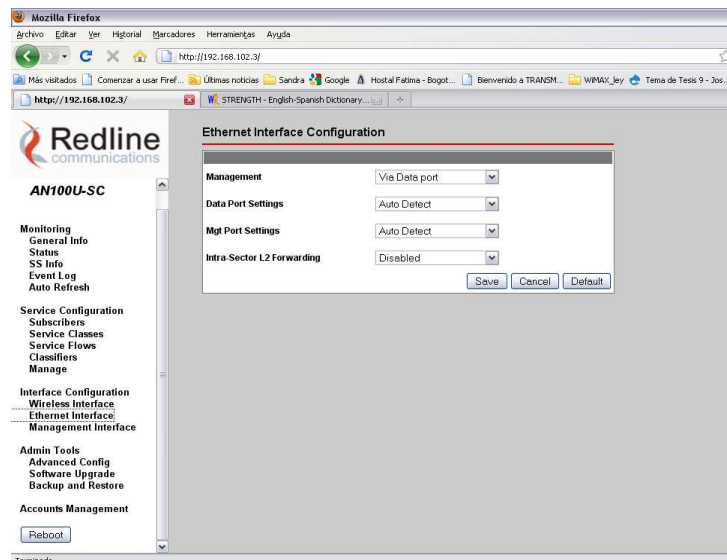


Figura 93. Interfaz Ethernet

El interface de gestión, la dirección IP y los parámetros de DHCP se pueden ver y editar en el menú.

7.1.5.3.1 PARÁMETROS IP

Se tiene dos opciones, la BS puede coger la dirección IP de un servidor DHCP o ingresar los parámetros IP solicitados (dirección IP, submáscara, puerta de enlace por defecto, servidor SNTP...), nuestro ejemplo sigue este último caso.

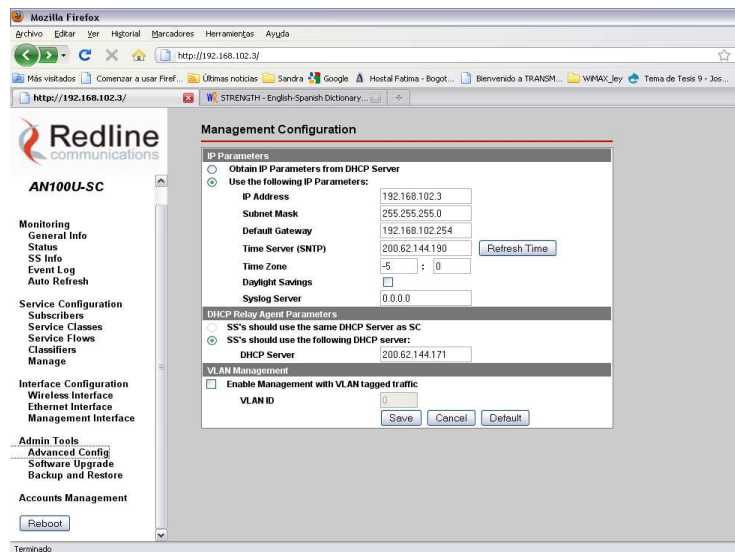


Figura 94. Parámetros IP

Los parámetros de *VLAN Management* están usados para configurar la gestión para la operación en sistemas donde una sola VLAN es usada para el control de los equipos inalámbricos de la BS y los equipos del usuario. Después de habilitar esta opción solo el tráfico identificado con VID (*Virtual Identifier-Identificador Virtual*) es reconocido por los comandos de gestión.

Por último, *Advanced Config*, Figura 95, se refiere a la configuración, edición y visualización de los parámetros de la MAC para la modulación, thresholds y parámetros de *backoff*. Esta pantalla tiene usuario y password de administrador, distinto a los accesos del interfaz web.

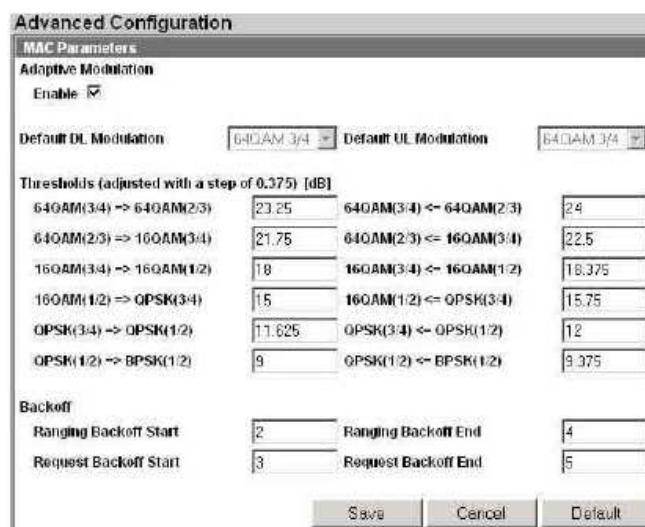


Figura 95. Configuración Avanzada

Si la modulación adaptativa está activada esto inutiliza las opciones de modulación por defecto para DL y UL. Estas opciones permiten que la BS transmita solo usando la modulación/codificación que se especifica en este atributo.

Una sección interesante de configurar la MAC es la de los *thresholds*, aquí se asignan los valores umbrales para cada modulación basada en la medida de CINR). Estos valores son usados solo cuando se habilita la opción de modulación adaptativa. La columna de la derecha se refiere a *Minimum Entry Threshold* (mínimo umbral) y el de la izquierda Mandatory Exit Threshold (de salida valor en que la modulación cambia).

La Tabla 21 se refieren a las relaciones umbrales *portadora/interferencia más ruido*, CINR, que la BS detecta de los suscriptores, la columna de la derecha se refiere al valor mínimo para mantenerse en la modulación especificada y la parte izquierda se refiere al valor donde se produce el cambio de modulación.

64 QAM 3/4 => 64 QAM 2/3	23.25 dB	64 QAM 3/4 <= 64 QAM 2/3	24 dB
64 QAM 2/3 => 16 QAM 3/4	21.75 dB	64 QAM 2/3 <= 16 QAM 3/4	22.5 dB
16 QAM 3/4 => 16 QAM 1/2	18 dB	16 QAM 3/4 <= 16 QAM 1/2	18.375 dB
16QAM 1/2 => QPSK 3/4	15 dB	16 QAM 1/2 <= QPSK 3/4	15.75 dB
QPSK 3/4 => QPSK 1/2	11.625 dB	QPSK 3/4 <= QPSK 1/2	12 dB
QPSK 1/2 => BPSK 1/2	9 dB	QPSK 1/2 <= BPSK 1/2	9.375 dB

Tabla 21 . *Umbrales de Cambio de Modulación*

Backoff: especifica los periodos de contención. Los parámetros de *backoff* son usados cuando un suscriptor experimenta colisión durante el establecimiento del enlace o mientras compiten por ancho de banda adicional. El valor asignado representa el exponente en binario del número de oportunidades a esperar la respuesta al registro en la BS o en la petición de ancho de banda.

Es recomendable no cambiar los valores de *backoff*. El cambio de estos parámetros puede afectar de forma severa en el establecimiento del enlace inalámbrico.

7.1.6 SUSCRIPTORES

Para entrar a los SS se necesita TELNET. El monitoreo de una SS se hace por este interfaz también.

Los SS utilizados también son del mismo fabricante, éste ofrece un interface web del mismo paquete de *RedMAX* para la configuración de los SS e incluso un gestor gráfico de la red, pero actualmente en la red no se implementa por lo que se utiliza Telnet para configurar las estaciones clientes.

Aquí se configuran los interfaces que tendrá el usuario, ya que la inteligencia de la red está en la BS será aquí donde se configuren los tipos de servicios, las prioridades etc...

