



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Mecánica Eléctrica

**ANÁLISIS TÉCNICO Y ECONÓMICO PARA LA
IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA WIMAX 802.16, EN EL ÁREA
METROPOLITANA DE GUATEMALA.**

Luis Carlos Morales Monterrosa

Asesorado por el Ing. Enrique Edmundo Ruiz Carballo

Guatemala, octubre de 2008

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ANÁLISIS TÉCNICO Y ECONÓMICO PARA LA
IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA WIMAX 802.16, EN EL
ÁREA METROPOLITANA DE GUATEMALA.**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

LUIS CARLOS MORALES MONTERROSA
ASESORADO POR EL INGENIERO ENRIQUE EDMUNDO RUIZ CARBALLO

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE
INGENIERO ELECTRÓNICO

GUATEMALA, OCTUBRE DE 2008

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Inga. Glenda Patricia García Soria
VOCAL II	Inga. Alba Maritza Guerrero Spínola de López
VOCAL III	Ing. Miguel Ángel Dávila Calderón
VOCAL IV	Br. Milton De León Bran
VOCAL V	Br. Isaac Sultán Mejía
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADORA	Inga. Ingrid Salomé Rodríguez García de Loukota
EXAMINADOR	Ing. Francisco Javier González López
EXAMINADOR	Ing. José Aníbal Silva De Los Ángeles
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

ANÁLISIS TÉCNICO Y ECONÓMICO PARA LA IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA WIMAX 802.16 EN EL ÁREA METROPOLITANA DE GUATEMALA,

tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Mecánica Eléctrica, el 22 de agosto de 2006.



Luis Carlos Morales Monterrosa

Guatemala, 1 Agosto del 2,008

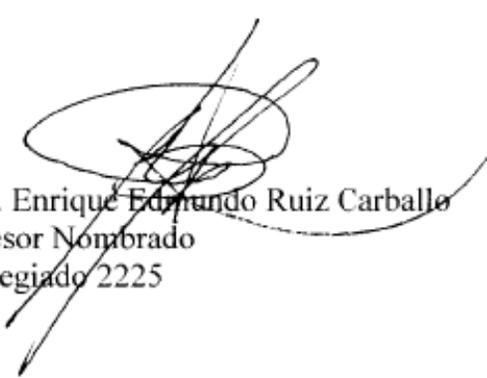
Señor Coordinador del Area de Electrónica
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala

Señor Coordinador

Por medio de la presente, me permito informarle que he revisado completamente el trabajo de graduación titulado: **“ANALISIS TECNICO Y ECONOMICO PARA LA IMPLEMENTACION DEL SISTEMA WIMAX 802.16 EN EL AREA METROPOLITANA DE GUATEMALA”**, desarrollado por el señor Luis Carlos Morales Monterrosa, dicho trabajo cumple con los objetivos propuestos en el anteproyecto de tesis.

Por lo tanto, el autor de este trabajo y yo, como su asesor, nos hacemos responsables del contenido y conclusiones de la misma.

Atentamente,



Ing. Enrique Edmundo Ruiz Carballo
Asesor Nombrado
Colegiado 2225



FACULTAD DE INGENIERIA

Escuelas de Ingeniería Civil, Ingeniería
Mecánica Industrial, Ingeniería Química,
Ingeniería Mecánica Eléctrica, Técnica
y Regional de Post-grado de Ingeniería
Sanitaria.

Ciudad Universitaria, zona 12
Guatemala, Centroamérica

Guatemala, 19 de agosto de 2008

Señor Director
Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería, USAC.

Señor Director:

Por este medio me permito dar aprobación al Trabajo de Graduación titulado: "**ANALISIS TECNICO Y ECONOMICO PARA LA IMPLEMENTACION DEL SISTEMA WIMAX 802.16 EN EL AREA METROPOLITANA DE GUATEMALA**", desarrollado por el estudiante **Luis Carlos Morales Monterrosa**, ya que considero que cumple con los requisitos establecidos.

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarlo.

Atentamente,

ID Y ENSEÑAD A TODOS




Ing. Julio César Solares Peñate
Coordinador de Electrónica

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, después de conocer el dictamen del Asesor, con el Visto Bueno del Coordinador de Área, al trabajo de Graduación del estudiante; Luis Carlos Morales Monterrosa, titulado: ANÁLISIS TÉCNICO Y ECONÓMICO PARA LA IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA WIMAX 802.16 EN EL ÁREA METROPOLITANA DE GUATEMALA, procede a la autorización del mismo.

Ing. Mario Renato Escobedo Martínez

DIRECTOR



GUATEMALA, 12 DE SEPTIEMBRE 2005.



El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, al trabajo de graduación titulado: **ANÁLISIS TÉCNICO Y ECONÓMICO PARA LA IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA WIMAX 802.16 EN EL ÁREA METROPOLITANA DE GUATEMALA**, presentado por el estudiante universitario **Luis Carlos Morales Monterrosa**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

A handwritten signature in black ink, consisting of a large loop and a vertical stroke.

Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
DECANO

Guatemala, octubre de 2008



/gdech

AGRADECIMIENTOS A

- DIOS TODOPODEROSO** Por ser el Creador de todo lo existente, en Él encontré la fuerza en los momentos más difíciles.
- VIRGEN MARÍA** Por sus intercesiones y favores recibidos en todo el transcurso de mi carrera.
- MIS PADRES** Dr. Luis Alberto Morales y Dra. Mercedes Isolina Monterrosa, quienes me dieron la vida y siguen apoyandome incondicionalmente, gracias por todo su amor y cariño.
- CARMENCITA** Por ser mi alma, mi aliento y mi apoyo en el largo y difícil camino de la vida, gracias por compartir esta felicidad.
- MI FAMILIA** Mis abuelitas Josefa (+) y Rosalinda, Ingrid, Cristhian, Marisol, Luis Alberto, Pablo y Renato; todos mis tíos y primos que me apoyaron a lo largo de esta carrera de principio a fin.
- COMPAÑEROS Y AMIGOS** Por su ayuda en toda la carrera y en los momentos inolvidables de los famosos proyectos.
- FACULTAD DE INGENIERIA** Por ser parte de ella y por la oportunidad de formarme profesionalmente para servir a la sociedad.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE ABREVIATURAS	IX
GLOSARIO	XI
RESUMEN.....	XV
OBJETIVOS.....	XVII
INTRODUCCIÓN	XIX
1 EL ESTÁNDAR IEEE 802.16 PARA BANDA ANCHA INALÁMBRICA	1
1.1 Generalidades.....	1
1.2 Aplicaciones.....	2
1.2.1 Enlaces celda-switch (<i>backhaul</i>) celular.....	2
1.2.2 Ancho de banda bajo demanda	3
1.2.3 Banda ancha residencial.....	4
1.2.4 Áreas no cubiertas.....	5
1.2.5 Servicios inalámbricos mejor conectados.....	6
1.3 Principales características: tasa de transferencia, escalabilidad, QoS y seguridad.....	6
1.3.1 Tasa de transferencia.....	6
1.3.2 Escalabilidad.....	7
1.3.3 Cobertura.....	8
1.3.4 Calidad de servicio.....	8
1.3.5 Seguridad	8
2 PROPAGACIÓN Y TÉCNICAS DE MODULACIÓN PARA WIMAX.	11
2.1. Introducción	11
2.2. Propagación NLOS Vs. LOS	11

2.3.	Soluciones tecnológicas NLOS.....	14
2.3.1.	Tecnología OFDM.....	14
2.3.2.	Subcanalización.....	18
2.3.3.	Antenas para aplicaciones inalámbricas fijas.....	19
2.3.4.	Diversidad de transmisión/recepción.....	20
2.3.5.	Modulación adaptativa.....	21
2.3.6.	Técnicas de corrección de error.....	21
2.3.7.	Control de potencia.....	22
2.3.8.	Modelos de propagación NLOS.....	22
2.3.9.	Modelos SUI (Stanford University Interim).....	23
2.3.10.	Probabilidad de predicción de cobertura.....	24
2.3.11.	Rango de cobertura WiMAX.....	25
3.	CAPAS DEL IEEE 802.16.....	27
3.1	Especificación MAC.....	27
3.1.1	Topología punto-multipunto.....	27
3.1.2	Topología Mesh (Malla).....	30
3.2	Especificación PHY.....	32
3.2.1	WirelessMAN-SC PHY.....	32
3.2.2	WirelessMAN-SCa PHY.....	33
3.2.2.1	Proceso de transmisión.....	35
3.2.2.2	Aleatorización de bits fuente.....	36
3.2.2.3	FEC concatenado.....	37
3.2.2.4	Código externo.....	37
3.2.2.5	Block entrelazador (<i>Interleaving</i>).....	38
3.2.2.6	Código interno.....	38
3.2.2.7	Sin FEC.....	42
3.2.2.8	BTC.....	43
3.2.2.9	Modulaciones y mapeo de constelaciones.....	45

3.2.2.10 Mapeo de constelación	46
3.2.2.11 Modulación BPSK Ensanchada	50
3.2.2.12 Empaquetado de Burst.....	52
3.2.2.13 Encapsulado Duplex.....	53
3.2.2.14 FDD.....	53
3.2.2.15 FDD con Burst Downlink	53
3.2.2.16 Generando un downlink continuo desde un burst downlink.....	56
3.2.2.17 TDD	56
3.3 Especificación WirelessMAN-OFDM PHY	58
3.3.1 Introducción	58
3.3.2 Descripción de Símbolos OFDM.....	58
3.3.2.1 Dominio del tiempo	58
3.3.2.2 Dominio en frecuencia.....	60
3.3.2.3 Codificación de canal.....	61
3.3.2.4 Aleatorización	61
3.3.3 FEC	63
3.3.4 Código convolucional concatenado Reed-Solomon (RS-CC)	63
3.3.5 Entrelazador	67
3.3.6 Modulación	69
3.3.6.1 Modulación de datos	69
3.3.6.2 Modulación piloto	70
3.3.6.3 Codificaciones Rate_ID	71
3.3.6.4 Modulación y estructura de preámbulo	72
3.3.7 Estructura de Frame.....	73
3.3.7.1 PMP.....	73
3.3.7.2 Mesh.....	76
3.3.7.3 Códigos de duración de Frame.....	77
3.3.7.4 Formato de esquema burst.....	78
3.3.8 Mecanismos de control	78

3.3.8.1 Sincronización	78
3.3.8.1.1 Sincronización de red	78
3.3.8.1.2 Rango	79
3.3.8.2 Requerimiento de ancho de banda	80
3.3.8.2.1 Selección de parámetros.....	81
3.3.8.2.2 Transmisión con contención total.....	85
3.3.8.2.3 Transmisión con contención focalizada.....	85
3.3.9 Mediciones de calidad de canal	87
3.3.10 Requerimientos de frecuencia y timing.....	88
4 ANÁLISIS TÉCNICO Y ECONÓMICO PARA LA IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA WIMAX 802.16, EN EL ÁREA METROPOLITANA DE GUATEMALA.....	89
4.1 Análisis técnico de la implementación del sistema Wimax 802.16.....	89
4.1.1 Visión de la red implementada Wimax.....	89
4.1.2 Pasos para la implementación del Sistema Wimax, en área metropolitana de Guatemala.....	93
4.1.3 Nuevos servicios implementados.....	96
4.2 Análisis económico de la implementación del sistema Wimax 802.16....	98
4.2.1 Ventajas económicas de Wimax	98
4.2.2 Estudio financiero	99
4.2.3 Valor Actual Neto (VAN).....	101
4.2.4 Tasa Interna de Retorno (TIR).....	101
4.2.5 Punto de Equilibrio	102
4.2.6 Análisis costo-beneficio.....	102
CONCLUSIONES.....	105
RECOMENDACIONES.....	107
BIBLIOGRAFÍA.....	109

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1. Wimax como backhaul.	3
2. El estándar IEEE 802.16 permite soluciones que cumplen con las necesidades de una variedad de segmentos de acceso de banda ancha.	5
3. El estándar IEEE 802.16 permite conexiones punto-multipunto fuera de la línea de vista y aplicaciones de enlaces en línea de vista.	7
4. El estándar IEEE 802.16 está diseñado para el espectro de bandas licenciadas y no licenciadas-exentas para acomodar fácilmente el planeamiento de celdas a través del mundo.	9
5. Zona de Fresnel LOS	11
6. Zona de Fresnel NLOS	12
7. Ubicación del equipo de abonado (CPE) para condición NLOS	13
8. OFDM Vs. Portadora simple. Datos serie convertidos en símbolos (cada símbolo puede representar 1 o más bit de datos)	15
9. Señales recibidas OFDM y portadora simple. El área de puntos representa el espectro transmitido. El área sólida es la entrada del receptor.	15
10. OFDM Orthogonal frequency division multiplexing.....	16
11. Espectro de OFDM solapado	18
12. Efecto de la sub-canalización.....	19
13. Radio de celda relativo para modulación adaptativa	21
14. Radio de celda para funcionalidad completa vrs. estándar	26
15. Proceso de transmisión	36
16. Aleatorización para energía dispersa	36
17. Bloques del codificador FEC concatenado	37
18. Codificador convolucional de tasa binaria $\frac{1}{2}$	39

19. Estructura BTC y BTC simplificada.....	43
20. Mapas de constelación BPSK	46
21. Mapas gray para constelaciones QPSK y 16-QAM.....	47
22. Mapas gray para constelación 64-QAM	47
23. Mapa gray para constelación 256-QAM.....	48
24. Mapa pragmático para constelaciones 16-QAM y 64-QAM	48
25. Mapa pragmático para constelación 256-QAM	49
26. Procesamiento de BPSK ensanchado.....	50
27. Generador de secuencia PN	51
28. Ejemplo de un formato de paquete FDD	54
29. Ejemplo de formato de un paquete TDD	58
30. Estructura de tiempo de símbolo OFDM	59
31. Descripción de frecuencia OFDM	60
32. PRBS para aleatorización de datos	62
33. Aleatorizador OFDM-vector de inicialización downlink para burst 2...N.....	62
34. Aleatorizador OFDM-vector de inicialización uplink	63
35. Codificador convolucional de tasa $\frac{1}{2}$	65
36. Constelaciones BPSK, QPSK 16-QAM Y 64-QAM	69
37. PRBS para modulación de piloto	70
38. Estructura de preámbulo de entrada para downlink y red.....	72
39. Estructura de preámbulo para dato uplink	73
40. Ejemplo de una estructura de frame o FDM con TDD	75
41. Ejemplo de una estructura de frame o FDM con FDD	75
42. Estructura de frame mesh.....	76
43. Distribución de frecuencias en el área metropolitana de Guatemala	94

TABLAS

I.	Ejemplo estación base estándar vrs. funcionalidad completa	26
II.	Diseño de “perforación” y serialización para código convolucional	39
III.	Velocidades de códigos interno (TCM) y modulaciones soportadas	40
IV.	Requerimientos de llenado de bit para código de terminación interna	42
V.	Componente de códigos BTC	44
VI.	Polinomios Generadores de Códigos Hamming (n-1, k)	44
VII.	Modulaciones Soportadas	45
VIII.	Factores de normalización	50
IX.	Código convolucional interno con configuración de “perforación”	65
X.	Codificación de canal obligatoria por modulación	66
XI.	Tamaños de bloque del entrelazador de Bit	68
XII.	Codificaciones OFDM rate-ID	71
XIII.	Códigos de duración de frames OFDM (TF ms).....	78
XIV.	Códigos de contención OFDM	83
XV.	Canales de contención OFDM	83
XVI.	Canales de contención OFDM (continuación)	84
XVII.	Matriz financiera	100
XVIII.	Cálculo del valor actual neto	101
XIX.	Cálculo de la tasa interna de retorno	101
XX.	Cálculo del punto de equilibrio	102
XXI.	Cálculo relación costo/beneficio	103

LISTA DE ABREVIATURAS

AAS:	Sistemas de antenas adaptables
AES:	Encriptación avanzada de datos
ARPU:	Ingreso promedio por usuario
BPSK:	Transmisión por desplazamiento de fase binaria
BRD:	Servicio de radio de banda ancha
CAPEX:	Gastos de capital
CLEC:	Operadora de cambio local Competitiva
CPE:	Equipo de las instalaciones del cliente
CSMA/CA:	Acceso múltiple con detección de portadora y prevención de colisiones
DES:	Selección de frecuencia dinámica
DOCSIS:	Especificación de Interfaz de Datos sobre Servicios de Cable
DSL:	Línea de abonado digital
DSSS:	Espectro ensanchado por secuencia directa
FCC:	Federal Communications Commission
FBWA:	Acceso fijo inalámbrico de banda ancha
FLASH-OFMD:	Acceso rápido de baja latencia con OFMD de transferencia integra
FDD:	Duplexación de división de frecuencia
FDM:	Multiplexación por división de frecuencia
FHSS:	Espectro de dispersión con salto de frecuencia
FTTN:	Fibra al nodo
FTTP:	Fibra a las instalaciones
GPS:	Sistema de posicionamiento global
IEEE:	Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos

ILEC:	Operadora local de intercambio
ISP:	Proveedor de servicio de Internet
LOS:	Línea de vista (<i>line of sight</i>)
MAC:	Control de acceso a medios
MSO:	Operadora de servicios múltiples
NLOS:	Sin línea de vista (<i>non line of sight</i>)
OEM:	Fabricante de equipo original
OFDM:	Multiplexación por división de frecuencia ortogonal
OFDMA:	Acceso multiplexado por división de frecuencia ortogonal
OPEX:	Gastos operativos
PHY:	Capa física
PMP:	Punto a multipunto
PTP:	Punto a punto
POP:	Punto de presencia
QAM:	Modulación de amplitud de cuadratura
QoS:	Calidad de servicio
QPSK:	Transmisión por desplazamiento de fase de cuadratura
SME:	Pequeña y mediana empresa
SOHO:	Pequeña oficina, oficina en el hogar
TDD:	Duplexación por división de tiempo
VoIP:	Voz sobre IP
Wi-Fi:	Fidelidad inalámbrica
WiMAX:	Interoperabilidad mundial para acceso por microondas
WISP:	ISPs inalámbricos
WLAN:	Red inalámbrica local
WMAN:	Red inalámbrica de áreas metropolitanas
WWAN:	Redes inalámbricas de áreas extensas

GLOSARIO

Ancho de Banda	Capacidad de transmisión en unidades de datos por segundo de un canal físico de comunicaciones.
Backbone	Área de una red de transmisión dedicada a la conmutación de paquetes a alta velocidad.
Delay	Retraso en la transmisión de información punto a punto.
Ethernet	Es un estándar de facto de redes de computadoras de área local con acceso al medio por contienda CSMA/CD. El nombre viene del concepto físico de ether. Ethernet define las características de cableado y señalización de nivel físico y los formatos de tramas de datos del nivel de enlace de datos del modelo OSI.
FDD	Duplexación por división de frecuencia es para operación en bandas de frecuencia pares. El FDD provee dos bandas distintas de frecuencias por cada usuario. La banda delantera provee el tráfico desde la estación de base hacia el móvil y la banda reversa provee el tráfico desde el móvil hacia la base.
LAN	(<i>Local Area Network</i>) Red de Área Local o simplemente Red Local, es la interconexión de varios ordenadores y periféricos. Su extensión está limitada físicamente a un edificio o a un entorno de unos pocos kilómetros.
OFDM	La multiplexación por división de frecuencias ortogonales, en inglés <i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM)</i> , es

una modulación que consiste en enviar un conjunto de portadoras de diferentes frecuencias donde cada una transporta información la cual es modulada en QAM o en PSK .