Capítulo 8

CONCLUSIONES de trabajo realizado

8 CONCLUSIONES

- 1) Estos números pueden parecer muy grandes pero la diferencia tecnológica que representan las dos implementaciones es elevada. La superioridad de 802.16 frente a 802.11a (utilizado actualmente) queda patente en ***largas distancias-LD (>40km)*** de la red ofreciendo ***más de 20Mbps*** con QoS, gracias a que en 802.16 se utiliza de forma más eficiente el canal y posee una MAC más robusta.
- 2) Con 802.11a es muy difícil en estas condiciones de LD mantener una transmisión de datos en tiempo real aceptable. Con 802.16 esto y más aplicaciones de *real-time* podrían ser implementadas además con QoS, si bien es cierto, esta topología no aprovecha esta ventaja, ya que los servicios en las comunidades son básicos, es evidente que con una implementación como la anterior se podrían ofrecer aplicaciones de teleeducación, telemedicina, videovigilancia...etc, en condiciones más que aceptables.
- 3) Posibilidad de ampliación de red, por la existencia de equipos de varios interfaces como los utilizados en Don Juan o Laykatuyok dejan clara la posibilidad de extensión de la red.
- 4) El número máximo de clientes comparando las dos tecnologías es ampliamente superior en WiMAX.
- 5) La mayor desventaja de WiMAX sigue siendo su inversión económica inicial, sin embargo su capacidad de extensión es amplia y sus costes de mantenimiento, monitoreo y gestión, se pueden ver significativamente reducidos en el tiempo, comparando con WiFi, por la implementación de robustas aplicaciones o interfaces para el usuario, intuitivas y fáciles de gestionar.
- 6) Los presupuestos encontrados, precios y equipos han sido tarea complicada, por la reticencia de fabricantes, es comprensible que sean los precios lo más protegido de los equipos.
Lo mostrado en cuanto a precios es un valor aproximado que demuestra la tendencia que han venido teniendo los precios de WiMAX durante los últimos 4 años.
- 7) Desde mi punto de vista y tal como está el mercado actual de esta tecnología, se puede adelantar que trata de una tecnología de futuro y prometedora para enlaces LD, aunque no hay que olvidar que su gran competidor WiFi y nuevas versiones como 802.11n ofrece técnicamente ventajas parecidas a WiMAX.

Sin embargo, lo robusto que resulta ser el control de acceso al medio de 802.16 lo hace superior.

- 8) Cada vez más el mercado Rural resulta más atractivo para operadores y fabricantes, WiMAX se trata de una tecnología de “*last mile*” es decir para despliegues PtMP y para exteriores, los enlaces PtP de LD son tratados como caso particular de estos e idealmente instalados en estos escenarios. Los ejemplos claros han sido países de Sudamérica como Perú, Ecuador, Brasil...y algunos de África como Burquina Faso, donde ha habido fabricantes que han instalado redes con excelentes resultados.
- 9) El presupuesto sería mucho mayor si la infraestructura de torres y soportes mecánicos no fuera reutilizada de la red anterior.
- 10) Nuevas aplicaciones apoyadas en esta tecnología contribuyen al desarrollo de la localidad, tanto en educación, medicina, seguridad...etc.

Una vez hecho el diseño, el estudio económico de lo que supondría la implementación de la red en WiMAX y de las conclusiones del trabajo hecho, se hace necesario añadir una última reflexión acerca de la viabilidad tanto económica como técnica de la migración tecnológica propiamente dicha o de lo que implicaría en un diseño de red escoger una u otra tecnología.

Contestar la pregunta WiFi o WiMAX, es complicada. Es importante que esta discusión no sea estrictamente técnica, que no se fije además solo si una tecnología es mejor que otra, sino también en si una es más apropiada que otra. El concepto de “apropiado” para entornos rurales, incluso a nivel local, está enfocado a que esta sea de bajo coste, sin embargo, me gustaría matizar este concepto. Que una tecnología se económicamente viable depende de la capacidad de inversión que se tenga, y no sólo de que sea barata.

Son de sobra conocidas las ventajas técnicas que tiene WiMAX frente a WiFi, con esta tecnología se ampliaría las prestaciones de la red, no solo de cobertura se habla sino de servicios y de desarrollo local; si miramos 4 años atrás implementaciones en WiMAX en zonas rurales de países emergentes era prohibitivo económicamente, se hablaba de inversiones 4 veces por encima de una WiFi (por ej.).

Actualmente y gracias a que el mercado tecnológico obedece a una economía de escala donde la mayor demanda hace que los precios de los equipos bajen, en concreto el de las estaciones base (suponen la mayor inversión); actualmente existen y se están implementando redes con 802.16 en países del Sur en zonas rurales y/o aisladas.

Por tanto, a día de hoy no es impensable el diseño y puesta en marcha de redes con 802.16, véase el ejemplo claro de la red de Cerro de Pasco (*7 Red Cerro Pasco GAMACOM*) donde según su director, con sobrada experiencia en WiFi, prefirió WiMAX debido a “*prestaciones y operativa*” que está le ofrecía, los costes de mantenimiento de la red, su interfaz amigable e intuitivo y la garantía de QoS, a pesar de el coste inicial elevado hicieron

que al final la empresa se inclinara por esta tecnología. Con lo que, se puede afirmar que técnicamente es viable la migración que junto con adecuados sistemas de formación y ampliación de cobertura y servicios se elevaría exponencialmente la utilidad de la red.

El coste de los equipos, especialmente de las estaciones base, sigue siendo elevado, pero no por ello inaccesible económicamente, existen equipos más económicos que implementan el estándar 802.16 (11.3 ANEXO III: Precios de otros equipos WiWiMAX) aunque no en bandas libres muchos de ellos, y otros que dicen ser WiMAX pero que no lo son (Pre-Wimax [CANOPY] que no es más que una versión mejorada de WiFi), incluso hay fabricantes nuevos como *Gil Technology* que no pertenecen a WiMAXForum y que comercializan equipos compatibles con el estándar IEEE802.16-2004 (véase ANEXO III: Precios de otros equipos WiMAX).

Por tanto, si WIMAX es viable económicamente para este caso podríamos decir que es discutible pero que si la red presenta necesidades de migración sin duda esta sería una opción bastante atractiva y la más adecuada técnicamente.

Esta red puede ofrecer servicios a las comunidades donde opera que impactarían en educación, desarrollo y subsanaría las necesidades que actualmente tiene la red de salud de la zona, la transferencia tecnológica sería completa con la formación adecuada, como de ha mencionado anteriormente.

Como se ha dicho en el presente PFC la tendencia del mercado es importante. Cada año el precio de los equipos se reduce entorno al 10%-20%, por lo que de seguir así este protocolo ambicioso podría ser una opción viable para entornos rurales en redes de telecomunicación de largo alcance.

Parte III

Conclusiones y Líneas Futuras

*Tucui Parlarishpa nucanchipaj caushay
aly. [La comunicación es vida]*

Anónimo (Quechua)

Capítulo 9

CONCLUSIONES GENERALES

9 CONCLUSIONES GENERALES

- Cuando se empezó a trabajar en este proyecto de fin de carrera el estándar vigente para WiMAX fijo era IEEE802.16-2004(e), durante el desarrollo del mismo se publicó una nueva versión que IEEE802.16-2009, por lo que la teoría se ha ido modificando durante la ejecución del trabajo y los equipos que se han empleado implementan el antiguo estándar pero compatible con el nuevo. Esto una vez más demuestra el rápido desarrollo de estas tecnologías.
- Lo más complicado desde punto de vista académico de hacer un estudio económico, es el hermetismo que tiene los fabricantes con este tipo de datos. Comprensible pero no deja de ser un obstáculo a la hora de intentar ser lo más fiel posible a datos veraces y actuales.
- Después de analizar varios equipos y *papers* al respecto se puede decir que una razón para que el coste de los equipos WiMAX sea elevado es porque el uso de una separación entre portadoras menor en WiMAX que en WiFi exige el uso de osciladores de mayor calidad, lo que encarece la etapa radio. Por otra parte, la canalización de 10 MHz de WiMAX exige una mayor capacidad y calidad de filtrado de señales indeseadas, lo que de nuevo encarece la etapa radio.
- Después de tener la oportunidad de monitorear 2 estaciones base de distintos fabricantes se puede llegar a la conclusión de que un interfaz general de BS es visual e intuitivo. Desde luego, hay que tener nociones de lo que se está tocando sino se quiere alteración de la configuración de la red.
- Me parece importante la utilidad de *clasifiers* en la diferenciación de flujos, con un conocimiento adecuado de su funcionamiento se podría convertir en una herramienta interesante para redes como la de Cerro de Pasco.
- El software de estos equipos (WiMAX) es realmente interesante (no es abierto), programas gráficos de análisis de red como *RedLinkBudgetTool* (de *RedLine*) ofrecen mejores prestaciones de análisis que *radiomobile* (por ej.).
- Los servicios se incrementarían con una tecnología como la implementada por IEEE802.16. En las comunidades beneficiarias impactaría en educación, sanidad e incluso con adecuados sistemas de formación la transferencia tecnológica sería total. Se está hablando de llegar con telefonía pública hasta hogares, y centros educativos. Se mejoraría los actuales problemas en la red de sanidad de las zonas, además que tal y como se ha comentado el diseño cubriría mayor número de usuarios y áreas donde actualmente no existen estos servicios.

- Considero que desde un punto de vista tecnológico sería conveniente la implementación de esta red buscando financiación en sector privado, dado que, como se ha comentado la viabilidad económica de este proyecto es discutible, puesto que a día de hoy dentro de los financiadores de la red Willay Cusco no se posee el presupuesto planteado.

Capítulo 10

Cooperación para el Desarrollo

10 COOPERACIÓN PARA EL DESARROLLO

Este proyecto de Fin de Carrera (PFC en adelante) ha sido financiado por la Beca para PFC de cooperación para el desarrollo de la Universidad Politécnica de Madrid (UPM), cuya finalidad es sufragar total o parcialmente, los gastos precisos para realizar un PFC de estudios oficiales cursados en la UPM en universidades o instituciones científicas de países de renta media o baja (de acuerdo con la clasificación del CAD) orientado a actividades de investigación orientadas al desarrollo humano, con especial interés en las áreas ligadas con los Objetivos de Desarrollo del Milenio, y en las actividades y regiones prioritarias de la cooperación española.

Por tanto, que resulta necesario hacer un análisis del impacto del mismo tanto en el desarrollo local como internacional, desde el punto de vista tecnológico, humano y de cooperación española.

10.1 Influencia en Cooperación para el desarrollo tecnológico y Humano.

Este proyecto realiza un análisis tanto técnico como económico de la posible mejora tecnológica de las redes existentes.

Se realiza en el Grupo de Telecomunicaciones Rurales (GTR) de la Pontificia Universidad Católica del Perú, que es el organismo (socio) encargado de las redes que llevan a cabo tanto la Fundación EHAS (Enlace Hispanoamericano para la Salud) como Ingeniería Sin Fronteras (ISF).

Se identifican dos tipos de beneficiarios (en una posible implementación) hay que considerar que este PFC es un estudio y como tal no ha tenido implementación durante hasta la finalización del mismo:

- **Beneficiarios directos:** usuarios de las redes inalámbricas de comunicaciones del Perú (maestros de educación básica y funcionarios públicos de municipios).
- **Beneficiarios indirectos:** habitantes de las zonas rurales de las provincias de Loreto, Cusco y Cajamarca.

El desarrollo tecnológico y la transferencia de conocimiento han jugado un papel crucial en el desarrollo del presente PFC, donde actividades como las siguientes han hecho que

no solo se termine un proyecto sino que se aporte conocimiento técnico y experiencia sino que además se influya en las nuevas tendencias tecnológicas locales:

- Realización de un estudio de la situación actual de las tecnologías en la región (Cusco-Red Willay), donde se ha valorado el funcionamiento, experiencias, actividades que soportan, mantenimiento de tecnología, cobertura y costes (situación actual).
- La realización de un estudio de la situación de la tecnología en el país, el espectro disponible y posibles despliegues tanto pilotos como consolidados, se ha planteado el estudio desde el punto de vista teórico la viabilidad del cambio.
- Para el caso de la parte económica se plantean presupuestos de coste que supondría llevar a cabo un proyecto de estas características, buscando la máxima cobertura técnica (equipos) en el mismo país y posibles subvencionadores.

10.2 Aporte a los Objetivos de Desarrollo del Milenio (ODM)

10.2.1 Perú y el cumplimiento de los ODM

La situación de Perú con el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo del milenio, según el último informe nacional del PNUD sobre los ODM [ODMPERU] en el país, es:

- La meta de reducción a la mitad del porcentaje de personas cuyos niveles de ingresos están por debajo de la línea de pobreza extrema está a punto de cumplirse en el Perú. De 23% de pobreza extrema en 1991, se pasó a 12,6% en el año 2008. La meta es reducir esta proporción a 11,5% al 2015. Según destaca el informe, en el ámbito nacional se ha reducido la incidencia de pobreza en todos los departamentos del Perú, excepto en Huancavelica. Entre el 2004 y el 2008, la brecha de la pobreza en promedio se redujo en 5,1 puntos porcentuales. Por otra parte, en el área rural, si bien se registra una disminución en la brecha de pobreza de 5,6%, ésta es aún elevada (21%).
- En el ámbito laboral, al 2008 la tasa de ocupación de la población en edad de trabajar fue de 70% y la cuarta parte de la población ocupada tenía ingresos inferiores a la línea de pobreza extrema.
- Respecto a la meta de reducir a la mitad entre 1990 y 2015 el porcentaje de personas que padecen hambre, al 2008 la meta de desnutrición global registra el 81% de cumplimiento. Sin embargo la desnutrición crónica afecta a más del 20% de los niños y niñas menores de 5 años y el 30,9% de la población tiene déficit calórico. La anemia en niños es otro indicador crítico que afecta al 56.8% de niños menores de tres años.
En los últimos años no se ha observado una mejora significativa. En Perú, el porcentaje de niños y niñas con peso por debajo al peso normal para su edad se ha reducido de 10,8%, en el año 1991, a 5,9% en el periodo 2007-2008,

acercándose a la meta de 5,4% establecida para el 2015. Sin embargo el informe destaca que en las áreas rurales este indicador permanece alto, llegando a afectar entre el 2007-2008 a un 9,5% de niñas y niños menores de 5 años, en especial a las niñas.