PSK

La modulación por desplazamiento de fase o PSK (*Phase Shift Keying*) es una forma de modulación angular que consiste en hacer variar la fase de la portadora entre un número de valores discretos. La diferencia con la modulación de fase convencional (PM) es que mientras en ésta la variación de fase es continua, en función de la señal moduladora, en la PSK la señal moduladora es una señal digital y, por tanto, con un número de estados limitado.

QAM

La modulación de amplitud en cuadratura, en inglés *Quadrature Amplitude Modulation (QAM)*, es una modulación digital avanzada que transporta datos cambiando la amplitud de dos ondas portadoras. Estas portadoras tienen igual frecuencia pero están desfasadas 90° entre sí. Por lo que una señal modulada en QAM está compuesta por la suma lineal de dos señales previamente moduladas en DBL-PS (*Doble Banda Lateral - con Portadora Suprimida*) .

QoS

(*Quality of Service*) Calidad de servicio: técnicas usadas para garantizar que se transmitirá cierta cantidad de paquetes de datos en un tiempo dado, por ejemplo paquetes de voz o video.

TDD

Duplexación por división de tiempo es para operación en bandas de frecuencia impares. El TDD utiliza tiempo en vez de frecuencia para proveer tanto los enlaces delantero como hacia

atrás, provee dos ranuras de tiempo simplex en la misma frecuencia.

Wi-Fi

Sistema de envío de datos sobre redes computacionales que utiliza ondas de radio en lugar de cables. La norma IEEE 802.11 fue diseñada para sustituir el equivalente a las capas físicas y MAC de la norma 802.3 (*Ethernet*); en lo único que se diferencia una red Wi-Fi de una red Ethernet es en cómo se transmiten las tramas o paquetes de datos; el resto es idéntico. Por tanto, una red local inalámbrica 802.11 es completamente compatible con todos los servicios de las redes locales (*LAN*) de cable 802.3 (*Ethernet*).

WiMAX

(*Worldwide Interoperability for Microwave Access Interoperabilidad Mundial para Acceso por Microondas*), es una norma de transmisión por ondas de radio de última generación orientada a la última milla que permite la recepción de datos por microondas y retransmisión por ondas de radio (*protocolo 802.16 MAN - Metropolitan Area NetWork, Red de Área Metropolitana*).

RESUMEN

WiMAX son las siglas de '*Worldwide Interoperability for Microwave Access*', y es la marca que certifica que un producto está conforme con los estándares de acceso inalámbrico '*IEEE 802.16*'. Estos estándares permitirán conexiones de velocidades similares al ADSL o al cablemódem, sin cables, y hasta una distancia de 50-60 km. Este nuevo estándar será compatible con otros anteriores, como el de Wi-Fi (IEEE 802.11).

La tecnología WiMAX será la base de las Redes Metropolitanas de acceso a Internet, servirá de apoyo para facilitar las conexiones en zonas rurales, y se utilizará en el mundo empresarial para implementar las comunicaciones internas. Además, su popularización supondrá el despegue definitivo de otras tecnologías, como VoIP (llamadas de voz sobre el protocolo IP).

En este trabajo se describe el funcionamiento y estructura del protocolo 802.16 Wimax así como también un análisis Técnico y Económico para la Implementación del Sistema en la Red Metropolitana de Guatemala.

OBJETIVOS

- **General:**

Analizar técnica y económicamente la Implementación del Sistema WIMAX 802.16 en el Área Metropolitana de Guatemala.

- **Específicos:**

1. Análisis de las ventajas y desventajas que conllevaría para las empresas la introducción del Sistema WiMAX 802.16.
2. Dar a conocer al lector conocimientos básicos sobre el Sistema WiMAX 802.16 y sus aplicaciones en la Red Metropolitana de Guatemala.
3. Documentación de características, lineamientos y procedimientos necesarios para realizar la Implementación del Sistema WiMAX en el Área Metropolitana.
4. Comparación de Sistemas Inalámbricos implementados como Wi-Fi contra WiMAX.
5. Estudio técnico y económico de la Integración de WiMAX en un Sistema Metropolitano.

INTRODUCCIÓN

Varios operadores y proveedores de servicios pueden estar no familiarizados con los detalles del estándar IEEE 802.16, pero esta tecnología inalámbrica está revolucionando el acceso de banda ancha de la industria. El estándar 802.16, la “Interfase de Aire para sistemas de Acceso Fijos de Banda Ancha”, es también conocido como la interfase de Aire IEEE Wireless MAN. Esta tecnología está diseñada desde cero para proveer acceso inalámbrico de última milla en la red de Área Metropolitana (MAN), con un desempeño comparable al que actualmente ofrecen los servicios tradicionales de cable, DSL o T1. La principal ventaja de los sistemas basados en 802.16 es que poseen la habilidad de proveer servicio rápidamente, aún en áreas difíciles de alcanzar por infraestructuras cableadas; y la habilidad de superar las limitaciones físicas de las tradicionales redes de infraestructura. Proveer una conexión alámbrica de banda ancha a un área actualmente sin servicio mediante una conexión DSL o de cable puede ser un proceso altamente costoso y largo de implementar en términos de tiempo, con el resultado de que grandes áreas a través de la tierra no poseen acceso a conectividad de banda ancha. La tecnología inalámbrica 802.16 provee una manera flexible en cuanto a costo y efectividad de llenar los espacios vacíos en cobertura de banda ancha creando nuevas formas de brindar servicios de banda ancha sin los “vicios” conocidos del mundo alámbrico.

Usando la experiencia de cientos de ingenieros de la industria de las comunicaciones, el IEEE ha establecido una jerarquía de estándares inalámbricos complementarios. Esto incluye el IEEE 802.15 para Redes de Área Personal (PAN), IEEE 802.11 para Redes de Área Local (LAN), 802.16 para Redes de Área Metropolitana, y el propuesto IEEE 802.20 para Redes de Área Amplia (WAN).

Cada estándar mencionado representa una tecnología optimizada para un mercado y modelo de uso distinto y está diseñado para complementar los otros.

Un buen ejemplo es la proliferación de redes inalámbricas para hogares, oficinas y hot-spots comerciales, basados en el estándar 802.11. Esta proliferación de redes inalámbricas está conduciendo la demanda de conectividad de banda ancha a Internet, la cual puede ser provista por el 802.16 mediante un servicio de aire de largo alcance en términos relativos a la ubicación del proveedor del mismo.

Para operadores y proveedores de servicio, los sistemas construidos sobre el estándar 802.16 representan un “tercer caño” fácilmente desplegable capaz de ofrecer acceso de banda ancha de última milla flexible y accesible para millones de abonados de hogares y negocios.

1 EL ESTÁNDAR IEEE 802.16 PARA BANDA ANCHA INALÁMBRICA

1.1 Generalidades

En enero de 2003, el IEEE aprobó el estándar 802.16a, el cual cubre bandas de frecuencias entre 2 GHz y 11 GHz. Este estándar es una extensión del estándar IEEE 802.16 para 10-66 GHz publicado en abril de 2002. Este subrango de frecuencias en 11 GHz permite el desempeño de enlaces sin “línea de vista”, haciendo al IEEE 802.16a la tecnología apropiada para aplicaciones de última milla donde los obstáculos como árboles y edificios están siempre presentes y en donde las estaciones bases pueden necesitar ser montadas sin discreciones en los techos de viviendas o edificios en vez de en torres o montañas.

La configuración más común 802.16a consiste en una estación base montada en un edificio o torre que comunica en configuración punto-multipunto a abonados ubicados en oficinas u hogares. El 802.16a posee un rango de hasta 48 kms. con celdas típicas de 6.5 a 9.5 kms.

Dentro del radio de celda típico, el desempeño sin línea de vista y throughput son óptimos. En adición, el 802.16a provee una tecnología inalámbrica ideal para conectar WLANs 802.11 y hotspots comerciales con Internet. Con datos compartidos de hasta 75 Mbps, un “sector” simple de una estación base 802.16a – donde un sector es definido como un par simple de radios transmisor/receptor en la estación base – provee suficiente ancho de banda para soportar simultáneamente 60 puntos de negocio con conectividad nivel T1 y cientos de hogares con conectividad nivel DSL, usando canales de 20 Mhz de ancho de banda.

Para soportar un modelo de negocio rentable, los operadores y proveedores de servicio necesitan sostener una mezcla de abonados de alto nivel de ingresos y un alto volumen de abonados residenciales. El 802.16a ayuda a satisfacer este requerimiento mediante el soporte de niveles de servicio diferenciados, los cuales pueden incluir servicios de nivel T1 garantizados para negocios, o servicios DSL “*best effort*” para usuarios residenciales.

La especificación 802.16 también incluye funciones de seguridad robustas y la Calidad de Servicio (QoS) necesaria para soportar servicios que requieren baja latencia como video y voz.

El servicio de voz 802.16 puede ser el tradicional TDM o voz sobre IP (VoIP).

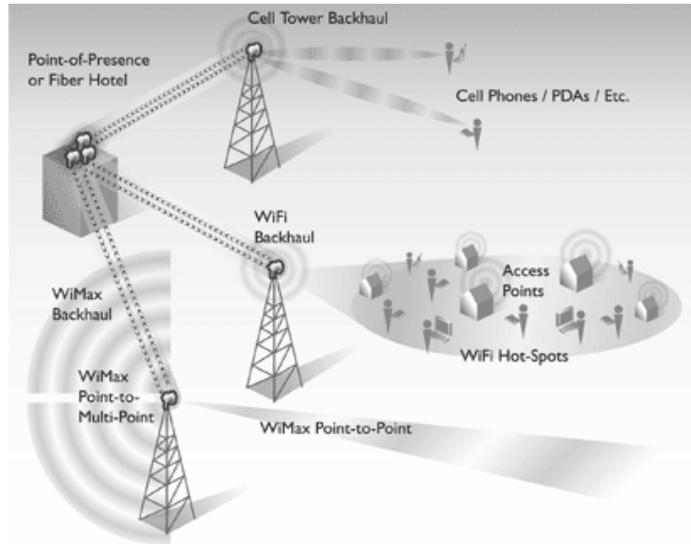
1.2 Aplicaciones

El estándar 802.16 ayudará a la industria a proveer soluciones a través de múltiples segmentos de banda ancha.

1.2.1 Enlaces celda-switch (*backhaul*) celular

Los proveedores del *backbone* de Internet deben alquilar líneas de interconexión a proveedores de tercera parte con medios que tienden a hacer estas interconexiones (*Backhaul*) medianamente confiables. El resultado es que un bajo porcentaje de las torres celulares son interconectadas de manera inalámbrica. Existen algunos países en donde es menos común para intercambios entre *carriers* locales alquilar sus líneas a terceras partes competitivas, los proveedores de servicios necesitan alternativas eficientes.

Figura 1. Wimax como backhaul.



El robusto ancho de banda de la tecnología 802.16a lo hace una excelente opción para la interconexión de empresas como hotspots y tanto como aplicaciones punto a punto.

1.2.2 Ancho de banda bajo demanda

Los accesos inalámbricos de banda ancha de última milla pueden ayudar a acelerar el despliegue de hotspots 802.11 y LANs inalámbricas de hogares/pequeñas empresas, especialmente en aquellas áreas no servidas por cable o DSL o en áreas donde la compañía de teléfonos local puede tener un largo tiempo para proveer el servicio de banda ancha. La conectividad de Internet es una misión crítica para muchos negocios, con la extensión de que estas organizaciones pueden actualmente requerir reubicarse en áreas donde el servicio esté disponible.

En los mercados actuales, es sabido que el intercambio entre *carriers* locales lleva varios meses para proveer una línea T1 al cliente, si el servicio no está disponible en el edificio. Los viejos edificios en áreas metropolitanas pueden presentar una maraña de cables que pueden dificultar el despliegue de conexiones de banda ancha a determinados clientes potenciales. La tecnología inalámbrica 802.16a permite proveer servicios con velocidades comparables a las soluciones cableadas en cuestión de días y con una reducción de costo significativa. Esta tecnología también posibilita al proveedor de servicios ofrecer instantáneamente conexiones configurables “on demand” en forma temporaria para diferentes eventos. La tecnología inalámbrica hace posible para el proveedor de servicios aumentar o reducir el nivel de servicio, literalmente en segundos bajo requerimiento del cliente. La conectividad “bajo demanda” también beneficia a los negocios, como la construcción de sitios que poseen requerimientos de conectividad esporádicos. Servicios Premium “bajo demanda” de última milla, significan una nueva oportunidad de ganancias para los operadores.

1.2.3 Banda ancha residencial

Limitaciones prácticas no permiten a las tecnologías de cable y DSL alcanzar numerosos clientes potenciales de banda ancha. Las conexiones tradicionales DSL pueden alcanzar sólo 5 kms. desde la oficina central de conmutación. Las redes de TV por cable también poseen estas limitaciones, careciendo las mas antiguas de vía de retorno, por lo cual proveer a estas del servicio de banda ancha puede ser muy costoso. El costo de tender redes de TV por cable es también prohibitivo para la extensión de los servicios de banda ancha alámbricos en áreas con baja densidad de abonados. La generación actual de sistemas inalámbricos propietarios es relativamente costoso para despliegues de masa porque, sin el estándar, pocas economías de escala son posibles. Este costo de ineficiencia va a cambiar con el lanzamiento de sistemas basados en el estándar 802.16.

Esto es debido a que en estas áreas la infraestructura cableada no existe o no ofrece la calidad para soportar voz confiable, dejando sólo el servicio de datos de alta velocidad. El término “Lazo Local Inalámbrico” (Wireless Local Loop) es a menudo usado para describir estas aplicaciones, dado que es utilizado como un sustituto para los tradicionales lazos locales de cobre para telefonía fija.

1.2.5 Servicios inalámbricos mejor conectados

Cuando los *hotspots* IEEE 802.11 proliferan, los usuarios desean naturalmente estar conectados en forma inalámbrica, aunque estén fuera del rango de cobertura del *hotspot* más cercano. La extensión de IEEE 802.16e a IEEE 802.11a introduce capacidades que permitirán a los usuarios conectarse a los WISP aún cuando estos se movilen fuera de sus hogares, o vayan a otras localidades que también tienen un WISP.

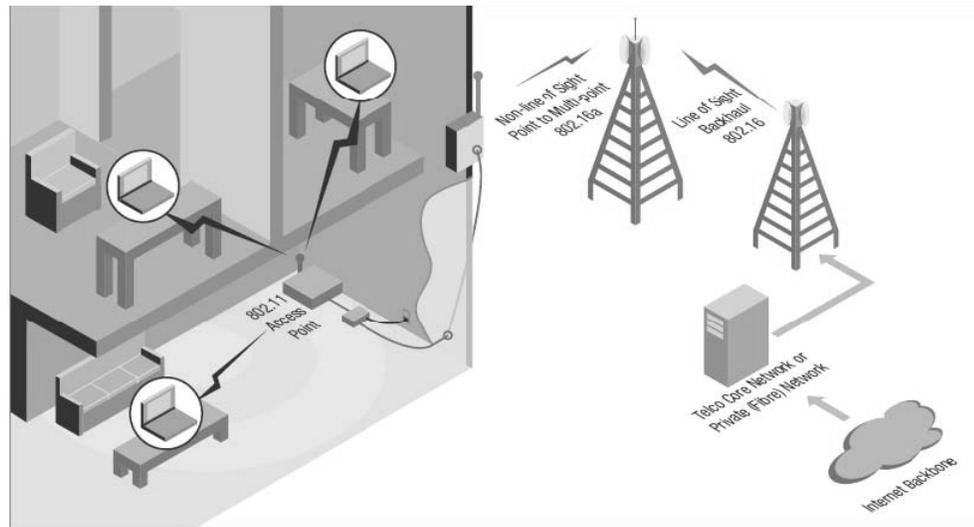
1.3 Principales características: tasa de transferencia, escalabilidad, QoS y seguridad.

1.3.1 Tasa de transferencia

Por medio de un robusto esquema de modulación, el IEEE 802.16 entrega una alta tasa de transferencia a altos rangos con un alto nivel de eficiencia espectral que es también tolerante a reflexiones de señal. La modulación dinámica adaptativa permite a la estación base negociar la tasa de transferencia por rangos. Por ejemplo, si la estación base no puede establecer un link robusto a un abonado distante usando el esquema de modulación de mayor orden, 64 QAM (Modulación por amplitud en cuadratura),

el orden de modulación se reduce a 16 QAM o QPSK, la cual reduce la tasa de transferencia e incrementa el rango efectivo.

Figura 3. El estándar IEEE 802.16 permite conexiones punto-multipunto fuera de la línea de vista y aplicaciones de enlaces en línea de vista.



1.3.2 Escalabilidad

Para acomodar un planeamiento de celda fácil en el espectro de ambas bandas licenciada y no licenciada-exenta en todo el mundo, el 802.16 soporta canales de ancho de banda flexibles. Por ejemplo, si un operador tiene asignado 20 MHz de espectro, este operador puede dividirlo en 2 sectores de 10 MHz cada uno, o 4 sectores de 5 MHz cada uno. Focalizando potencia en sectores de pequeños incrementos, el operador puede incrementar el número de usuarios manteniendo un buen rango y tasa de transferencia. Para escalar aun más la cobertura, el operador puede rehusar el mismo espectro en dos o más sectores creando aislaciones propias entre las antenas de estaciones base.

1.3.3 Cobertura

En adición al soporte de un esquema de modulación robusto y dinámico, el estándar IEEE 802.16 también soporta tecnologías que incrementan la cobertura, incluida la tecnología de malla (*mesh*) y las técnicas de “*antena inteligente*”. Mientras la tecnología de radio mejora y los costos bajan, la habilidad de incrementar la cobertura y la tasa de transferencia usando múltiples antenas para crear diversidad en transmisión y/o recepción aumentará sensiblemente la cobertura en escenarios extremos.

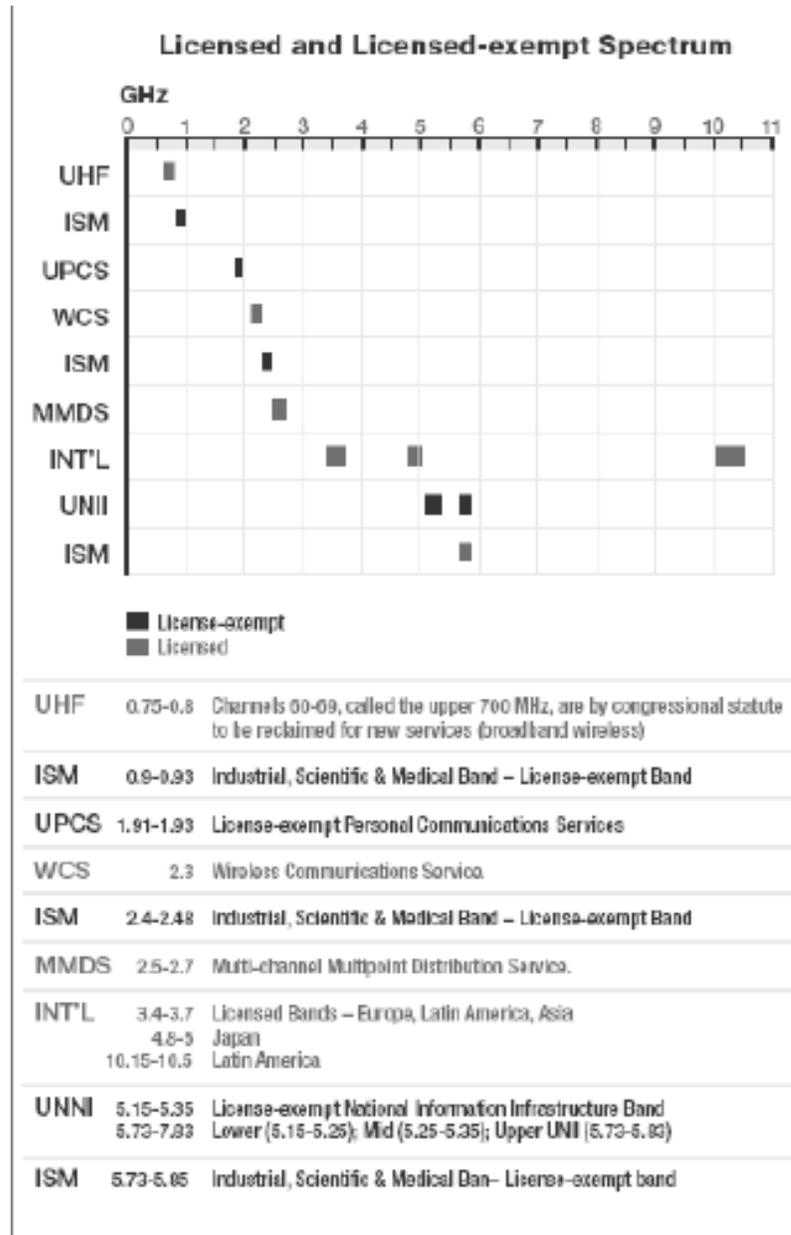
1.3.4 Calidad de servicio

La capacidad de voz es extremadamente importante, especialmente en mercados internacionales no cubiertos por servicio. Por esta razón el estándar IEEE 802.16a incluye características de calidad de servicio que permiten servicios incluyendo voz y video que requieren una red de baja latencia. Las características de “*garantía*” requeridas por el controlador de acceso al medio (MAC) del IEEE 802.16, permiten al operador brindar simultáneamente niveles de servicio Premium garantizados para negocios, tanto como niveles de servicio T1, y servicio de alto volumen “*best effort*” a hogares, similares a niveles de servicio de cable, todos dentro de la misma área de servicio perteneciente a una estación base.

1.3.5 Seguridad

Características de privacidad y encriptado están incluidas dentro del estándar 802.16, para soportar transmisiones seguras y proveer autenticación y encriptado de datos.

Figura 4. El estándar IEEE 802.16 está diseñado para el espectro de bandas licenciadas y no licenciadas-exentas para acomodar fácilmente el planeamiento de celdas a través del mundo.



2 PROPAGACIÓN Y TÉCNICAS DE MODULACIÓN PARA WIMAX.

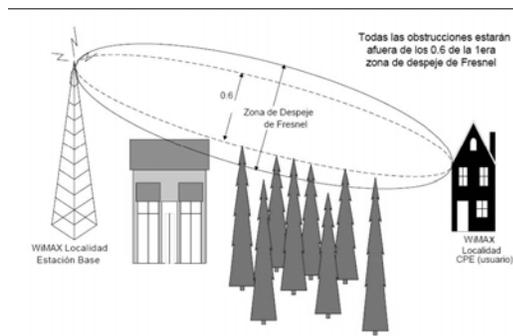
2.1 Introducción

Mientras varias tecnologías disponibles actualmente para enlaces inalámbricos fijos de banda ancha pueden solamente proveer cobertura para línea de vista (*LOS*), la tecnología WiMAX fue optimizada para proveer una excelente cobertura sin línea de vista (*NLOS*). Esta tecnología permite la mejor cobertura de larga distancia hasta los 50 kms. en condiciones LOS y celdas de radio típicas hasta los 8 kms. dentro de condiciones NLOS.

2.2 Propagación NLOS Vs. LOS

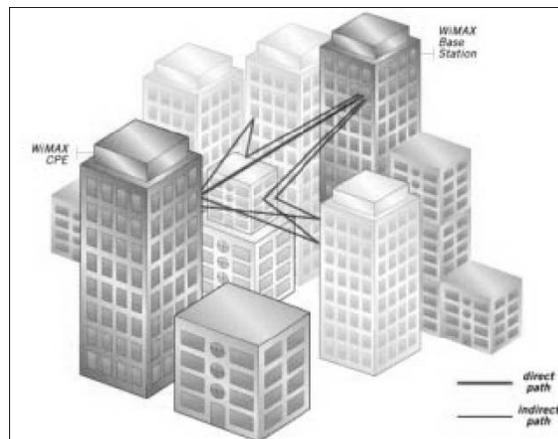
El canal de radio de un sistema de comunicaciones inalámbrico es descrito a menudo como “con línea de vista” (LOS) o “sin línea de vista” (NLOS). En un enlace LOS, la señal viaja a través de un camino directo y sin obstrucciones desde el transmisor hasta el receptor. Un link LOS requiere que la mayor parte de la primera zona de Fresnel esté libre de obstrucciones (ver Fig. 6). Si no se cumple este requerimiento existirá una reducción significativa de la intensidad de señal. La zona de despeje de Fresnel requerida depende de la frecuencia de operación y de la distancia entre transmisor y localidades receptoras.

Figura 5. Zona de Fresnel LOS



En un enlace NLOS, la señal alcanza al receptor por medio de reflexiones, difracciones y dispersiones. Las señales que alcanzan al receptor consisten en componentes del camino directo, caminos reflejados múltiples, energía de dispersión y caminos de propagación por difracción. Estas señales poseen distintos retardos, atenuaciones, polarizaciones y estabilidad relativos al camino directo.

Figura 6. Zona de Fresnel NLOS



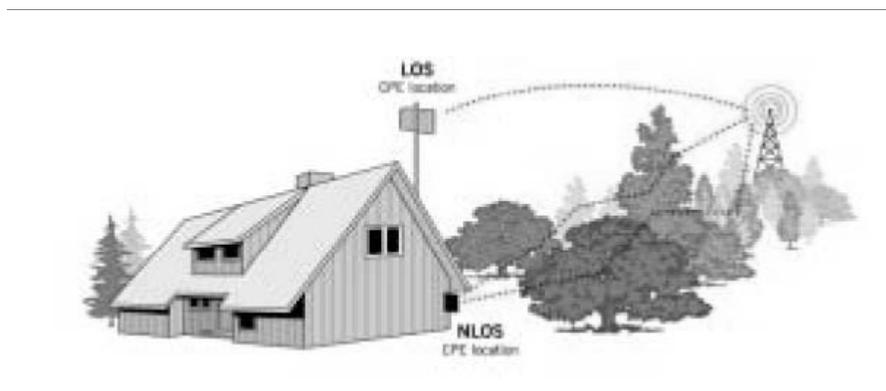
El fenómeno de caminos múltiples puede también causar el cambio de la polarización de la señal. De esta manera usar polarización para re-uso de frecuencias, como es realizado normalmente en los sistemas LOS, puede ser problemático para los sistemas NLOS. La manera en que los sistemas de radio usan estas señales de múltiples caminos como una ventaja, es la llave para proveer servicio en aplicaciones NLOS.

Un producto que meramente incrementa la potencia para penetrar obstrucciones (a veces llamado “*cercano a la línea de vista*”) no es una tecnología NLOS puesto que este enfoque todavía cuenta con un camino directo fuerte sin el uso directo de energía presente en señales indirectas. Ambas condiciones de cobertura, LOS y NLOS son gobernadas por las características de propagación del medio ambiente, la pérdida del camino y el presupuesto del enlace de radio.

Existen severas ventajas que hacen las aplicaciones NLOS muy deseables. Por ejemplo, proyectos muy estrictos y restricciones de altura de antenas que a menudo no permiten a la misma estar posicionada para LOS. Para despliegues celulares contiguos de gran escala, donde el re-uso de frecuencia es crítico, bajar la antena es ventajoso para disminuir la interferencia cocanal entre celdas adyacentes. Esto fuerza a menudo la operación de las radio bases en condiciones NLOS. Los sistemas LOS no pueden reducir la altura de antena porque haciéndolo puede impactar en la línea de vista directa del equipo de abonado (CPE) a la estación base.

La tecnología NLOS también reduce los gastos de instalación del equipamiento de abonado (CPE) haciendo la instalación “bajo del alero” una realidad y facilitando la adecuada ubicación de estos equipos. La tecnología también reduce la necesidad de un sitio de pre-instalación mejorando la precisión de las herramientas de planificación de NLOS.

Figura 7. Ubicación del equipo de abonado (CPE) para condición NLOS



La tecnología NLOS y las funciones ampliadas en WiMAX hacen posible el uso de equipo de abonado (CPE) en interiores. Esto posee dos desafíos principales; primariamente la superación de las pérdidas de penetración por edificio y secundariamente, la cobertura de distancias razonables con la mínima potencia de

transmisión y ganancia de antena que son usualmente asociadas a los equipos de interior de abonado. WiMAX hace esto posible y la cobertura NLOS puede ser además mejorada mediante la influencia de algunas de las capacidades opcionales de WiMAX.

2.3. Soluciones tecnológicas NLOS

La tecnología WiMax soluciona o mitiga los problemas resultantes de las condiciones NLOS usando:

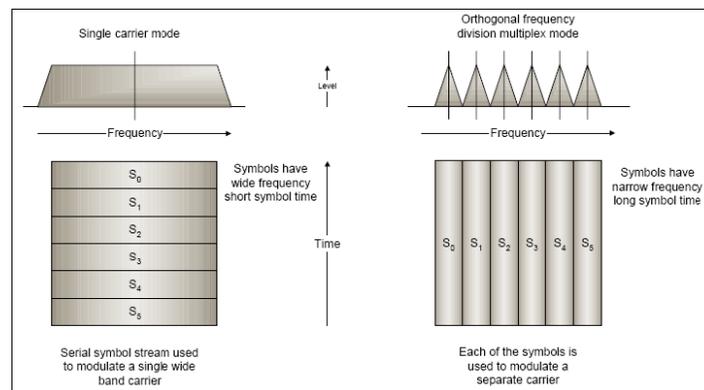
- Tecnología OFDM
- Sub-canalización
- Antenas direccionales
- Diversidad de transmisión/recepción
- Modulación adaptativa
- Control de potencia

2.3.1. Tecnología OFDM

La tecnología OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) provee de un medio eficiente para superar los desafíos de la propagación NLOS. La forma de onda WiMAX OFDM ofrece la ventaja de posibilitar la operación con un gran retardo de dispersión característico de los ambientes NLOS. Mediante la virtud de los símbolos de tiempo OFDM y el uso de los prefijos cíclicos, la onda OFDM elimina los problemas de la interferencia intersímbolo (ISI) y la complejidad de la ecualización adaptativa. Puesto que la señal OFDM está compuesta de múltiples portadoras ortogonales, el fading selectivo es localizado en sub-portadoras que son relativamente fáciles de ecualizar. Un ejemplo es mostrado en la figura 9 como una comparación entre una señal OFDM y una

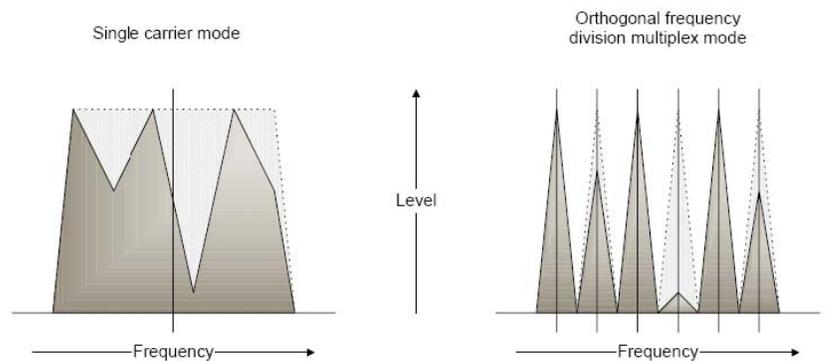
señal de portadora simple, con la información siendo enviada en paralelo por OFDM y en serie por la portadora simple.

Figura 8. OFDM Vs. Portadora simple. Datos serie convertidos en símbolos (cada símbolo puede representar 1 o más bit de datos)



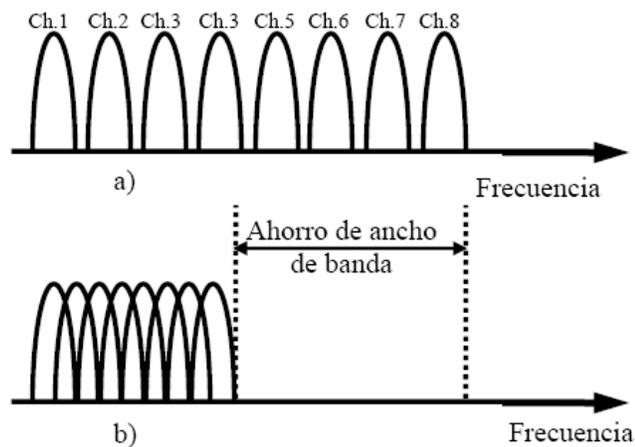
La habilidad de superar la dispersión de retardo, los multicaminos, y la ISI en una manera eficiente, permite tener mayores tasas de transferencias. Como ejemplo, es mucho más sencillo ecualizar las portadoras individuales de OFDM que ecualizar una señal de portadora simple más extensa.

Figura 9. Señales recibidas OFDM y portadora simple. El área de puntos representa el espectro transmitido. El área sólida es la entrada del receptor.



Se observa que la modulación pasa a ser OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*), en vez de la clásica y más fiable hasta entonces CCK (*Complimentary Code Keying*).