- La mortalidad en niños menores de cinco años de edad muestra una reducción del 68% entre al año 2006, habiéndose alcanzado la meta ocho años antes de la fecha comprometida.
- En cuanto a la violencia contra la mujer, el informe indica que más del 40% de la población femenina, entre los 15 y 49 años, manifiesta haber sufrido violencia por parte de su cónyuge.
- En el ámbito educativo, la universalización de la educación primaria en el Perú es un objetivo casi cumplido. En los últimos diez años, la tasa neta de matrícula ha fluctuado entre el 90.6% y el 94.2%.
- En cuanto a promover la igualdad de género y la autonomía de la mujer, la brecha de género en cuanto al acceso a la enseñanza primaria está por cerrarse (0,998), mientras que en la secundaria (1,019) y en la educación superior (1,047) se ha cumplido la meta. Sin embargo, en las áreas rurales persisten las desigualdades de género al interior del país, hay bajas coberturas en la educación secundaria (76%) y superior (23%) y problemas de repetición, deserción y baja calidad.
- La presencia de mujeres en empleos remunerados no agrícolas o de mayor productividad, muestra una lenta tendencia al alza en la década (de 34% a 37,5%), lo que contribuiría a mejorar la autonomía de las mujeres. En el sector agrícola, en términos de ingresos, las mujeres perciben el 62% del ingreso mensual respecto del percibido por los varones, siendo la costa la región más desigual (59,3%), seguida de la sierra (66,1%) y la selva (74,6%).
- Respecto de la meta de lograr para el año 2015 el acceso a la salud reproductiva, se destaca que si bien el 99% de mujeres en edad fértil tiene conocimiento de métodos anticonceptivos, sólo el 71% de ellas utiliza alguno de ellos, sea moderno (48%) o tradicional (23%).
Por otra parte, en cuanto a la meta de haber detenido y comenzado a reducir, para el año 2015, la propagación del VIH/SIDA, en el Perú, el VIH/Sida se comporta como epidemia concentrada, con una prevalencia en la población general inferior al 1%, pero en grupos de alto riesgo mayor del 10%. Se ha reducido a 25%, el porcentaje de casos detectados en el nivel avanzado.

Con respecto al indicador de grado de inserción en la economía mundial, entre 2004 y 2008 las importaciones y exportaciones crecieron en 165.2%, para alcanzar una cifra de US\$ 59 968.3 millones de dólares americanos. Las exportaciones no tradicionales con mayor crecimiento en los últimos cuatro años, fueron las pertenecientes al sector químico, que creció

151%, seguido por el sector agropecuario y metal-mecánico, ambos con una tasa de crecimiento de 138%.

10.2.2 Impacto del proyecto en los ODM locales

Perú es país prioritario de la cooperación española. En el mapa de prioridades se encuentra la región Cusco, Cajamarca y Loreto, donde fundamentalmente tiene lugar los programas Willay y EHAS, objeto de este trabajo.

Dentro de las líneas prioritarias señaladas en el Documento Estrategia País de la Cooperación Española en Perú [COPERU], figuran, relacionados con el objetivo general de este proyecto:

- Cobertura necesidades básicas: Fortalecimiento sistema público salud y Contribución a mejora de la educación.
- Gobernanza democrática y participación social: desarrollo de la administración y buena gestión de los asuntos públicos en los procesos de descentralización.

De los objetivos de Desarrollo del Milenio, este trabajo se alinea con:

1. **Objetivo 2: Educación Universal**



Ya que la redes prestan servicios a entidades educativas y de formación en las localidades de actuación.

2. **Objetivo 3: Promover La igualdad entre sexos y la autonomía de la mujer.**



Las redes que se implementan independientemente de la tecnología impactan en este objetivo ya que permiten la autosuficiencia de las mujeres, es necesario indicar que en Sudamérica la mayor parte de las mujeres trabajan en las zonas rurales, por tanto un desarrollo tecnológico les permitiría educación y autosuficiencia.

Si a estas redes además de su funcionamiento con administraciones locales se les añade puntos de salud, plan de formación y diagnóstico virtual se impactaría directamente en objetivos, como:

3. Objetivo 4: Reducir la mortalidad de los niños
4. Objetivo 5: Mejorar la salud materna
5. Objetivo 6: Combatir el VIH/SIDA

Parte V

Anejos

*No momento ruim da vida, prefiro fingir que
estou tranquilo e vencer, do que transmitir meu
medo e perder*

Tiago Augusto da Cunha (mindinho)

Capítulo 11

ANEXOS

11 ANEXOS I: CAPA MAC WiMAX (IEEE802.16)

11.1 ANEXO1. Funcionalidades de la capa MAC

11.1.1 Introducción

En este apartado del anexo se presentan las funcionalidades de la capa MAC definidas en el estándar 802.16. Para ello se introducirán las principales características de su arquitectura orientada a conexión, y compatible con múltiples servicios, entre ellas la calidad de servicio real, aspectos de seguridad y de configuración.

11.1.2 Duplexado (FDD, TDD)

El duplexado hace referencia al proceso de crear canales bidireccionales para la transmisión uplink y downlink. Time Division Duplexing (TDD) y Frequency Division Duplexing (FDD) son soportados por el estándar 802.16-2004. Las soluciones de banda con licencia utilizan generalmente el duplexado FDD, mientras que las soluciones de banda sin licencia utilizan el duplexado TDD.

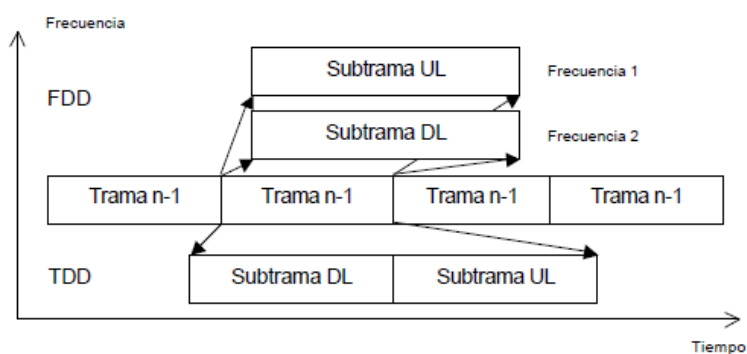


Figura 97. Secuencia de tramas en FDD y TDD

FDD requiere dos canales independientes que estén separados para minimizar la interferencia. Uno para transmisión y otro para recepción. La mayoría de bandas FDD se asignan para voz, puesto que la arquitectura bidireccional de FDD permite transportar la voz con retardos mínimos. Por contra, FDD añade componentes adicionales al sistema lo cual incrementa los costes. Implementar FDD es más caro porque requiere un hardware que soporte por separado los canales UL y DL. El coste es justificado por la mayor eficiencia del ancho de banda y la mejora de la QoS.

TDD resulta más adecuado en ambientes donde no es posible asignar dos canales independientes debido a las restricciones de regulación del espectro, o cuando se utilizan bandas sin licencia. TDD proporciona un único canal para las transmisiones UL y DL. Un sistema TDD puede asignar dinámicamente el ancho de banda del canal de subida y del de bajada dependiendo de los requerimientos de tráfico. Esta transferencia asimétrica es ideal para el tráfico de Internet (HTTP), donde una gran cantidad de datos se transmiten en sentido DL.

El sistema TDD opera transmitiendo en primer lugar el canal DL de la estación base a la estación cliente. Después de un periodo de guarda, la estación cliente transmite en el mismo canal en sentido UL.

Las soluciones TDD y FDD no pueden interoperar entre ellas, puesto que utilizan diferentes bandas de frecuencias y técnicas de duplexado. En la siguiente tabla se muestra una comparativa entre ambas técnicas.