Figura 10. OFDM Orthogonal frequency division multiplexing
a) Técnica multiportadora original.
b) Modulación de portadoras ortogonales.



Durante los últimos años, se ha aceptado OFDM como tecnología de base para el 802.16a, que es un estándar de IEEE para redes de área metropolitana inalámbrica; y que puede proveer extensión inalámbrica para acceso de última milla de banda ancha en instalaciones de cable y DSL. El mismo cubre el rango de frecuencias de 2 a 11 GHz y alcanza hasta 50 kilómetros lineales, brindando conectividad de banda ancha inalámbrica sin necesidad de que exista una línea directa de visión a la estación de base. La velocidad de transmisión de datos puede llegar a 70 Mbps. Una estación de base típica puede albergar hasta seis sectores. La calidad de servicio está integrada dentro del MAC, permitiendo la diferenciación de los niveles de servicio.

El origen del OFDM está en las décadas de los 50 y 60 en aplicaciones de uso militar, y trabaja dividiendo el espectro disponible en múltiples subportadoras. La transmisión sin línea de visión ocurre cuando entre el receptor y el transmisor existen reflexiones o absorciones de la señal, lo que resulta en una degradación de la señal recibida, que se manifiesta por medio de los siguientes efectos: atenuación plana, atenuación selectiva en frecuencia o interferencia inter-símbolo.

Estos efectos se mantienen bajo control con el W-OFDM, que es una tecnología propietaria de WILAN, quién recibió en 1994 la patente 5.282.222 para comunicaciones inalámbricas de dos vías y banda ancha OFDM (WOFDM). Esta patente es la base para los estándares 802.11a, 802.11g, 802.11a R/A, 802.16a, estándares para HiperMAN.

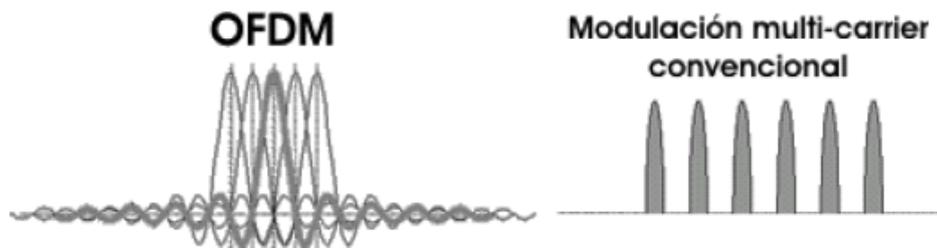
Los sistemas W-OFDM incorporan además: estimación de canal, prefijos cíclicos y códigos Reed-Solomon de corrección de errores. Wi-LAN introdujo su línea de productos BWS 3000 basada en W-OFDM en octubre del 2001. Actualmente ya ha introducido al mercado la tercera generación de equipos OFDM siendo el único proveedor mundial con una sólida experiencia en esta tecnología probada a través de la excelencia de sus productos.

Las tecnologías 802.11a y 802.11b definen una capa física diferente. Los emisores 802.11b transmiten a 2.4 GHz y envían datos a tasas tan altas como 11 Mbps usando modulación DSSS; mientras que los emisores 802.11a y 802.11g transmiten a 5 y 2,4 GHz respectivamente y envían datos a tasas de hasta 54 Mbps usando OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing o en español Multiplexación de División de Frecuencia Ortogonal). OFDM es una tecnología de modulación digital, una forma especial de modulación multi-portadora (multi-carrier) considerada la piedra angular de la próxima generación de productos y servicios de radio frecuencia de alta velocidad, para uso tanto personal como corporativo. La técnica de espectro disperso de OFDM distribuye los datos en un gran número de portadoras (carriers) que están espaciados

entre sí en distintas frecuencias precisas. Ese espaciado evita que los demoduladores vean frecuencias distintas a las suyas propias.

OFDM tiene una alta eficiencia de espectro y menor distorsión multi-ruta. Actualmente OFDM no sólo se usa en las redes inalámbricas LAN 802.11a y 802.11g, si no también, en comunicaciones de alta velocidad por vía telefónica como las ADSL y en difusión de señales de televisión digital terrestre en Europa, Japón y Australia.

Figura 11. Espectro de OFDM solapado



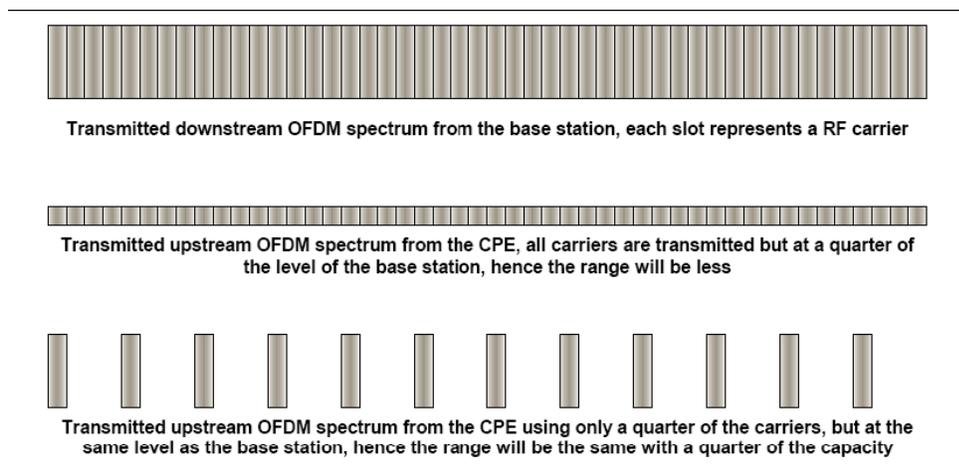
Por todas estas razones, los estándares internacionales recientes como aquellos fijados por el IEEE 802.16, ETSI BRAN y ETRI, han establecido el OFDM como tecnología de elección preferida.

2.3.2. Subcanalización

La subcanalización en el enlace ascendente es una opción dentro de WiMAX. Sin la subcanalización, las restricciones regulatorias y la necesidad de costo efectivo en el equipo de abonado, típicamente causan que el presupuesto de enlace sea asimétrico, causando que el rango del sistema sea limitado en el enlace de subida. La subcanalización permite que el presupuesto de enlace sea balanceado tal que las ganancias del sistema de enlace ascendente y descendente sean similares.

La sub-canalización concentra la potencia transmitida en algunas portadoras OFDM, incrementando la ganancia del sistema, pudiendo esto ser usado tanto para extender el alcance del mismo, superar las pérdidas de penetración de construcciones y/o reducir el consumo de potencia del equipo de abonado. El uso de sub-canalización está más expandido en el acceso OFDM (OFDMA) para permitir un uso más flexible de los recursos que puedan soportar la operación móvil.

Figura 12. Efecto de la sub-canalización



2.3.3. Antenas para aplicaciones inalámbricas fijas

Las antenas direccionales incrementan el margen de *fade* mediante la adición de mayor ganancia. Esto incrementa la disponibilidad del enlace, demostrado en comparaciones del factor K para antenas omnidireccionales Vs. direccionales. La dispersión de retardo es reducida en antenas direccionales en las estaciones base y equipos de abonados. El patrón de antena suprime cualquier señal multi-trayecto que arriba en los lóbulos laterales. La efectividad de estos métodos fue probada y demostrada en despliegues exitosos, en los cuales el servicio operaba bajo un fading NLOS significativo.

Los sistemas de antenas adaptativas (AAS) son una parte opcional del estándar 802.16. Estas tienen la propiedad de dirigir su foco a una particular dirección o direcciones. Esto significa que durante la transmisión, la señal puede ser limitada a la dirección requerida del receptor, como un reflector. Recíprocamente durante la recepción, el ASS puede ser hecho para enfocar solamente en la dirección desde la cual viene la señal deseada. También poseen la propiedad de supresión de interferencia co-canal de otras localidades. Los sistemas de antena adaptativas son consideradas para un desarrollo futuro que podrá, eventualmente, mejorar el re-uso del espectro y la capacidad de la red WiMAX.

2.3.4. Diversidad de transmisión/recepción

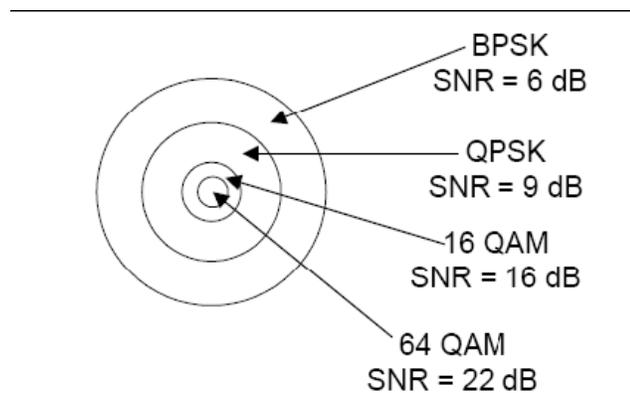
Las antenas de diversidad son usadas para tomar ventaja de las señales multi-trayecto y reflexiones que ocurren en condiciones NLOS. La diversidad es opcional en WiMAX. El algoritmo de diversidad ofrecido por WiMAX en el transmisor y receptor incrementa la habilidad del sistema. La opción de diversidad en WiMAX Tx utiliza codificación de tiempo espacial para proporcionar independencia de la fuente de transmisión, esto reduce el requerimiento de margen de *fade* y combate la interferencia.

Para diversidad en recepción, existen varias técnicas de combinación para mejorar la disponibilidad del sistema. Por ejemplo, la combinación de relación máxima (MRC) toma ventaja de dos cadenas de recepción separadas para ayudar a superar el fading y reducir las pérdidas de trayecto. La diversidad ha demostrado ser una herramienta efectiva para la propagación NLOS.

2.3.5. Modulación adaptativa

La modulación adaptativa permite al sistema WiMAX ajustar el sistema de modulación dependiendo de la condición de relación señal/ruido (SNR) del enlace de radio. Cuando el enlace de radio tiene alta calidad, es usado el esquema de modulación más alto, dando al sistema mayor capacidad. Durante *fade* de señal, el sistema WiMAX puede cambiarse a un esquema de modulación menor para mantener la calidad de conexión y estabilidad del enlace. Esta característica permite al sistema superar el fading de tiempo selectivo. La característica clave de la modulación adaptativa es que esta incrementa el rango sobre el cual puede ser usado un esquema de modulación superior, como situación opuesta a tener un esquema fijo diseñado para la condición de peor caso.

Figura 13. Radio de celda relativo para modulación adaptativa



2.3.6. Técnicas de corrección de error

Las técnicas de corrección de error fueron introducidas dentro del WiMAX, para reducir los requerimientos de relación señal-ruido del sistema. Una codificación fuerte FEC Reed Solomon, codificación convolucional y algoritmos de *interleaving* son usados para detectar y corregir errores con el objeto de mejorar la tasa de transferencia.

Estas técnicas robustas de corrección de error ayudan a recuperar paquetes errados que pueden haber sido perdidos debido al *fading* selectivo en frecuencia o errores de ráfaga. El requerimiento de repetición automática (ARQ) es usado para corregir errores que no pueden ser corregidos mediante FEC, teniendo la información errónea recibida. Esto mejora significativamente el BER.

2.3.7. Control de potencia

Los algoritmos de control de potencia son usados para mejorar el rendimiento global del sistema. Se encuentra implementado por la estación base enviando información de control de potencia a cada estación de abonado para regular el nivel de potencia transmitido, de esta manera el nivel recibido en la estación base está a un nivel predeterminado. En un ambiente dinámico de fading cambiante, este nivel predeterminado significa que el equipo de abonado sólo transmite suficiente potencia para cumplir este requerimiento. El opuesto puede ser que el nivel de transmisión del equipo de abonado está basado en las condiciones de peor caso. El control de potencia reduce el consumo de potencia global y la interferencia potencial con las otras estaciones bases adyacentes. Para LOS la potencia de transmisión del equipo de abonado es aproximadamente proporcional a la distancia desde la estación base, para NLOS es también muy duramente dependiente del despeje y las obstrucciones.

2.3.8. Modelos de propagación NLOS

En una condición de canal NLOS, la señal puede sufrir difracción, cambios de polarización y deterioro por reflexión. Estos factores afectan la intensidad de la señal recibida y los deterioros no están normalmente presentes cuando el transmisor y receptor poseen la condición LOS.

A través de los años fueron desarrollados varios modelos los cuales intentan caracterizar este entorno de RF y permitir predicción de las intensidades de RF. Estos modelos basados en mediciones empíricas son usados para predecir coberturas de gran escala para sistemas de radiocomunicaciones en aplicaciones celulares.

Estos modelos proveen estimaciones de pérdida de trayecto considerando distancia entre Tx y Rx, factor de terreno, alturas de antenas receptor y transmisor y frecuencias de celular. Desafortunadamente ninguno de estos enfoques direcciona las necesidades de los enlaces fijos de banda ancha de manera adecuada. AT&T Wireless recolectó extensos datos de campo de diferentes áreas de USA para fijar más precisamente el entorno fijo inalámbrico. El modelo de AT&T Wireless desarrollado desde los datos ha sido validado en contraste con sistemas inalámbricos fijos que han arrojado resultados comparables. Este modelo es la base de un modelo industrial aceptado y es usado por los cuerpos de estudio como el IEEE 802.16. La adopción del modelo de AT&T Wireless está referenciado como IEEE 802.16.3c-01/29r4, “Channel Models for Fixed Wireless Applications by Erceg et al.”, y puede ser encontrado en la página del IEEE ó en el vínculo http://wirelessman.org/tg3/contrib/802163c-01_29r4.pdf.

El modelo de pérdida de trayecto de AT&T Wireless incluye parámetros para altura de antenas, frecuencias portadoras y tipos de terreno.

2.3.9. Modelos SUI (Stanford University Interim)

Los modelos SUI son una extensión del trabajo primitivo realizado por AT&T wireless y Erceg et al.

Usa tres tipos básicos de terreno:

- Categoría A - Densidad de árboles moderada a fuerte.
- Categoría B - Densidad de árboles baja o densidad de árboles moderada/fuerte.
- Categoría C - Densidad de árboles baja/plana.

Estas categorías de terrenos proveen un método simple para estimar más precisamente la pérdida de trayecto de los canales de RF en situación NLOS. Siendo estadístico por naturaleza, este modelo es capaz de representar el rango de pérdidas de trayecto experimentado dentro de un enlace de RF real. Los modelos de canal de SUI fueron seleccionados para el diseño, desarrollo y ensayo de la tecnología WiMAX en seis escenarios diferentes, (SUI-1 a SUI-6). Usando estos modelos de canal, es posible entonces predecir de manera más precisa, las probabilidades de cobertura que pueden ser logradas dentro de un sector correspondiente a una radio base. La probabilidad de cobertura estimada puede ser usada además para planificación. Por ejemplo, puede ser usada para determinar el número de estaciones base necesarias para proveer servicio a una determinada extensión geográfica. Estos modelos no reemplazan la planificación detallada de sitio, pero pueden proveer una estimación antes del comienzo del proyecto real.

2.3.10. Probabilidad de predicción de cobertura

En condiciones LOS, el rango de cobertura es dependiente de la obtención del radio de línea de vista mediante el aseguramiento de la zona de despeje de Fresnel. En condiciones de NLOS existe el concepto de “disponibilidad de cobertura”, el cual expresado como porcentaje, representa la probabilidad estadística de clientes potenciales bajo una pisada predictiva. Por ejemplo una probabilidad del 90% de cobertura, significa que el 90% de los clientes potenciales bajo un área de cobertura predictiva tendrán

suficiente calidad de señal para una instalación satisfactoria. La estandarización de los enlaces de aire WiMAX permitirá a los vendedores de herramientas de planificación desarrollar aplicaciones específicas para predicciones NLOS. En otras palabras, si existen 100 clientes potenciales mostrados en un mapa de cobertura predictiva NLOS, 90 de estos pueden ser instalados aunque existan obstrucciones entre la estación base y el equipo de abonado. El planeamiento de RF y la predicción de cobertura requieren estar fuertemente integrados con la tecnología NLOS para permitir conocimiento previo exacto de cuales clientes pueden ser instalados.

2.3.11. Rango de cobertura WiMAX

Esta sección describe dos probables tipos de estaciones base y sus capacidades:

Estación base estándar con:

- Implementación WiMAX básica (sólo capacidades obligatorias)
- Potencia de salida RF estándar para estación base de bajo costo (específica fabricante)

Estación base con funcionalidad completa con:

- Potencia de salida RF superior a la estación base estándar (específica fabricante)
- Combinación de diversidad Tx/Rx con codificación espacio-tiempo y recepción MRC
- Sub-Canalización
- ARQ

Ambas estaciones base pueden ser WiMAX compatibles, sin embargo el rendimiento que puede ser logrado por cada uno es totalmente diferente. La tabla I

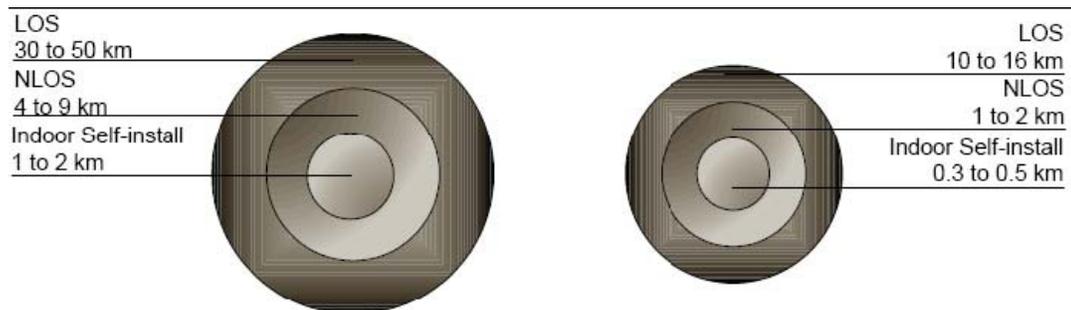
asume que un sub-canal simple es usado para extender el límite de la celda lo más lejos posible.

Tabla I Ejemplo estación base estándar vrs. funcionalidad completa

Assumptions	Frequency: 3.5 GHz Bandwidth: 3.5 MHz Per 60° sector	Full featured		Standard	
		From	To	From	To
Cell radius (km)	LOS	30	50	10	16
	NLOS(Erceg-Flat)	4	9	1	2
	Indoor self-install CPE	1	2	0.3	0.5
Maximum throughput per sector (Mbps)	Downlink	11.3	8	11.3	8
	Uplink	11.3	8	11.3	8
Maximum throughput per CPE at cell edge (Mbps)	Downlink	11.3	2.8	11.3	2.8
	Uplink	0.7	0.175*	11.3	2.8
Maximum number of subscribers		More		Less	

Acorde a lo mostrado el rendimiento alcanzable con el equipo de abonado de interior auto instalable de funcionalidad completa tiene un incremento de 10 veces en área de cobertura sobre el estándar. La figura 14 da una representación diagramática de las implicaciones LOS y NLOS de los dos diferentes tipos de estaciones base.

Figura 14. Radio de celda para funcionalidad completa vrs. estándar



3. CAPAS DEL IEEE 802.16

3.1 Especificación MAC

Una red que utiliza un medio compartido debe proveer un mecanismo eficiente de compartir. Las topologías PMP (Punto-Multipunto) y Mesh (Malla) de las redes inalámbricas son ejemplos de medios inalámbricos compartidos. Aquí el medio es el espacio, a través del cual se propaga una onda de radio.

Aunque la especificación MAC invoca los protocolos IP, ellos son requeridos solamente como base del estándar para manejo de elementos en lugar de operación MAC.

3.1.1 Topología punto-multipunto

El downlink desde la estación base (BS de ahora en mas) al usuario opera en la base PMP (punto-multipunto). El link inalámbrico IEEE 802.16 opera con BS central y una antena sectorizada, la cual es capaz de manejar múltiples sectores independientes simultáneamente.

Dentro de un canal de frecuencia dada y un sector de antena, todas las estaciones reciben la misma transmisión o parte de la misma. La BS es el único transmisor funcionando en esta dirección, de manera que transmite sin necesidad de coordinar con otras estaciones, excepto por la duplexión por división de tiempo que puede dividir en periodos de transmisión de *uplink* y *downlink*. El *downlink* es generalmente *broadcast*.

Las estaciones de abonado (SS de ahora en mas) comparten el uplink hacia la BS bajo demanda. Dependiendo de la clase de servicio utilizada, la SS puede mantener los derechos de transmisión o el mismo puede ser garantizado por la BS luego de recibir el pedido por parte del usuario.

Dentro de cada sector, los usuarios adhieren a un protocolo de transmisión que controla la contención entre usuarios y faculta al servicio a ser acomodado a los requerimientos de ancho de banda y retardo de cada aplicación de usuario. Esto está implementado usando garantías de ancho de banda no solicitados, interrogación y procedimientos de contención. Estos procedimientos son definidos en los protocolos para posibilitar a los proveedores optimizar el desempeño del sistema usando diferentes combinaciones de técnicas de asignación de ancho de banda mientras se mantienen definiciones de interoperabilidad consistentes. Por ejemplo, la contención puede ser usada para evitar la interrogación individual de estaciones abonado que han estado inactivas por un largo período de tiempo.

El uso de la interrogación simplifica la operación de acceso y garantiza que aplicaciones reciban servicio de manera determinística, si es requerido. En general las aplicaciones de datos son tolerantes al retardo, pero las de tiempo real como video y voz requieren servicio de manera uniforme y a veces en un esquema muy rígido.

El MAC es orientado a conexión. Para el propósito de mapeo de servicios en SS's y QoS variables de asociación, todas las comunicaciones de datos están en el contexto de conexión. El flujo de servicio puede ser provisionado cuando una SS es instalada en el sistema.

Rápidamente luego del registro de la SS, las conexiones son asociadas con este flujo de servicio (una conexión por flujo de servicio) para proveer una referencia contra quien requiere el ancho de banda. Adicionalmente, pueden ser establecidas conexiones nuevas cuando un servicio de cliente necesite cambios. Una conexión define el mapeo entre el proceso de convergencia que utiliza el MAC y el flujo de servicio. El flujo de servicio define los parámetros de QoS que son intercambiados en la conexión.

El concepto de flujo de servicio en una conexión es central en la operación del protocolo MAC. El flujo de servicio provee un mecanismo para el manejo de QoS del *uplink* y *downlink*. Una SS requiere ancho de banda *uplink* en la conexión. El ancho de banda es garantizado por la BS a la SS como un agregado de garantías en respuesta a requerimientos de conexión de SS.

Una vez establecidas las conexiones, puede ser requerido mantenimiento activo. Los requerimientos de mantenimiento varían dependiendo del tipo de servicio conectado. Por ejemplo, un servicio T1 no canalizado, virtualmente no requiere servicio de mantenimiento dado que posee ancho de banda constante por cada *frame*. Los servicios T1 canalizados requieren algún mantenimiento debido al requerimiento dinámico (pero relativamente de variación lenta) de ancho de banda, acoplado con el requerimiento de ancho de banda total disponible bajo demanda. Los servicios IP pueden requerir una cantidad sustancial de mantenimiento prolongado debido a su naturaleza '*bursty*' y debido a la alta posibilidad de fragmentación.

Finalmente, las conexiones pueden ser terminadas. Esto ocurre generalmente cuando un contrato de servicio a un usuario cambia. La terminación de la conexión es estimulada por la BS o la SS.

Estas tres funciones de manejo de conexiones son soportadas a través del uso de configuraciones estáticas y adiciones dinámicas, modificaciones y borrado de conexiones.

3.1.2 Topología Mesh (Malla)

La diferencia principal entre los modos Mesh y PMP radica en que en el modo PMP el tráfico sólo ocurre entre la BS y SS, mientras que en el modo Mesh el tráfico puede ser ruteado a través de SSs y puede ocurrir directamente entre SSs. Dependiente del algoritmo del protocolo de transmisión, esto puede ser realizado con base a uniformidad usando programación distribuida o con base a superioridad de la malla BS, la cual efectivamente resulta en programación centralizada o una combinación de ambas.

Dentro de una red Mesh, un sistema que posee conexión directa a los servicios de *backhaul* afuera de la red Mesh es denominado un Mesh BS. Todos los otros sistemas de la red Mesh son denominados Mesh SS. En general, los sistemas de la red Mesh son denominados nodos.

Dentro de un contexto Mesh, el *uplink* y *downlink* son definidos como tráfico en la dirección de la Mesh BS y fuera de tráfico desde la Mesh BS respectivamente. Los otros 3 términos importantes en un sistema Mesh son vecino, vecindario y vecindario extendido. Las estaciones con las que el nodo tiene vínculo directo son llamadas vecinas. Los vecinos de un nodo deben formar un vecindario. Un vecino de nodo es considerado estar a un hop o salto del nodo. Un vecindario extendido contiene, adicionalmente todos los vecinos de un vecindario.

En un sistema Mesh no sólo la Mesh BS puede transmitir sin tener que coordinar con los otros nodos. Usando programación distribuida, todos los nodos incluido la BS Mesh debería coordinar sus transmisiones en su vecindario a 2 saltos y podría difundir sus programaciones (recursos disponibles, requerimientos y garantías) a todos sus vecinos. Opcionalmente, la programación puede ser establecida por requerimiento directo no coordinado y garantías entre dos nodos. Los nodos deberían lograr que las transmisiones resultantes no causen colisiones con la programación de datos y control de tráfico por ningún otro nodo en el vecindario a dos saltos. No hay diferencia en el mecanismo usado en determinar la programación para el *downlink* y *uplink*.

Usando programación centralizada, los recursos son garantizados de una manera mas centralizada. La Mesh BS debe coleccionar los requerimientos de recursos desde todos los Mesh SS dentro de cierto rango de salto. Debe determinar la cantidad de recursos garantizados para cada enlace en la red en el *downlink* y *uplink*, comunican estas garantías a todas las SS MESH dentro del rango de salto. Los mensajes de garantía no contienen la programación actual pero cada nodo debe computarlo usando el algoritmo predeterminado dentro de un rango de parámetros dados.

Todas las comunicaciones están en el contexto de enlace, el cual es establecido entre dos nodos. Un enlace debe ser usado por todas las transmisiones de datos entre dos nodos. El QoS es aprovisionado a través de los enlaces por los mensajes. Los parámetros del QoS o no servicio son asociados con enlace pero cada mensaje *unicast* tiene parámetros de servicio en el encabezado. La clasificación de tráfico y regulación de flujo son implementados al ingreso de nodo por clasificación de capa alta/regulación de protocolo. Los parámetros de servicios asociados para cada mensaje deben ser comunicados juntos con el contexto de mensaje vía la MAC.

Los sistemas Mesh son típicamente omnidireccionales o para antenas dirigidas de 360°.

3.2 Especificación PHY

La especificación PHY WiMAX está compuesta por 3 secciones a saber:

I. WirelessMAN-SC PHY

II. WirelessMAN-SCa

III. WirelessMAN-OFDM

Cada sección es una variante del estándar según las técnicas de modulación y banda de Frecuencias para las cuales se ha desarrollado el mismo.

3.2.1 WirelessMAN-SC PHY

Esta especificación PHY destinada para operación en la banda de frecuencia de 10-66 GHZ, está diseñada con un alto grado de flexibilidad de manera de permitir a los proveedores de servicio la habilidad de optimizar los sistemas con respecto al planeamiento celular, costo, capacidades de radio, servicios y capacidad. De manera de permitir el uso flexible del espectro, son soportadas las configuraciones TDD y FDD.

Ambos casos usan el formato de transmisión *burst* cuyos mecanismos de *framing* soportan *burst* adaptativos en el cual los parámetros de transmisión, incluyendo los esquemas de modulación y codificación, pueden ser ajustados individualmente para cada SS en la base de trama por trama. El caso FDD soporta SSs full-duplex y también SSs half-duplex, las cuales no transmiten y reciben simultáneamente.

El PHY *uplink* está basado en una combinación de TDMA y DAMA; en particular el canal de *uplink* está dividido en un número de time slots asignados para usuarios (registración, contención o tráfico de usuario) controlado por el MAC en el BS y puede variar a través del tiempo para óptimo desempeño. El canal *downlink* es TDM con la información para cada SS multiplexada en un solo arreglo de datos y recibida por todas las SSs dentro de un mismo sector. Para soportar half-duplex FDD en las SSs, la provisión también es realizada por una porción TDMA en el *downlink*.

El PHY *downlink* incluye un *sublayer* de convergencia de transmisión que inserta un byte de puntero en la carga para ayudar al receptor a identificar el comienzo de la MAC PDU. Los bytes de datos provenientes del *sublayer* de convergencia de transmisión son aleatorizados, codificados con FEC y mapeados a QPSK, 16-QAM o constelación de señal 64-QAM (opcional).

El PHY *uplink* está basado en la transmisión *burst* TDMA. Cada *burst* está diseñado para transportar PDUs MAC de longitud variable. El transmisor aleatoriza los datos entrantes, los codifica en FEC, y mapea los bits codificados a QPSK, 16-QAM (opcional).

3.2.2 WirelessMAN-SCa PHY

El PHY WirelessMAN-SCa está basado en una tecnología de portadora simple y diseñado para operación NLOS en bandas de frecuencias por debajo de 11 GHz. Para bandas licenciadas los anchos de banda de canal permitidos deben ser limitados por el ancho de banda regulado dividido por cualquier potencia de dos no menor que 1.25 MHz.

Los elementos dentro del PHY incluyen:

- Definiciones TDD y FDD, una de las cuales debe ser soportada.
- Uplink TDMA.
- Downlink TD o TDMA.
- Modulación adaptativa por bloque y codificación FEC para uplink y downlink.
- Estructura de *framing* que mejora la ecualización y el rendimiento de estimación de canal a través de NLOS y ambientes de ensanchamiento de retardos extendidos.
- Granularidad en unidades PS en tamaño de burst.
- FEC concatenado usando codificación Reed-Solomon y TCM con interleaving Opcional.
- Opciones adicionales BTC y CTC FEC.
- Opción No-FEC usando control de error ARQ.
- Opción de transmisión con diversidad STC (*space time coding*).
- Modos robustos para operación de baja CINR.
- Seteo de parámetros de mensajes MAC/PHY que facilitan la implementación opcional AAS.

Dentro de la discusión del WirelessMAN-SCA PHY son usados cinco términos para la organización de transmisiones (payload, burst set, burst frame, MAC frame).

El *payload* se refiere al contenido de unidades individuales de transmisión que son interés de alguna entidad en el receptor.

El *burst* contiene datos del *payload* y está formado acorde a las reglas especificadas por el perfil burst asociado con el burst. La existencia del burst es bien conocida por el receptor a través del contenido de los mapas de uplink o downlink.

Para el *uplink* es una unidad completa de transmisión que incluye el preámbulo del encabezado, la carga codificada y la secuencia de terminación.

El *burst set* es una entidad de transmisión autoconcatenada consistente de un preámbulo, uno o más burst concatenados y una secuencia de terminación. Para el uplink el burst set es sinónimo de burst. El burst frame contiene toda la información incluida en una transmisión simple. Consiste de uno o más burst set.

Un *frame MAC* se refiere a los intervalos de ancho de banda fijo reservados para el intercambio de datos. Para TDD, un frame MAC consiste de un subframe para el uplink y otro para el downlink, delimitados por el TTG. Para FDD el frame MAC corresponde a la máxima longitud de subframe de downlink. Los subframes del uplink FDD operan concurrentemente con los subframe del uplink pero en canales de frecuencias separadas. Cada subframe de uplink y downlink poseen un burst frame.

3.2.2.1 Proceso de transmisión

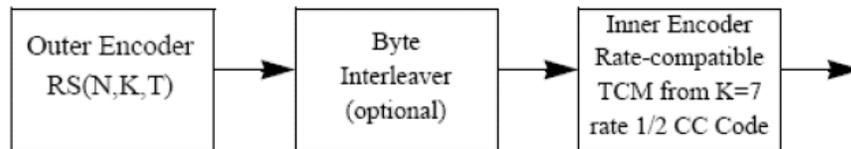
La figura 16 ilustra los pasos involucrados en el proceso de transmisión. Los datos fuentes deben ser primero aleatorizados, luego codificados con FEC y mapeados a símbolos QAM. Los símbolos QAM deben ser encuadrados dentro de un burst set, el cual típicamente introduce símbolos adicionales de encuadre. Los símbolos dentro de un burst set pueden ser multiplexados en un *frame duplex*, el cual puede contener múltiples burst. Las componentes de símbolos IQ deben ser inyectados dentro de filtros de pulso de onda, modulación de cuadratura hasta la frecuencia portadora, y amplificados con control de potencia para que la potencia de salida adecuada sea transmitida. Excepto donde sea indicado el proceso de transmisión es el mismo para uplink y downlink.

Sólo los bits fuente son aleatorizados. Esto incluye las cargas fuentes, los cero bits que pueden ser usados para llenar segmentos vacíos de la carga. Los elementos que no son parte de los datos fuente, como los elementos de fuente y símbolo piloto no deben ser aleatorizados. Los cero bits usados para completar los símbolos QAM (cuando una distribución no llena un símbolo QAM entero) no deben ser aleatorizados.

3.2.2.3 FEC concatenado

El FEC concatenado está basado en una concatenación serial del código externo de Reed-Solomon y el código interno de tasa compatible TCM. El block interleaving entre el codificador externo e interno es opcional. La figura 18 muestra el flujo entre los bloques usados por el codificador concatenado FEC.

Figura 17. Bloques del codificador FEC concatenado



3.2.2.4 Código externo

El código externo consiste en un código Reed-Solomon.

Este código debe ser derivado desde un código RS sistemático (N=255, K=239) usando GF (28). Los siguientes polinomios son usados para el código sistemático:

Code Generator Polynomial: $g(x) = (x + \lambda^0)(x + \lambda^1)(x + \lambda^2) \dots (x + \lambda^{2T-1}), \lambda = 02_{HEX}$

Field Generator Polynomial: $p(x) = x^8 + x^4 + x^3 + x^2 + 1$

3.2.2.5 Block entrelazador (*Interleaving*)

El soporte de interleaving entre el código interno y externo con una profundidad de $NR=10$ (número de columnas) es opcional. El interleaving no debe ser definido en el esquema FCH burst. Cuando el interleaving es usado, su uso y los parámetros deben ser especificados dentro del esquema burst.

El entrelazador cambia el orden de los bytes del codificador de salida RS. El D-entrelazador en el receptor restaura el orden de los bytes antes de la decodificación RS. El entrelazador es un block entrelazador donde una tabla es escrita, por ejemplo rellena, un byte por columna cada palabra RS y leída a un byte por columna, por palabra de código RS. El número de columnas, NR usados por el entrelazador es un parámetro burst. Por lo tanto aquellos burst no son generados de manera de exceder las capacidades de recepción proyectadas y la mayor NR soportada por un Terminal es comunicada durante la negociación de la capacidad básica de la SS.