	TDD	FDD
Descripción	Técnica de duplexado utilizada en soluciones de frecuencia sin licencia. Utiliza un único canal para los dos sentidos de transmisión	Técnica de duplexado utilizada en soluciones de frecuencia con licencia. Utiliza dos canales unos para UL y el otro para DL
Ventajas	<ul style="list-style-type: none"> • Mayor flexibilidad puesto que no requiere dos canales de frecuencia • Fácil de implementar con tecnología de "antenas inteligentes" • Asimétrico 	<ul style="list-style-type: none"> • Tecnología probada para voz • Diseñado para tráfico simétrico • No requiere periodo de guarda (mayor eficiencia)
Desventajas	<ul style="list-style-type: none"> • No puede operar en modo Full-Duplex 	<ul style="list-style-type: none"> • No puede ser implementado cuando el espectro no es disponible • Utiliza frecuencias con licencia • Coste más elevado
Uso	<ul style="list-style-type: none"> • Aplicaciones de datos asimétricos • Aplicaciones con variación del modelo tráfico de datos • Donde la eficiencia espectral es más importante que el coste 	<ul style="list-style-type: none"> • Aplicaciones con modelo de tráfico predecible • Donde el coste de los equipos es más importante que la eficiencia espectral

Tabla 23. Tipos de Duplexación en IEEE802.16

En resumen, FDD opera en dos canales independientes, uno para transmitir y otro para recibir. El espectro asignado para tecnologías FDD es de banda licenciada con anchos de banda idénticos. En este caso, no existen periodos de guarda entre las transmisiones UL y DL, permitiendo el funcionamiento en modo *full duplex* o *half duplex* (ambos soportados por el estándar).

En una solución TDD, un único canal es utilizado para transmitir y recibir. Se requieren periodos de guarda entre las transmisiones UL y DL.

11.1.3 Sistema de control de errores ARQ / HARQ

El mecanismo ARQ es una prestación opcional de la capa MAC que, si está implementado, puede ser activado en el momento de establecer la conexión básica. La activación y los parámetros ARQ se deben especificar y negociar durante la creación o en el cambio de una conexión y solo son válidos para una conexión unidireccional.

La técnica *Automatic Repeat Request* (ARQ) mejora las prestaciones entre extremos escondiendo las capas superiores de los errores inducidos por el canal en la transmisión, mejorándose por tanto la conexión extremo-extremo.

El estándar define la utilización conjunta de técnicas de corrección de error y de detección, conocidas como técnicas híbridas ARQ (HARQ – *Hybrid Automatic Repeat Request*). Utiliza un código de control de error conjuntamente con el esquema de la retransmisión para asegurar la transmisión confiable de los paquetes de los datos. La diferencia fundamental entre un esquema simple ARQ y un esquema HARQ, está en que en el esquema HARQ, las retransmisiones subsecuentes se combinan con la transmisión anterior para mejorar confiabilidad.

Actualmente, el estándar 802.16d, define un esquema de ordenación de los datos de forma aleatoria basado en un código pseudoaleatorio. Puesto que se espera que esta reordenación cambie en cada transmisión, no es posible aplicar la combinación de códigos. Para utilizar HARQ la reordenación de datos debe ser realizada en la cama MAC, asegurando que cada PDU sea transmitida al mismo tiempo que el código.

La utilización de las técnicas de retransmisión puede llegar a mejorar el SNR en el receptor, y de esta manera conseguir que la capacidad y el alcance del sistema sea mayor.

11.1.4 Estructuras de tramas en MAC

Los ejemplos de OFDM, incluidos en el estándar de tramas con TDD y FDD, son respectivamente las Figura 98 y Figura 99.