3.2.2.6 Código interno

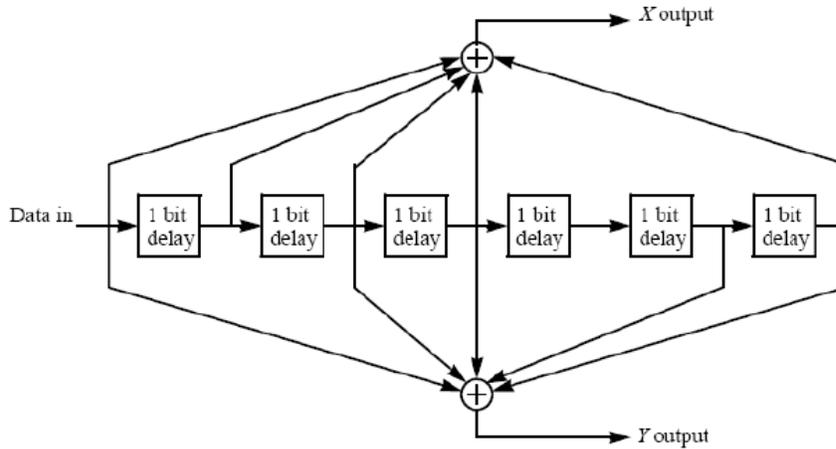
El código interno es un código TCM de tasa compatible derivado de una tasa $\frac{1}{2}$ de longitud $K=7$ binario convolucional.

El codificador para la tasa de código binario $\frac{1}{2}$ debe usar los siguientes polinomios para generar sus dos bits de códigos de salida denotados XY:

$$\begin{array}{ll} G_1 = 171_{OCT} & \text{For } X \\ G_2 = 133_{OCT} & \text{For } Y \end{array}$$

El codificador binario que implementa esta tasa de código $\frac{1}{2}$ es mostrada en la figura 19:

Figura 18. Codificador convolucional de tasa binaria $\frac{1}{2}$



Para generar tasas de código binarios de $\frac{2}{3}$, $\frac{3}{4}$, $\frac{5}{6}$ y $\frac{7}{8}$, la tasa de salida $\frac{1}{2}$ del codificador debe ser “perforada”. Los diseños de “perforación” y orden de serialización para la salidas XY están definidas en la tabla II. En los diseños de “perforación”, un uno denota un bit de salida transmitido y un cero denota un bit no transmitido (“perforado”).

Tabla II Diseño de “perforación” y serialización para código convolucional

Rate	Code Rates				
	1/2	2/3	3/4	5/6	7/8
X Output Puncture pattern	1	10	101	10101	1000101
Y Output Puncture pattern	1	11	110	11010	1111010
Punctured XY serialization	X_1Y_1	$X_1Y_1Y_2$	$X_1Y_1Y_2X_3$	$X_1Y_1Y_2X_3Y_4X_5$	$X_1Y_1Y_2Y_3Y_4X_5Y_6X_7$

Un código TCM pragmático está construido desde dos bits codificados no sistemáticos (que son tomados de la salida del codificador convolucional de tasa de “perforación” $\frac{1}{2}$) y bits no codificados sistemáticos (que son tomados directamente desde la entrada del codificador). Los bits codificados resultantes son luego mapeados a símbolos de las constelaciones. Las modulaciones soportadas y tasas de código para el uplink y downlink son listadas en la tabla III.

La elección de una tasa de código particular y modulación es realizada a través de un esquema de parámetros burst.

Dado que el código externo RS genera registros denominados bytes y el código interno genera símbolos denominados salidas, algún tamaño de registro RS puede requerir un símbolo fraccional QAM al final del registro de dato. Cuando esto sucede suficientes bits cero pueden ser agregados al final del registro de entrada del codificador interno para completar el símbolo final.

El receptor debe descartar estos bits cero luego de decodificar el código interno.

Tabla III Velocidades de códigos interno (TCM) y modulaciones soportadas.

Modulation	Support (M=Mandatory, O=Optional)		Inner code rates	Bits/symbol
	UL	DL		
Spread BPSK	M	M	(pre-spread) 1/2, 3/4	(post-spread) 1/(2*Fs), 3/(4*Fs)
BPSK	M	M	1/2, 3/4	1/2, 3/4
QPSK	M	M	1/2, 2/3, 3/4, 5/6, 7/8	1, 4/3, 3/2, 5/3, 7/4
16-QAM	M	M	1/2, 3/4	2, 3
64-QAM	M	M	2/3, 5/6	4, 5
256-QAM	O	O	3/4, 7/8	6, 7

Los bloques de código interno deben ser de estado cero terminados en transiciones entre tipos de modulación adaptativa (y FEC), al final de los bursts, o acorde instruido por el control MAC y frame.

Cuando se usan terminaciones de estado cero, el codificador convolucional de tasa $\frac{1}{2}$ debe ser inicializado con sus registros en el estado todos-ceros. La codificación interna debe comenzar desde este estado aceptando bits de entrada. Para terminar el código interno (y retornar el codificador al estado todos ceros) al final de un código de bloque, por lo menos seis entradas cero deben ser provistas dentro del codificador convolucional binario de tasa $\frac{1}{2}$ para asegurar que su registro de memoria se ha llenado, por ejemplo su estado de memoria es dirigido a cero.

Una vez que el primer llenado de cero bit es introducido en la memoria del codificador convolucional, todos los bits de entrada, incluyendo la entrada de bits sistemática que es paralela a la entrada del codificador convolucional, debe poseer valor cero.

La tabla IV especifica el número exacto de bits sistemático y no sistemático que debe ser usado para llenar el codificador pragmático TCM para una dada modulación y velocidad de código. También tabula el número de símbolos consumidos en el proceso de terminación de códigos el BPSK ensanchado con un factor de ensanchamiento F_s consume F_s -tiempos más símbolos que el BPSK.

Tabla IV Requerimientos de llenado de bit para código de terminación interna

Modulation	Inner code rate	Number of flushing bits			Number of consumed symbols
		Nonsystematic	Systematic	Total	
spread BPSK	1/2	(pre-spread) 6	(pre-spread) 0	(pre-spread) 6	(post-spread) $12 \cdot F_s$
	3/4	(pre-spread) 6	(pre-spread) 0	(pre-spread) 6	(post-spread) $8 \cdot F_s$
BPSK	1/2	6	0	6	12
	3/4	6	0	6	8
QPSK	1/2	6	0	6	6
	2/3	7	0	7	5
	3/4	6	0	6	4
	5/6	6	0	6	4
	7/8	7	0	7	4
16-QAM	1/2	6	0	6	3
	3/4	6	12	18	6
64-QAM	2/3	6	6	12	3
	5/6	6	4	10	2
256-QAM	3/4	6	12	18	3
	7/8	6	8	14	2

3.2.2.7 Sin FEC

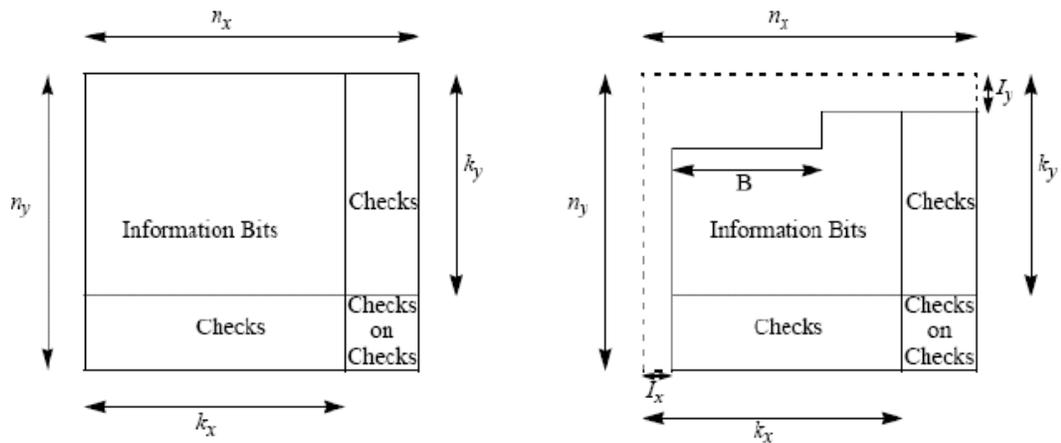
En esta opción datos fuentes aleatorizados deben ser mapeados directamente a los símbolos de la constelación QAM usando un código de mapeo Gray apropiado. Estos mapeos pueden ser vistos en la figura 21 (para BPSK), figura 22 (para QPSK, 16-QAM), figura 23 (para 64-QAM) y figura 24 (para 256-QAM). La operación No-FEC es mandataria para QPSK pero opcional para otros esquemas de modulación.

En el caso de que el tamaño en bytes del registro fuente no sea divisible en un número integral de símbolos QAM, deben ser adicionados suficientes bits cero no aleatorizados al final del registro de datos para completar el último símbolo. Estos bits cero deben ser descartados en el receptor.

3.2.2.8 BTC

Un BTC está formado de bloques de códigos en filas cada uno con parámetros de velocidad (n_x , k_x) y bloques de códigos en columna con parámetros de velocidad (n_y , k_y). El BTC es codificado escribiendo los bits de datos fila por fila en una matriz de dimensión dos como es mostrado en la figura 20. Los bits de información k_x en cada fila son codificados en n_x bits usando un bloque constituido por código de fila (n_x , k_x). Los bits de información k_y son codificados en n_y bits usando un bloque constituido por código de columna (n_y , k_y), donde los bits de chequeo de las filas son también codificados. El código resultante BTC debe tener una longitud de bloque $n = n_x \times n_y$ bits e información de longitud $k = k_x \times k_y$.

Figura 19. Estructura BTC y BTC simplificada



El código de fila constituyente y el código de columna constituyente usados para formar las filas y columnas deben ser especificados por parámetros de un perfil específico BTC burst. El código constituyente disponible por especificación está listado en la tabla V.

Tabla V Componente de códigos BTC

Component codes (n, k)	Code type
(64,57), (32,26), (16,11), (8,4)	Extended Hamming Code
(64,63), (32,31), (16,15), (8,7)	Parity Check Code

Todos los códigos de la tabla V deben ser formados mediante la adición de un check bit o check bits al final de los bits de información. Un código de chequeo de paridad debe usar un check bit.

Un código de componente hamming debe usar $n-k$ check bits. El primer $n-k-1$ check bits son los check bits del código hamming ($n-1, k$) derivados de uno de los generadores polinomiales listado en la tabla VI, mientras que el último check bit es un bit de chequeo de paridad.

Tabla VI Polinomios Generadores de Códigos Hamming ($n-1, k$)

$n-1$	k	Generator polynomial
7	4	X^3+X^1+1
15	11	X^4+X^1+1
31	26	X^5+X^2+1
63	57	X^6+X+1

Para hacer coincidir un tamaño de paquete requerido y arbitrario los BTCs pueden ser simplificados removiendo símbolos desde el arreglo BTC. Las filas, columnas, o partes pueden ser removidas hasta que el tamaño apropiado sea alcanzable. Dos pasos ilustrados en la figura 23 están envueltos en la simplificación de los códigos producto.

- Paso 1) Remover I_x filas y I_y columnas desde el código bidimensional. Esto es equivalente a simplificar el código constituyente que realiza el código producto.
- Paso 2) Remover bits individuales B desde la primera fila del código bidimensional comenzando con el LSB.

La longitud de bloque resultante del código es $(n_x - I_x)(n_y - I_y) - B$. Consecuentemente la velocidad de código está dada por:

$$R = \frac{(k_x - I_x)(k_y - I_y) - B}{(n_x - I_x)(n_y - I_y) - B}$$

3.2.2.9 Modulaciones y mapeo de constelaciones

La tabla VII lista las modulaciones soportadas.

Tabla VII Modulaciones Soportadas

Modulation	Support (M=Mandatory, O=Optional)	
	UL	DL
Spread BPSK	M	M
BPSK	M	M
QPSK	M	M
16-QAM	M	M
64-QAM	M	M
256-QAM	O	O

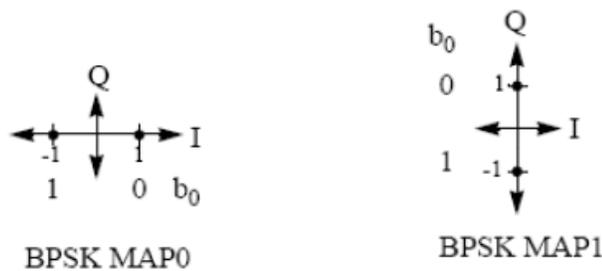
Con excepción de BPSK- ensanchado los bits codificados FEC son mapeados directamente a la constelación usando uno de los mapas de constelación mostrados en la siguiente sección. Dado que múltiples mapeos son definidos por algunas de las modulaciones, el FEC apropiado y la descripción de la velocidad de dato deben ser consultados para determinar el mapeo específico a ser usado.

3.2.2.10 Mapeo de constelación

Para FEC concatenado los códigos de bits deben ser mapeados a símbolos IQ coordinados usando TCM pragmático o mapa de símbolo de código Gray, dependiendo de la velocidad de código y esquema de modulación.

BPSK puede ser alternativamente mapeado para constelaciones ortogonales ilustradas en la figura 21. BPSK MAP0 debe ser usado para bits indexados-pares mientras que BPSK MAP 1 debe ser usado para bits indexados impares. El primer símbolo a ser mapeado en una distribución BPSK ensanchado debe ser considerado par.

Figura 20. Mapas de Constelación BPSK



Todas las velocidades de código QPSK y velocidad $\frac{1}{2}$ 16-QAM deben usar mapas de constelación de código Gray mostrado en la figura 22.

Figura 21. Mapas gray para constelaciones QPSK y 16-QAM

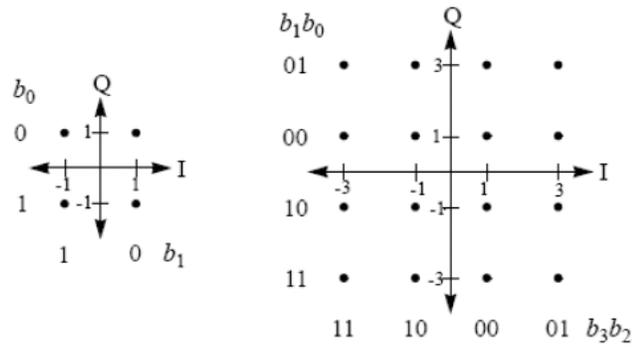
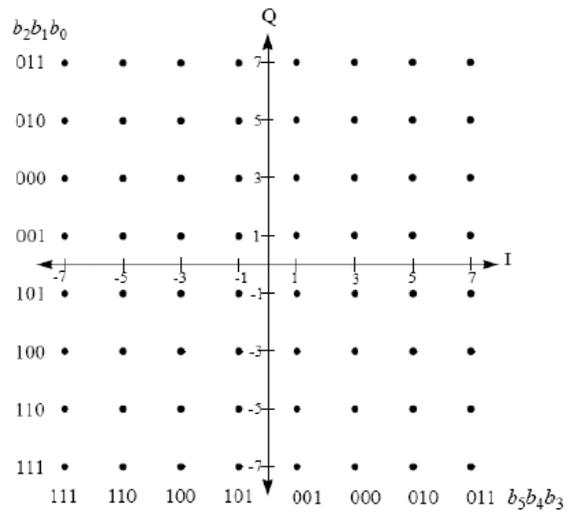
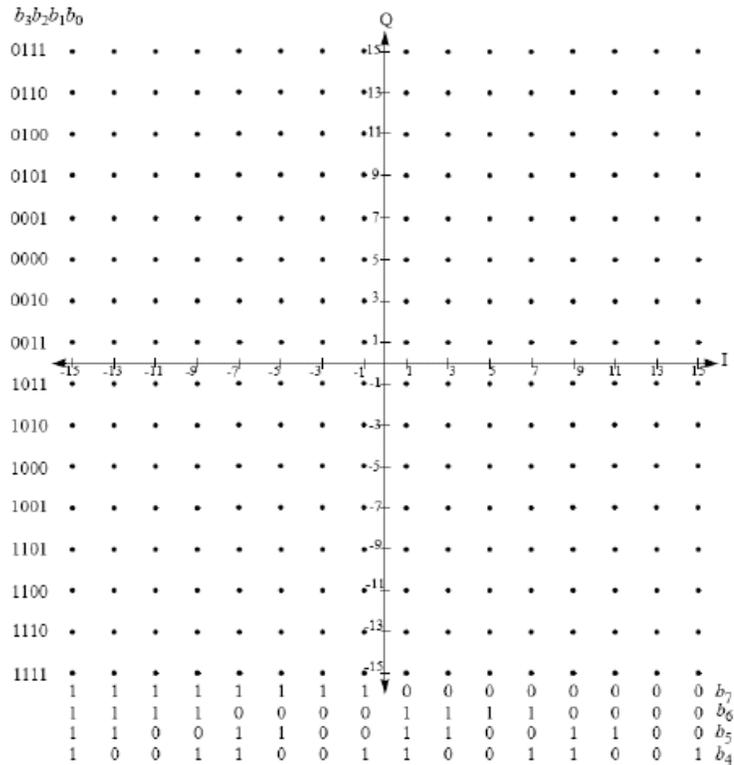


Figura 22. Mapas gray para constelación 64-QAM



Todas las velocidades de código para 256-QAM deben usar mapas de constelación TCM pragmático mostrado en la figura 26.

Figura 25. Mapa pragmático para constelación 256-QAM



Para obtener unidades de potencia promedio o unidades de potencia pico de secuencias transmitidas, los puntos de constelación de coordenadas IQ son multiplicados por un factor apropiado c listado en la tabla VIII, dependiendo de la regla de normalización en efecto.