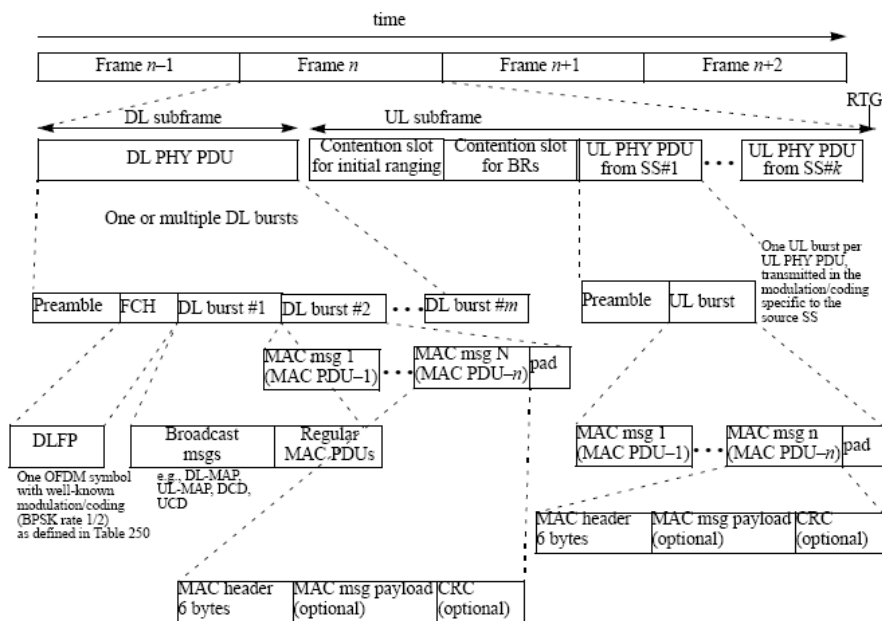


Figura 98. Estructura de trama OFDM con TDD

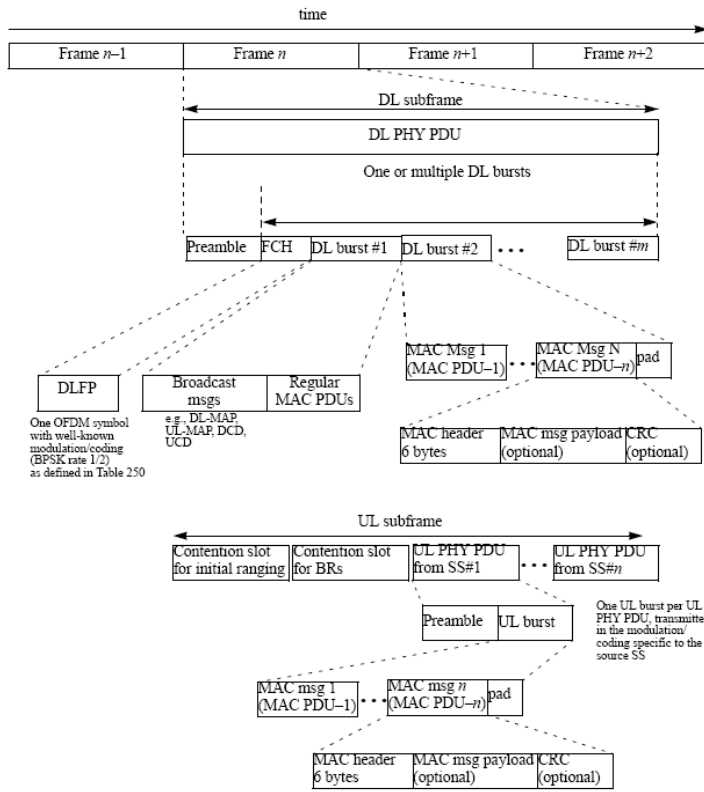


Figura 99. Estructura de trama OFDM con FDD

11.2 ANEXO II: Hojas de Características

11.2.1 Datasheet de la Estación Base AN-100U de RedLine

RedMAX Base Station (AN-100U) System Specifications



System Capability:	LOS, Optical LOS, non LOS Cellular-based point-to-multipoint
RF Band:	3.3-3.5*; 3.4-3.6; and 3.6-3.8 GHz
Channel Size:	3.5 MHz, 7 MHz
RF Dynamic Range:	> 40 dB
Spectral Efficiency:	Up to 5 bps/Hz (over the air)
Over The Air Rate:	Up to 35 Mbps (7 MHz channel, rates depend on channel size)
Ethernet Data Rate:	Up to 23 Mbps (7 MHz channel)
Latency:	6-18 msec (depends on channel size, OFDM frame duration)
Maximum Tx Power:	+23 dBm across all modulation/coding levels (region specific)
Rx Sensitivity:	Better than -98 dBm @ BPSK 1/2 (based on BER of 1x10e-6)
IF Cable:	Maximum length up to 984 ft (300 m) using Redline recommended high-grade IF cable
Network Attributes:	Transparent bridge 802.1Q, TOS/DSCP and L2/L3 address, traffic classification DHCP client, client pass-through
Modulation/Coding Rates:	Auto-select modulation: BPSK, QPSK, 16 QAM, 64 QAM Auto-select coding: 1/2, 2/3, 3/4
Over the Air Encryption:	DES, 3DES
Synchronization:	Input for external 1 PPS GPS clock signal
MAC:	802.16-2004 compliant PMP 802.16-2004 packet convergence sub-layer mode TDMA Access
Range:	Over 28 mi (40 km) LOS; 12mi (20 km) PMP Over 2 mi (3 km) non LOS
Duplex Technique:	TDD (time division duplex) HD-FDD (half duplex frequency division duplex)
Wireless Transmission (PHY):	256 FFT Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) (Orthogonal Frequency Division Multiplexing)
Network Connections:	Standard: 10/100 Ethernet (RJ-45)
System Configuration:	HTTP (Web) Interface, SNMP CLI via Telnet and Local Console
Network Management:	SNMP, standard and proprietary MIBs Full management by RedMAX Management Suite (RMS)
Power Requirements:	Auto-sensing 110/220/240 VAC 50/60 Hz Auto-sensing 18-72 VDC, 80 W
Redundant Power:	Optional dual AC or dual DC power supply (dual cord) with automatic fail-over
Compliance:	EMC: EN 301 489-1, EN 301 489-4, EN 55022/CISPR 22 RF: EN 302 326, Industry Canada: RSS-192, FCC: Parts 90 & 15** Safety: IEC 60950-1, UL 60950-1
Operating Temperature:	IDU: 0 C to 40 C ODU: -40 C to 60 C
Dimensions	17 x 12 x 1.75 in (431.8 x 304.8 x 44.45 mm)
Weight:	5.5 lb (2.5 kg)
Humidity:	Up to 90% non-condensing

11.2.2 Datasheet de Estación Suscriptora de RedLine

RedMAX Subscriber Unit (SU-O) System Specifications

System Capability:	LOS, Optical LOS, non-LOS Cell-based Point-to-Multipoint
RF Band ¹ :	3.3-3.5; 3.4-3.6; and 3.6-3.8 GHz
Channel Size:	3.5 MHz, 7 MHz
Spectral Efficiency:	Up to 5 bps/Hz (over the air) Up to 3 bps/Hz (net to Ethernet)
Over The Air Rate:	Up to 35 Mbps (@7 MHz, rates depend on channel size)
Ethernet Data Rate:	Up to 23 Mbps (@7 MHz)
Maximum Tx Power:	Up to +20 dBm (region specific)
Rx Sensitivity:	Better than -98 dBm @ BPSK 1/2 (based on BER of 1x10e-6)
Cable:	Maximum length up to 250 ft (76 m) using Redline recommended shielded outdoor cable
Network Attributes:	Transparent bridge 802.1p, 802.1Q VLAN port tagging 802.1Q, TOS/DSCP and L2/L3 address, traffic classification DHCP client
Modulation/Coding Rates:	Auto select: BPSK, QPSK, 16 QAM, 64 QAM
Coding Rates:	1/2, 3/4 and 2/3
Over the Air Encryption:	DES, 3DES
MAC:	Cell-based PMP deployment 802.16-2004 compliant PMP 802.16-2004 packet convergence sub-layer mode TDMA access
Duplex Technique:	TDD (time division duplex) HD-FDD (Half Duplex Frequency Division Duplex)
Wireless Transmission (PHY):	256 FFT Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM)
System Configuration:	SNMP, FTP, CLI
Network Management:	SNMP, standard and proprietary MIBs Full management by Redline Management Suite (RMS)
Power Requirements:	PoE-Standard IEEE 802.3af
Available Power Blocks:	Auto-sensing 110/220/240 VAC 50/60 Hz
Compliance:	EMC: EN 301 489-1, EN 301 489-4, EN 55022/CISPR 22 RF: EN 301 021, EN 301 753, Industry Canada: RSS-192 Safety: IEC 60950-1, EN 60950-1, UL 60950-1
Operating Temperature:	-40 C to 65 C
Antenna:	Standard: Integrated 14 dBi flat panel Optional: Selection of non integrated high gain antennas
Dimensions/Weight:	8" W x 8" L x 2.5" H (20 cm x 20 cm x 6.35 cm) / 4.5 lbs (2 Kg) not including mounting bracket

11.3 ANEXO III: Precios de otros equipos WiMAX

El Mercado de WiMAX es bastante complejo, dado que se trata de una economía de escala donde el precio unitario de los equipos baja gracias a la demanda de los mismos, y en concreto para el caso de WiMAX el *WiMAXForum* es el que regula la certificación de equipos e influye en el proceso anterior.

Algunos de los precios que se han manejado los últimos 5 años en web, estudios, proveedores e incluso fabricantes nuevos, se resumen en la siguiente tabla:

Fabricante	Equipo	Precio €	Frecuencia	Periodo	Fuente
Airspan	Micro BS para escenarios rurales para servicios fijos y móviles	~5000	Licenciada	1er.semestre 2006	Regione Piemonte Assessorato all'Università, Ricerca Politichee per l'Innovazione e l'Internazionalizzazione Torino-Italia
	MacroMAX BS para escenarios metropolitanos, para servicios fijos y móviles	~20000	Licenciada	1er.semestre 2006	Regione Piemonte Assessorato all'Università, Ricerca Politichee per l'Innovazione e l'Internazionalizzazione Torino-Italia
	HiperMAX BS para escenarios metropolitanos, para servicios fijos y móviles	~20000	Licenciada	1er.semestre 2006	Regione Piemonte Assessorato all'Università, Ricerca Politichee per l'Innovazione e l'Internazionalizzazione Torino-Italia
	Equipo indoor EasyST CPE, para servicios fijos y móviles	~300	Licenciada	1er.semestre 2006	Regione Piemonte Assessorato all'Università, Ricerca Politichee per l'Innovazione e l'Internazionalizzazione Torino-Italia
	ProST outdoor CPE, para servicios fijos y móviles	~350	Licenciada	1er.semestre 2006	Regione Piemonte Assessorato all'Università, Ricerca Politichee per l'Innovazione e l'Internazionalizzazione Torino-Italia
Alvarion	CPE 802.16d/e	<200	Licenciada	1er.semestre 2008	Regione Piemonte Assessorato all'Università, Ricerca Politichee per l'Innovazione e l'Internazionalizzazione Torino-Italia
	tarjeta PC 802.16d/e	<800	Licenciada	1er.semestre 2008	Regione Piemonte Assessorato all'Università, Ricerca Politichee per l'Innovazione e l'Internazionalizzazione Torino-Italia
Siemens	BS 802.16d con SW y FW con posibilidad de actualización a .16e	~60000	Licenciada	1er.semestre 2006	Regione Piemonte Assessorato all'Università, Ricerca Politichee per l'Innovazione e l'Internazionalizzazione Torino-Italia
Red Line	BS AN100U 802.16-2004 con antenas de 60° o 90°, cables y conectores	~7000	Licenciada	1er.semestre 2005	Regione Piemonte Assessorato all'Università, Ricerca Politichee per l'Innovazione e l'Internazionalizzazione Torino-Italia
	CPE SU-O, 802.16-2004 (3.4 - 3.5 GHz) 3.4MHz de ancho de canal con antenas cables y conectores	~700	Licenciada	1er.semestre 2005	Regione Piemonte Assessorato all'Università, Ricerca Politichee per l'Innovazione e l'Internazionalizzazione Torino-Italia
GIL TECHNOLOGY	Libra 5816 Base Station (BS) requires antenna	~2000	No Licenciada ISM	2do.semestre 2009	<u>GIL Tecnology:</u> http://www.gil.com.tw/Default.aspx?myItemId=1&mySiteId=&myLang=eng&myPageId=&myContent=2008051920472033_E.html
	Libra 5816 Subscriber Station Integrated Antenna	~240	No Licenciada ISM	2do.semestre 2009	<u>GIL Tecnology:</u> http://www.gil.com.tw/Default.aspx?myItemId=1&mySiteId=&myLang=eng&myPageId=&myContent=2008051920472033_E.html
	Libra 5816 Long Range Subscriber Station (requires antenna)	~240	No Licenciada ISM	2do.semestre 2009	<u>GIL Tecnology:</u> http://www.gil.com.tw/Default.aspx?myItemId=1&mySiteId=&myLang=eng&myPageId=&myContent=2008051920472033_E.html
Vecima	Base Stn WiMAX 3400-3650MHz 60 deg Vert	~4300	Licenciada	1er.semestre 2010	<u>StreakWave:</u> http://www.streakwave.com/items.asp?Cc=WIMAX%2DVecima&iTpStatus=0&Tp=&Bc=
	Base Stn WiMAX 3400-3650MHz No Antenna	~4200	Licenciada	1er.semestre 2010	<u>StreakWave:</u> http://www.streakwave.com/items.asp?Cc=WIMAX%2DVecima&iTpStatus=0&Tp=&Bc=
	Base Stn WiMAX 3650-3675MHz & 5150-5870MHz No Antenna	~3000	Licenciada No Licenciada	1er.semestre 2010	<u>StreakWave:</u> http://www.streakwave.com/items.asp?Cc=WIMAX%2DVecima&iTpStatus=0&Tp=&Bc=
	WiMAX Outdoor 3.5GHz y 5GHz CPE con antena X dBi	~280	Licenciada No Licenciada	1er.semestre 2010	<u>StreakWave:</u> http://www.streakwave.com/items.asp?Cc=WIMAX%2DVecima&iTpStatus=0&Tp=&Bc=
Tranzeo	BS 3.65-3.675GHz y 5.8 WiMAX Pico Base Station	~2000	Licenciada No Licenciada	1er.semestre 2010	<u>StreakWave:</u> http://www.streakwave.com/items.asp?Cc=WIMAX%2DTranzeo&Bc=
	CPE: .3-3.8GHz / 5.8GHz WiMAX SU with XdBi antenna	~240	Licenciada No Licenciada	1er.semestre 2010	<u>StreakWave:</u> http://www.streakwave.com/items.asp?Cc=WIMAX%2DTranzeo&Bc=

Referencias

Hay alguien tan inteligente que aprende de la experiencia de los demás.

Voltaire

Capítulo 12

REFERENCIAS

12 REFERENCIAS

[ALBIPLink] *Solución de Transporte WiMAX*. Albentia 2006. Disponible en Web: <<http://www.albentia.com/productos.php?productID=IPRadioLinks> >

[ALB250] *Estación Suscriptora*. Albentia 2006. Disponible en Web: <<http://www.albentia.com/Docs/ALB-250%20Datashet.pdf>>

[ALBPMP] *Solución Punto-Multipunto*. Albentia 2007. Disponible en Web: <<http://www.albentia.com/productos.php?productID=PMPBackhaul>>

[ALB450] *Estación Base para PtMP*. Albentia 2006. Disponible en Web: <<http://www.albentia.com/Docs/ALB-450%20Datashet.pdf>>

[Aperto09] *Catálogo de productos WiMAX*. Aperto 2009. Disponible en Web: <http://www.apertonet.com/docs/aperto_corp_brochure.pdf>

[ALB550] *Estación Base ARBA550*. Albentia 2006. Disponible en Web: <<http://www.albentia.com/productos.php?productID=ARBA550> >

[Airspan] *Estación Base HiperMAX*. Airspan 2006. Disponible en Web: <<http://www.airspan.com/pdfs/HiperMAX%20Datashet.pdf> >

[AirFixMov] *Estación Base trabajo dual Fijo-Móvil*. Airspan 2008. Disponible en Web: <http://www.airspan.com/pdfs/WiMAX_Brochure_Rev_H.pdf>

[ALV03] ALVARION. *Artículo: Guinness World Records Recognizes World's Longest Wi-Fi Connection*. Año 2003. Disponible en Web: <<http://www.alvarion.com/index.php/en/news-a-events/global-press-releases/934-guinness-world-records-recognizes-worlds-longest-wi-fi-connection>>. [ref. Enero 2010]

[ALVLatin09] ALVARION. *WiMAX en Latinoamérica*. Año 2009. Disponible en Web: <<http://www.alvarion.com/index.php/en/news-a-events/regional-news/italy/1227-alvarion-crece-espectacularmente-en-latinoamerica-en-plantaciones-wimax> >

[ALBSYS] *Albentia Systems*. Fabricante Español de equipos WiMAX. Año 2006. Disponible en Web: <<http://albentia.es/>>

[AN100] *AN-100U*. Estación Base de RedLine. Disponible en Web: <http://www.redlinecommunications.com/news/resourcecenter/productinfo/Redmax_an100u.pdf >

[ATHER] Atheros <<http://www.atheros.com/>>

- [ClearWire] XOHM. WiMAX en Baltimore-EEUU. Septiembre 2008. Disponible en Web: <<http://www.xohm.com/discover>>. Cobertura: <<http://www.xohm.com/coverage>>
- [COIT] Colegio Oficial de Ingenieros de Telecomunicación Grupo de Nuevas Actividades Profesionales, *La situación de las Tecnologías WLAN basadas en el estándar IEEE 802.11 y sus variantes ("Wi-Fi")*. Disponible en Web: <<http://www.coit.es>>
- [COPERU] Documento Estrategia País de la Cooperación Española en Perú. Año 2007. [ref. Marzo 2009]
- [EHAS] EHAS: Enlace Hispanoamericano para la Salud. Disponible en web: <http://wiki.ahas.org/index.php?title=Gestión_de_red_y_de_incidentes>
- [FABWMX09] Fabricantes WiMAX. Año 2009. Disponibles en Web: <<http://albertia.es/>>,<<http://www.apertonet.com/>>,<<http://alvarion.com/>>,<<http://www.redlinecommunications.com/>>,<<http://www.vecima.com/>>,<<http://www.tranzeo.com/>>,<<http://www.trangobroadband.com/solutions/wimax-network-backhaul.aspx>>
- [FITEL09] *Ministerio de Transportes y Comunicaciones*. FITEL-Fondo de Inversión en Telecomunicaciones. Disponible en Web: <<http://www.fitel.gob.pe/contenido.php?ID=44>>
- [FUJIT] FUJITSU. Empresa de Tecnología. Disponibles en Web: <<http://www.fujitsu.com/global/>> [ref. Enero 2010]
- [FundWMX07] ANDREWS Jeffrey G., GHOSH Arunabha, RIAS Muhamed. *Fundamentals of WiMAX-Understanding Broadband Networking*. Segunda Edición 2007. [ref. Septiembre 2009]
- [GAMA09] Empresa de Telecomunicaciones. GAMACOM S.A.C - *Soluciones Integradas*. Servicios Públicos de Portador de Larga Distancia Nacional e Internacional. Fundada 1998. Sede Lima Perú. Disponible en Web: <<http://www.gamacom.pe/>>
- [HYPERL] Fabricante y Distribuidor de componentes de comunicaciones. *HyperLink Technology del grupo L-Com Global Connectivity*. Disponible en Web: <http://www.l-com.com/home.aspx>
- [IEEE09] IEEE The world's leading professional association for the advancement of technology. *Institute of Electrical and Electronic Engineers*. Disponible en Web: <<http://www.ieee.org/web/aboutus/home/index.html>> [ref. Diciembre 2009]
- [IEEE11] IEEE802.11-1999. Standard: *Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications*. IEEE Computer Society, September 1999. [ref. Julio 2009]
- [IEEE11a] IEEE802.11a-1999. Standard: *Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications: Higher-Speed Physical Layer Extension in 5GHz Band*. IEEE Computer Society, September 1999. [ref. Agosto 2009]
- [IEEE1107] IEEE802.11-2007. Standard: *Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY). IEEE Standard for: Information technology—Telecommunications and information exchange between systems—Local and metropolitan area networks. Specifications: Part 11. Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications*. IEEE Computer Society, Marzo 2007. [ref. Septiembre 2009]