Exceptuando BPSK, con normalización de potencia de pico constante, los puntos extremos en la constelación son transmitidos a iguales niveles de potencia sin importar el tipo de modulación.

Con normalización de potencia media constante, la señal es transmitida a niveles de igual potencia media sin importar el tipo de modulación.

Tabla VIII Factores de normalización

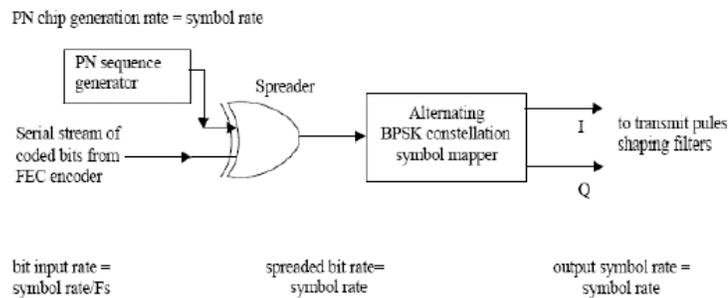
Modulation scheme	Normalization constant for unity average power	Normalization constant for unity peak power
BPSK	$c = 1$	$c = 2$
QPSK	$c = 1/(\sqrt{2})$	$c = 1/(\sqrt{2})$
16-QAM	$c = 1/(\sqrt{10})$	$c = 1/(\sqrt{18})$
64-QAM	$c = 1/(\sqrt{42})$	$c = 1/(\sqrt{98})$
256-QAM	$c = 1/(\sqrt{170})$	$c = 1/(\sqrt{450})$

3.2.2.11 Modulación BPSK Ensanchada

El BPSK ensanchada es un formato de modulación. Su selección está realizada por un esquema de codificación de burst por tipo de modulación.

La entrada al modulador BPSK ensanchada es un arreglo serial de bits derivados de la salida del codificador FEC. Esta modulación sólo debe coincidir con las velocidades de códigos FEC definidas para BPSK convencional (no ensanchada). La tabla III lista estas velocidades de código mandatarias para FEC concatenados.

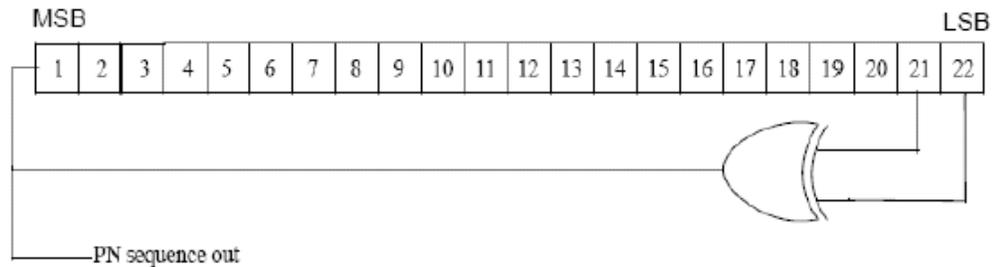
Figura 26. Procesamiento de BPSK ensanchado



La figura 27 muestra la generación de datos BPSK ensanchada, modulados con un factor de ensanchamiento F_s . Cada bit de entrada debe ser retenido por cada símbolo de reloj F_s y puesto en una compuerta XOR con salidas F_s consecutivas de una secuencia de generación PN operando a la velocidad de símbolo. La salida XOR debe ser mapeada con símbolo BPSK acorde a lo descrito en la sección anterior.

Sólo factores de ensanchamiento acorde al set $F_s = 2n$, $0 \leq n \leq n_{max}$, donde debe ser usado $n_{max} = 3$ para downlink y 4 para uplink. El soporte para todos estos factores de ensanchamiento es aleatorio. El factor de ensanchamiento usado por burst está especificado dentro del esquema de codificador burst por tipo de modulación.

Figura 27. Generador de secuencia PN



El generador de secuencia de ensanchamiento PN debe ser construido a partir de un LFSR (*Linear Feedback Register*) ilustrado en la figura 28. La característica polinomial del LFSR es $1+X^{21}+X^{22}$.

El generador de secuencia PN debe ser inicializado al comienzo de la modulación BPSK ensanchada con una de las semillas de la tabla IX. El seteo del esquema burst para ensanchamiento es usado para seleccionar la semilla a ser usada.

En el uplink una BS no es requerida a hacerlo pero puede hacer múltiples modulaciones BPSK ensanchadas time-overlapping. Cada modulación debe ser para una SS diferente y cada una debe usar la misma semilla. Estas modulaciones no deben superponerse en tiempo a una modulación no ensanchada. Para asegurar que las fases de las secuencias ensanchadas y los preámbulos del BPSK ensanchado solapado no se superponga en tiempo en el BS receptor, el comienzo de la distribución del preámbulo burst debe comenzar por lo menos con una longitud de una Única Palabra de símbolos luego del final del preámbulo de cualquier otra modulación BPSK ensanchada que pueda superponerla en tiempo.

Múltiples modulaciones BPSK ensanchadas con superposición de tiempo (desde una simple BS a través de un sector simple) no deberían ser transmitidas en el downlink. Una práctica recomendada dentro de un plan coordinado es asignar para cada BS la misma semilla para todas las transmisiones de BPSK ensanchada, y para diferentes BS en las celdas vecinas o sectores asignar diferentes semillas.

3.2.2.12 Empaquetado de Burst

Los datos del downlink y uplink deben ser formateados en sets de paquetes burst. El downlink debe soportar uno o más paquetes burst TDM mientras que el uplink debe soportar paquetes burst TDMA.

El formato usado por un set burst está indicado por el esquema de codificación burst. Se definen tres formatos. El formato estándar debe ser soportado en el uplink y el downlink. Este formato debe ser siempre usado por datos conteniendo el FCH. El formato STC es opcional y debe ser usado solamente para datos codificados por STC en el uplink o downlink. El formato de subcanal es opcional y debe ser usado sólo en el uplink.

Aunque el burst está definido en el estándar los formatos STC y de subcanal pueden coexistir en el mismo canal y no pueden solaparse en tiempo.

3.2.2.13 Encapsulado Duplex

El párrafo siguiente especifica la operación FDD mientras que el subsiguiente especifica la operación TDD. El soporte de al menos uno de estos dos modos de duplexión es obligatorio.

3.2.2.14 FDD

El FDD segrega el uplink y el downlink en diferentes portadoras de frecuencia. Las BSs transmiten a la frecuencia de portadora de downlink mientras que las SSs transmiten a la frecuencia portadora de uplink.

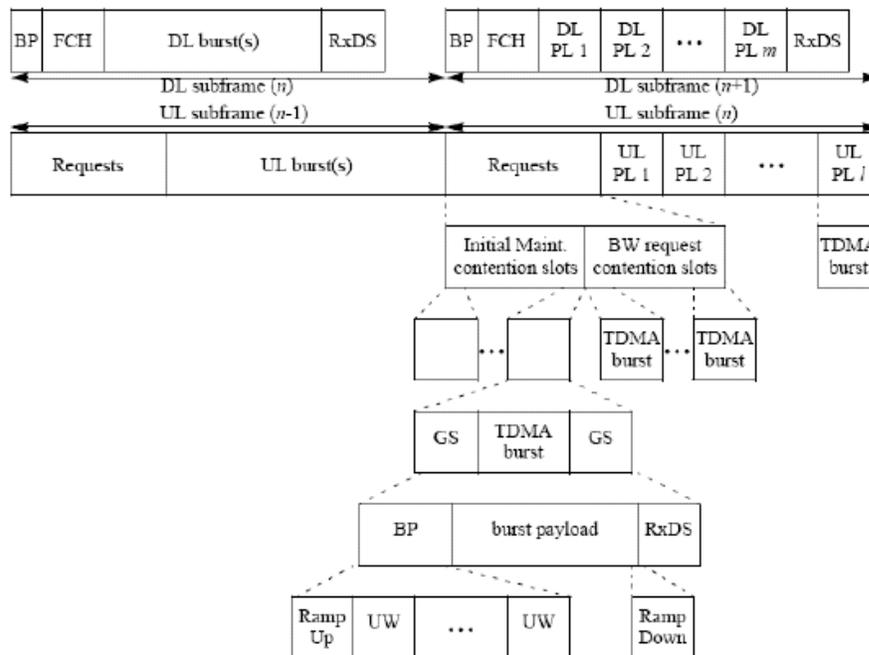
Una SS en el sistema FDD debe ser capaz de operar por encima del burst downlink y uplink. Por otra parte dada una parametrización apropiada de un burst downlink, una SS debe también ser capaz de operación downlink continua.

3.2.2.15 FDD con Burst Downlink

Un ejemplo de un sistema FDD con downlink TDM es ilustrado en la figura 29. Como la figura 29 lo ilustra los subframes de downlink y uplink deben coincidir en longitud y se deben repetir a intervalos regulares constante (definición MAC). Un frame burst de downlink no debe exceder la longitud de un subframe de downlink, pero es necesario que no llene enteramente el subframe downlink.

También, aunque no está ilustrado en la figura 29, la capacidad de ilustrar varios sets burst de downlink dentro de un subframe es mandatorio. El primer set burst en cada subframe downlink debe comenzar con un preámbulo burst (BP) y debe estar seguido directamente con un Frame Control Header (FCH), una carga que puede contener DCD, UCD y MAPs. Sólo el primer subframe burst en el downlink debe contener el FCH.

Figura 28. Ejemplo de un formato de paquete FDD



Los burst de downlink TDM deben seguir el FCH. El burst downlink finaliza con un RxDS para permitir retardo de ensanche para limpiar el receptor. Si un paquete MAC del downlink es enteramente relleno con datos, los burst deben ser concatenados y los RxDS suprimidos. En otras palabras un RxDS de longitud cero debe ser usado y el preámbulo del próximo paquete MAC debe comenzar inmediatamente.

Cuando más de un burst será transmitido dentro de un subframe MAC simple de un downlink, el DL-MAP debe incluir un delimitador extendido de burst IE después del último dato garantizado IE de cada burst y antes del primer dato garantizado IE del burst sucesor. El IE especifica el tamaño de gap de separación del burst. El gap incluye el RxDS. Como resultado la mínima longitud del gap es la longitud del RxDS.

El subframe uplink contiene tres categorías de burst:

- Requerimientos iniciales de rango que son transmitidos en slots de contención reservados para rango inicial de estación.
- Requerimiento de ancho de banda que son transmitidos en slots de contención reservados para respuesta a polls multicast y broadcast para necesidades de ancho de banda.
- Garantía de ancho de banda que están específicamente situadas en las SSs individuales.

Como lo ilustra la figura 29, los sets de burst uplink son TDMA y deben ser constituidos desde un preámbulo burst (BP) incluyendo ramp-up, un burst, y un RxDS, incluyendo ramp-down. Los SSTGs separan las transmisiones de burst de varias transmisiones de SSs que usan el uplink. Una especificación SSTG incluye la longitud del RxDS con una guarda de símbolo adicional que pueden ser insertados entre los burst del uplink para reflejar la incerteza de referencia de tiempo.

Todos los burst uplink excluyendo los slots de rango inicial deben usar un SSTG (entre burst) que es especificado como un parámetro descriptor de canal UCD. Dado que largas incertezas de tiempo pueden ser experimentadas en los slots de rango

experimental, un parámetro especial de rango inicial y descriptor de canal SSTG debe ser asociado con los slots de rango inicial.

La especificación de rango inicial de SSTG incluye la longitud del RxDS y símbolo adicional de guarda. Los símbolos de guarda adicional usados por el rango inicial SSTG son designados ‘GS’ en la figura 24.

El UL-MAP en el FCH downlink gobierna la localidad, el tamaño de burst y el perfil burst para garantía exclusiva de ancho de banda a las SSs. La selección del perfil burst puede estar basada en los efectos de distancia, interferencia y factores ambientales en transmisiones hacia la SS.

3.2.2.16 Generando un downlink continuo desde un burst downlink

Un downlink continuo puede ser derivado desde un burst downlink, mediante un relleno de carga nula al final del paquete burst para asegurar el espaciamiento del paquete entero de downlink. Haciendo esto el burst downlink es forzado a suprimir los elementos burst RxDS y ramp-up, porque los burst downlink son encargados de suprimir estos elementos cuando el subframe MAC de downlink está completo. Para insertar un relleno de carga nulo, la última entrada en el DLMAP de un FCH debe especificar el perfil burst para el tipo de relleno de datos nulos.

3.2.2.17 TDD

El TDD multiplexa el uplink y el downlink en la misma portadora por sobre intervalos diferentes de tiempo dentro del mismo paquete MAC.

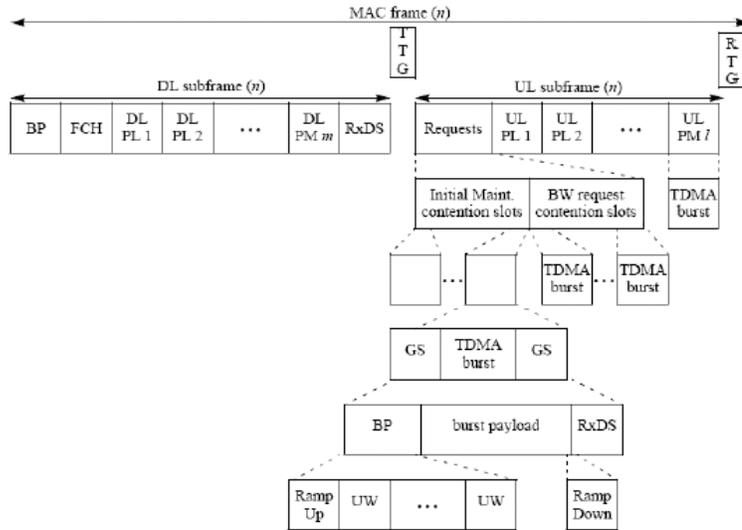
La figura 30 ilustra la operación TDD con burst simple en el downlink TDM. En TDD el downlink y uplink se alternan ocupando un paquete compartido, con el subframe downlink precediendo al subframe uplink. El tamaño del paquete compartido debe ser constante, sin embargo el tamaño de los subframes uplink y downlink dentro del paquete compartido deben variar acorde a la localidad dirigida por el FCH. Aunque la figura 30 ilustra un burst TDM simple por subframe downlink, la capacidad de acomodar varios burst TDM es mandatorio con el primer burst en el subframe duplex de downlink conteniendo el FCH.

Cuando más de un burst es transmitido dentro de un subframe de downlink simple, el DL-MAP debe incluir un delimitador de burst extendido IE luego del último dato garantizado IE por cada burst y antes del primer dato garantizado IE del burst sucesor. El delimitador extendido de burst IE especifica el tamaño del gap separador de burst. El gap incluye el RxDS. Como resultado la longitud mínima del gap es la longitud del RxDS.

La mayoría de los elementos de empaquetamiento dentro del TDD son encontrados en el FDD y desarrollan las mismas funciones. Los únicos elementos de paquete TDD no encontrados en FDD son: TTG y RTG.

Luego del TTG la BS receptora debe buscar por los primeros símbolos del subframe uplink. Este gap es un número integral de la duración PS y comienzo en el límite PS. Luego del RTG los receptores SS deben buscar por el primer símbolo de datos modulados en el subframe uplink. Este gap es un número integral de la duración PS de inicio en el límite PS.

Figura 29. Ejemplo de formato de un paquete TDD



3.3 Especificación WirelessMAN-OFDM PHY

3.3.1 Introducción

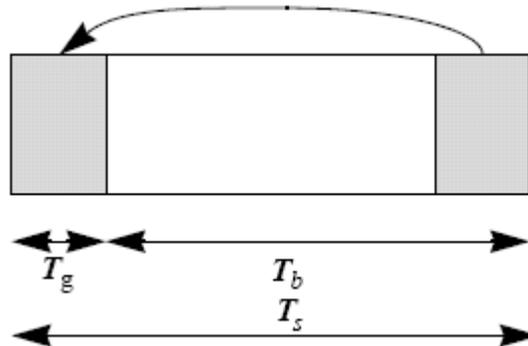
El WirelessMan-OFDM PHY está basado en modulación OFDM y diseñado para operación NLOS en las bandas por debajo de los 11 GHz.

3.3.2 Descripción de Símbolos OFDM

3.3.2.1 Dominio del tiempo

La transformada de Fourier inversa genera una forma de onda OFDM; esta duración de tiempo está referida como un tiempo de símbolo útil T_b . Una copia del último T_g del período de símbolo útil denominado CP es usado para recolectar trayectorias múltiples, mientras se mantiene la ortogonalidad de los tonos. La figura 31 ilustra esta estructura.

Figura 30. Estructura de tiempo de símbolo OFDM



La energía de transmisión se incrementa con el tiempo de guarda mientras que la energía de recepción se mantiene igual (la extensión cíclica es descartada) por lo tanto existe una pérdida $10 \log(1-T_g/T_b+T_g)/\log(10)$ dB en E_b/N_0 . La fracción de *overhead* CP y la pérdida resultante en SNR pueden ser reducidas incrementando el tamaño FFT, el cual podría, a través de otras cosas, adversamente afectar la sensibilidad del sistema a ruido de fase de los osciladores. Usando una extensión cíclica las muestras referidas para desarrollar la FFT en el receptor pueden ser tomadas de cualquier lugar por encima de la longitud de símbolo extendido.