[**IEEE16d**] IEEE 802.16-2004 *Standard for local and metropolitan area networks: Air interface for Fixed and Mobile Broadband Wireless Access Systems*. IEEE Computer Society and the IEEE Microwave Theory and Techniques Society, September 2006. [ref. Julio 2009]

[**IEEE1609**] IEEE 802.16-2009 *Standard for local and metropolitan area networks: Air interface for Fixed and Mobile Broadband Wireless Access Systems*. IEEE Computer Society and the IEEE Microwave Theory and Techniques Society, September 2009. [ref. Diciembre 2009]

[**MIMO**] Definición de Antenas Inteligentes. Disponible en Web: <http://en.wikipedia.org/wiki/WiMAX_MIMO> [ref. Octubre 2009]

[**MTCPE**] Ministerio de Transportes y Comunicaciones del Perú. Disponible en Web: <<http://www.mtc.gob.pe/portal/inicio.html>> [ref. Noviembre 2009]

[**MIKRO**] Fabricante de SBC's y tarjetas inalámbricas. *MIKROTIK*. [ref. Noviembre 2009]. Disponible en Web: <www.mikrotik.com>

[**ODMPERU**] Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. Perú. 2008. Disponible en Web: <<http://www.pnud.org.pe/frmODMNacional.aspx>>. [ref. Enero 2010]

[**OSIPTL**] Organismo de Supervisión en Intervención Privada de Telecomunicaciones. Perú. *Boletines Tecnológicos*. 2006, 2007. Disponibles en Web: <<http://www.osiptel.gob.pe/WebSiteAjax/>> [ref. Diciembre 2009]

[**RECWLAN**] RODRIGUEZ, José Antonio. *Gestión de recursos para servicios de tiempo real sobre Redes WLAN*. UGR -Universidad de Granada. Julio 2009. [ref. Enero 2010]

[**REDINAL**] SIMÓ REIGADAS, Francisco Javier. *Redes Inalámbricas de Área Local IEEE802.11*. Depto. de Teoría de la Señal y Comunicaciones. Universidad Rey Juan Carlos. Madrid Septiembre 2007. [Ref. Julio 2009]

[**REDLI09**] *RedLine Communications*. Fabricante de Equipos WiMAX. Toronto 1999. Miembro de WiMAX Forum™. Disponible en Web: <<http://www.redlinecommunications.com/>>

[**REGWMX_09**] Ley Regulatoria Del Espectro para Perú. Disponible en Web: <<http://www.mtc.gob.pe/portal/comunicacion/politicas/normaslegales/plannacionaldeatribuciondefrecuencias.html>>

[**Ritar**] Fabricante de fuentes y protectores eléctricos. Disponible en Web: <<http://www.ritarpower.com/products.aspx?catid=16&pcatid=13>> [ref. Enero 2010]

[**SIMOMOD**] SIMÓ REIGADAS, Francisco Javier, "Modelado y Optimización de IEEE 802.11 para su aplicación en el despliegue de redes extensas en zonas rurales aisladas de países en desarrollo". Año 2007. Disponible en Web: <<http://www.ehas.org/uploads/file/difusion/academico/Tesis/TesisJSimo.pdf>>

[**SOLWIFI**] SAIZ AGUSTIN, Purificación. Colegio Oficial de Ingenieros de Telecomunicación. *Soluciones Inalámbricas: WiFi*. Donostia Noviembre 2009. Disponible en Web: <<http://www.coit.es>> [Ref. Enero 2010]

[TRANZ] *Tranzeo*. Fabricante de equipos WiMAX. Año 2006. Disponible en Web: <<http://www.tranzeo.com/>>

[TRWMX5] *Estación Suscriptora*. Tranzeo 2006. Disponible en Web: <<http://www.tranzeo.com/products/docs/TR-WMX-5-XX.PDF>>

[UBNT] Fabricante de SBC's y tarjetas inalámbricas. *UBIQUITI NETWORKS*. [ref. Noviembre 2009]. Disponible en Web: <www.ubn.com>

[UNECO] Operador que despliega WiMAX en Colombia. Disponible en Web: <www.une.com.co> [ref. noviembre 2009]

[VOYAG] *Debian VOYAGE LINUX*. Disponible en Web: <<http://linux.voyage.hk/>>

[WiLD09] CAMACHO Luis, QUISPE River, CÓRDOVA César, LIÑÁN Leopoldo, CHÁVEZ David. *WiLD, WiFi based Long Distance*. 1era Edición. 2009. Lima-Perú. [ref. Enero 2010]. Disponible en Web: <<http://www.gtr.telecom.pucp.edu.pe/gtr/contenido/wild-wifi-based-long-distance-2009>>

[WIMAXNS-2] *WiMAX Module for the NS-2 Simulator*. LRC-Computer Networks Laboratory. Julio 2008. Disponible en Web: <http://www.lrc.ic.unicamp.br/wimax_ns2/> <<http://w3.antd.nist.gov/seamlessandsecure/pubtool.shtml>> [ref. Diciembre 2009]

[WiMAXCities] Presencia WiMAX en varias ciudades del mundo. Disponible en Web: <<http://www.clear.com/index/coverage>><<http://www.towerstream.com/index.asp?ref=comp any>>

[WirelessNet] GAST, Matthew. *Wireless Networks The Definitive Guide*. O'Reilly. 2005. [ref. Septiembre 2009]

[WILAC] PIETROSEMOLI, Ermanno. *"Enlaces de Larga Distancia"*. WILAC Tecnologías Inalámbricas para el Desarrollo en Latino América y el Caribe. Febrero 2008. Disponible en Web: <<http://www.wilac.net/index.html>> [ref. Agosto 2009]

[WIFIALI] *Asociación WiFi-Alliance*. Disponible en Web. <<http://www.wi-fi.org/>> [ref. Diciembre 2009]

[WirelessNet] GAST, Matthew. *Wireless Networks The Definitive Guide*. O'Reilly. 2005. [ref. Septiembre 2009]

[WXDev08] SOUTHWOOD Russell. *WiMAX en África*. Diciembre 2008. Disponible en Web: <<http://mybroadband.co.za/news/Telecoms/6343.html>>.

[WMXForum] *WiMAX Forum*. Organización que promueve la compatibilidad e interoperabilidad de productos inalámbricos de banda ancha basados en IEEE802.16. Junio 2001. Disponible en Web: <<http://www.wimaxforum.org/>>

[WWISE] *WorldWide Spectrum Efficiency*. Disponible en Web: <<http://www.ndparking.com/wwise.org>> [ref. Enero 2010]