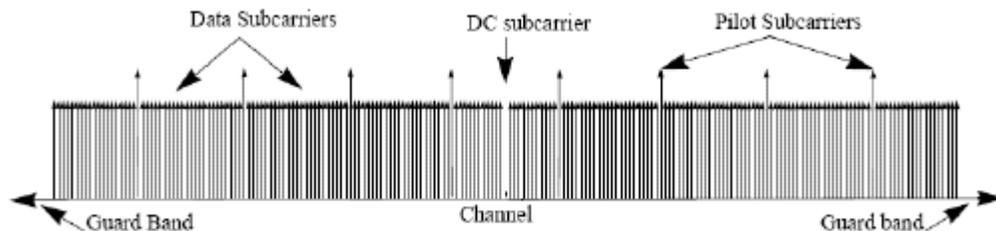
Esto provee inmunidad multitrayecto y tolerancia para sincronización de tiempo de símbolo. En la inicialización una SS debería buscar todos los valores posibles de CP hasta que encuentre el CP que está siendo usado por la BS. La SS debería usar el mismo CP en el uplink. Una vez que una duración CP específica fue seleccionada por la BS para operación en el downlink, esta no debería ser cambiada. Cambiando el CP puede forzar a todas las SSs a resincronizarse.

3.3.2.2 Dominio en frecuencia

La descripción del dominio en frecuencia incluye la estructura básica de un símbolo OFDM. Un símbolo OFDM (ver figura 32) está compuesto por subcarriers, en número a partir del cual se determina el tamaño FFT usado. Hay muchos tipos de subcarriers:

- Subcarrier de datos: para transmisión de datos.
- Subcarrier piloto: para varios propósitos de estimación.
- Subcarrier nulos: sin transmisión en absoluto, para bandas de guarda, subcarriers no activos y subcarriers DC.

Figura 31. Descripción de frecuencia OFDM



El propósito de las bandas de guarda es de activar la señal para que decaiga naturalmente y crear la forma FFT “pared de ladrillo”. Los subcarriers están no activos sólo en el caso de transmisión subcanalizada por una SS.

La transmisión subcanalizada en el uplink es una opción para la SS y sólo debe ser usada si las señales de la BS están capacitadas de decodificar este tipo de transmisiones.

3.3.2.3 Codificación de canal

La codificación de canal está compuesta de tres pasos: aleatorizador, FEC e interleaving. Ellos deben ser aplicados en este orden en transmisión. Las operaciones complementarias deben ser aplicadas en orden inverso en la recepción.

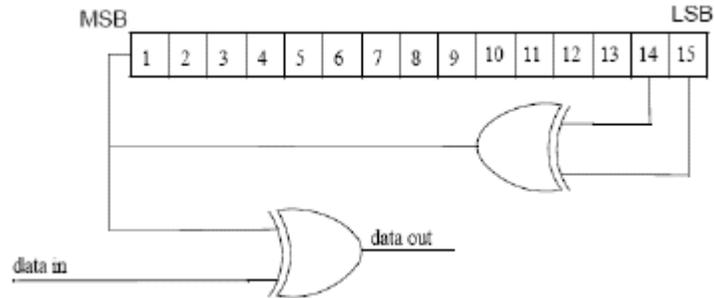
3.3.2.4 Aleatorización

La aleatorización de datos es realizada en cada burst de datos en el uplink y el downlink. La aleatorización es realizada en cada asignación (uplink o downlink), lo cual significa que para cada asignación de bloque de datos (subcanales en el dominio de la frecuencia y símbolos OFDM en el dominio del tiempo) el aleatorizador puede ser usado independientemente. Si la cantidad de datos a transmitir no corresponden exactamente a la cantidad de datos asignados, debe ser adicionado padding de unos (solamente) al final del bloque de transmisión. Para codificación de datos RS-CC y CC el padding será adicionado al final del bloque de transmisión hasta una cantidad de datos asignados, menos un byte, el cual debe ser reservado para el FEC.

Para BTC y CTC, si están implementados, el *padding* será adicionado al final del bloque de transmisión hasta la cantidad de datos asignados.

El registro de desplazamiento del aleatorizador debe ser inicializado para cada nueva asignación. El generador PRBS debe ser $1+X^{14}+X^{15}$ como el mostrado en la figura 33. Cada byte de dato a ser transmitido debe ser ingresado secuencialmente en el aleatorizador siendo primero el MSB. Los preámbulos no son aleatorizados. El valor de la semilla debe ser usado para calcular los bits de la aleatorización, los cuales están combinados en una operación XOR con un arreglo de bit serializado para cada burst. La secuencia del aleatorizador es aplicada sólo a los bits de información.

Figura 32. PRBS para aleatorización de datos



Los bits generados por el aleatorizador deben ser aplicados al codificador.

En el downlink el aleatorizador debe ser reinicializado al comienzo de cada frame con la secuencia: 1 0 0 1 0 1 0 1 0 0 0 0 0 0 0. El aleatorizador no debe ser reseteado al comienzo del burst n° 1. Al comienzo de una subsecuencia de bursts el aleatorizador debe ser inicializado con el lector mostrado en la figura 34. El número de frame usado para inicialización está referido al frame en el cual el comienzo del downlink es transmitido.

Figura 33. Aleatorizador OFDM-vector de inicialización downlink para burst 2...N

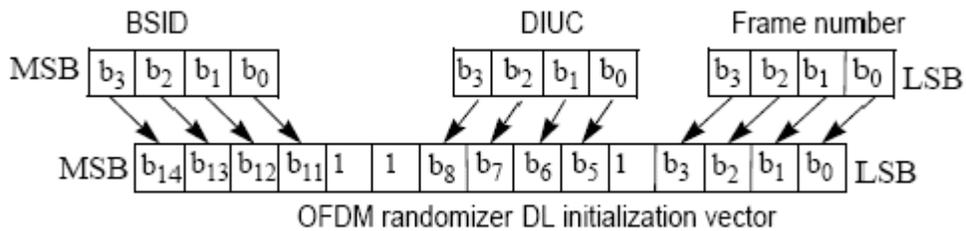
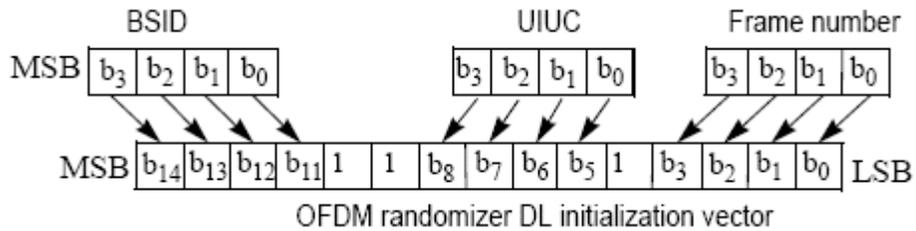


Figura 34. Aleatorizador OFDM-vector de inicialización uplink



3.3.3 FEC

El FEC consistente en la concatenación del código externo Reed-Solomon y el código interno convolucional de tasa compatible; debe ser soportado por el uplink y downlink. El soporte de BTC y CTC es opcional. La tasa de codificación $\frac{1}{2}$ Reed-Solomon-Convolucional siempre debe ser usada como modo codificación cuando se requiere acceso a la red (excepto en modo de subcanalización que usa solamente codificación convolucional $\frac{1}{2}$) y en burst FCH. La codificación es realizada en la primera pasada de datos en bloque a través del codificador RS y luego pasada a través del codificador convolucional de cero-terminación.

3.3.4 Código convolucional concatenado Reed-Solomon (RS-CC)

La codificación Reed-Solomon debe ser derivada de un código sistemático RS ($N=255, K=239, T=8$) usando $GF(28)$, donde:

N es el número total de bytes luego de la codificación

K es el número de bytes de dato antes de la codificación

T es el número de bytes de datos que pueden ser corregidos.

Los siguientes polinomios son usados para el código sistemático:

Polinomio Generador de Código:

$$g(x) = (x + \lambda^0)(x + \lambda^1)(x + \lambda^2) \dots (x + \lambda^{2T-1}), \lambda = 02_{HEX}$$

Polinomio Generador de Campo:

$$p(x) = x^8 + x^4 + x^3 + x^2 + 1$$

Este código es simplificado y “perforado” para habilitar tamaños de bloque variables y capacidad de corrección de error variable. Cuando un bloque es simplificado K' bytes de datos, se adicionan $239-K'$ cero bytes como prefijo.

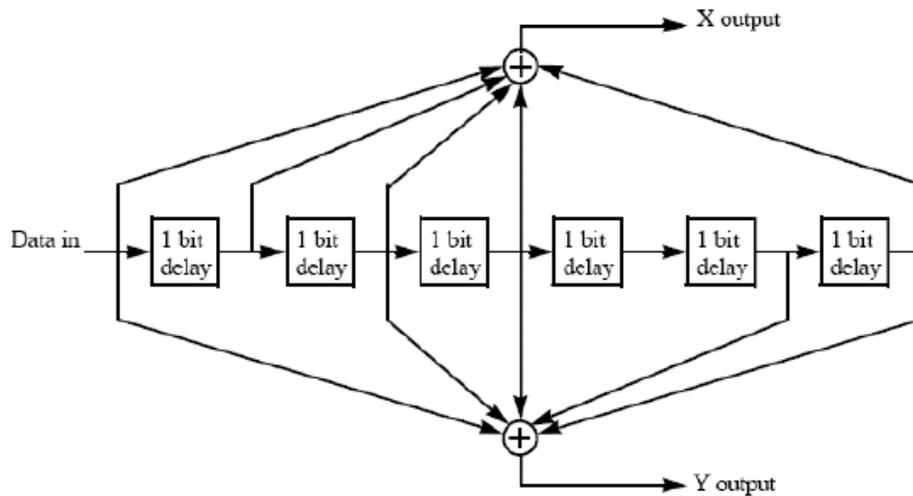
Luego de codificar se descartan estos $239-K'$ cero bytes. Cuando una palabra de código es “perforada” para permitir T' bytes a ser corregido, sólo los primeros $2T'$ de un total de 16 bytes de paridad deben ser empleados. La conversión bit/byte debe ser primero al MSB.

Cada bloque RS es codificado por el codificador binario convolucional el cual debe tener tasa nativa de $1/2$, una longitud restringida de 7 y debe usar el siguiente generador polinomial para derivar sus dos bits de código:

$$\begin{array}{ll} G_1 = 171_{OCT} & \text{FOR } X \\ G_2 = 133_{OCT} & \text{FOR } Y \end{array}$$

El generador es mostrado en la figura 35

Figura 35. Codificador convolucional de tasa $\frac{1}{2}$



Los esquemas de “perforación” y orden de serialización que deben ser usados para realizar diferentes tasas de códigos son definidos en la tabla IX; el número ‘1’ significa un bit transmitido y ‘0’ denota un bit removido, mientras que X e Y están en referencia a la figura 36.

Tabla IX Código convolucional interno con configuración de “perforación”

	Code rates			
Rate	1/2	2/3	3/4	5/6
d_{free}	10	6	5	4
X	1	10	101	10101
Y	1	11	110	11010
XY	X_1Y_1	$X_1Y_1Y_2$	$X_1Y_1Y_2X_3$	$X_1Y_1Y_2X_3Y_4X_5$

La tasa RS-CC 1/2 debe ser usada siempre en el modo codificación cuando se requiera acceso a la red. La codificación es realizada primero pasando los datos en formato de bloque a través del codificador RS y luego pasada a través del codificador convolucional. Un byte de cola simple 0x00 es agregado al final de cada burst. Este byte de cola debe ser agregado luego de la aleatorización. En el codificador RS los bits redundantes son enviados antes de la entrada de bits manteniendo el byte de cola 0x00 al final de la asignación. Cuando el número total de bits de datos en el burst no es un número entero de bytes, es adicionado un relleno de cero bits luego de la cola de cero bits. El relleno de cero bits no esta aleatorizado. Notar que esta situación puede ocurrir sólo en subcanalización. En este caso la codificación RS no es empleada.

La tabla X da los tamaños de bloque y las velocidades de código usadas para diferentes modificaciones y velocidad de código.

Tabla X Codificación de canal obligatoria por modulación

Modulation	Uncoded block size (bytes)	Coded block size (bytes)	Overall coding rate	RS code	CC code rate
BPSK	12	24	1/2	(12,12,0)	1/2
QPSK	24	48	1/2	(32,24,4)	2/3
QPSK	36	48	3/4	(40,36,2)	5/6
16-QAM	48	96	1/2	(64,48,8)	2/3
16-QAM	72	96	3/4	(80,72,4)	5/6
64-QAM	96	144	2/3	(108,96,6)	3/4
64-QAM	108	144	3/4	(120,108,6)	5/6

Cuando es aplicada la subcanalización en el uplink, el FEC debe realizar un “bypass” del codificador RS y usar el “*Overall Coding Rate*”, como está indicado en la tabla X como tasa de código CC. El tamaño de bloque no codificado y el tamaño de código codificado pueden ser computados mediante la multiplicación de los valores

listados en la tabla X por el número de subcanales dividido 16. En caso de modulación BPSK se debe realizar un “*bypass*” del codificador RS.

3.3.5 Entrelazador

Todos los bits de datos codificados deben ser procesados por un block entrelazador con un tamaño de bloque correspondiente al número de bits codificados por subcanal asignado por símbolo OFDM, N_{cbps} . El entrelazador está definido por dos pasos de permutación. El primero asegura que los bits codificados adyacentes sean mapeados en subportadoras no adyacentes.

La segunda permutación asegura que los bits codificados adyacentes son mapeados alternativamente dentro del bit más o menos significativo de la constelación, de esta manera se evitan largas ejecuciones de bits menos confiables.

Sea N_{cpc} el número de bits codificados por subportadora, por ejemplo 1, 2, 4 ó 6 para BPSK, QPSK, 16-QAM o 64-QAM, respectivamente. Sea $s = \text{ceil}(N_{cpc}/2)$. Dentro de un bloque de N_{cbps} bits de transmisión, sea k el índice de bit codificado antes de la primera permutación; m_k el índice de bit codificado luego de la primera y antes de la segunda permutación, y j_k el índice antes de la segunda permutación, sólo prioritario para el mapeo de modulación.

La primera permutación está definida por la fórmula:

$$m_k = (N_{cbps}/12) \cdot k_{\text{mod}12} + \text{floor}(k/12) \quad k = 0, 1, \dots, N_{cbps} - 1$$

La segunda permutación está definida por la fórmula:

$$j_k = s \cdot \text{floor}(m_k/s) + (m_k + N_{cbps} - \text{floor}(12 \cdot m_k/N_{cbps}))_{\text{mod}(s)} \quad k = 0, 1, \dots, N_{cbps} - 1$$

El desentrelazador que desarrolla la operación inversa es también definido por dos permutaciones dentro de un bloque recibido de N_{cbps} bits, sea j el índice de bits recibido antes de la primera permutación; m_j el índice del bit después de la primera y antes de la segunda permutación; k_j el índice del bit luego de la segunda permutación sólo antes de la entrega del bloque al codificador.

La primera permutación está definida por la fórmula:

$$m_j = s \cdot \text{floor}(j/s) + (j + \text{floor}(12 \cdot j/N_{cbps})) \bmod(s) \quad j = 0, 1, \dots, N_{cbps} - 1$$

La segunda permutación está definida por la fórmula:

$$k_j = 12 \cdot m_j - (N_{cbps} - 1) \cdot \text{floor}(12 \cdot m_j/N_{cbps}) \quad j = 0, 1, \dots, N_{cbps} - 1$$

La primera permutación en el entrelazador es la inversa de la segunda permutación y recíprocamente. La tabla XI muestra los tamaños de bit entrelazados como una función de la modulación y codificación.

Tabla XI Tamaños de bloque del entrelazador de Bit

	Default (16 subchan- nels)	8 subchannels	4 subchannels	2 subchannels	1 subchannel
	N_{cbps}				
BPSK	192	96	48	24	12
QPSK	384	192	96	48	24
16-QAM	768	384	192	96	48
64-QAM	1152	576	288	144	72

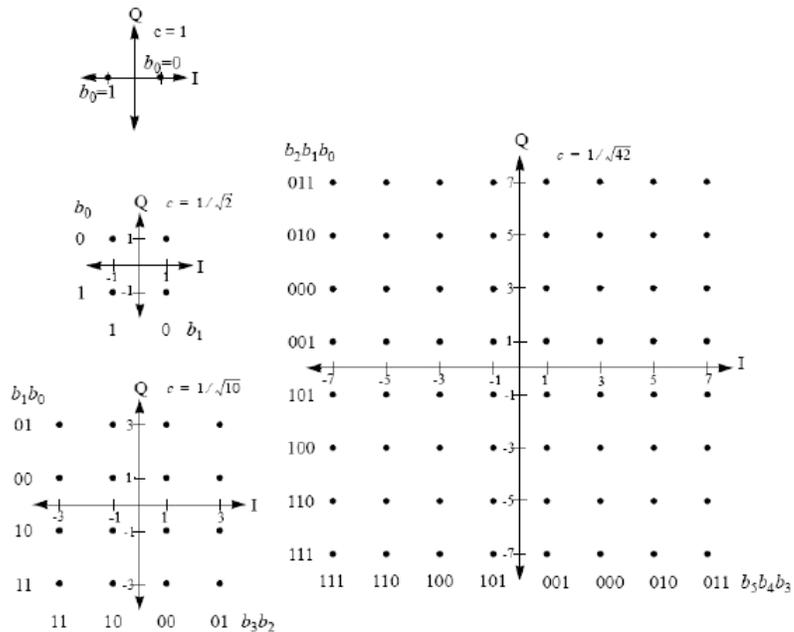
El primer bit fuera del entrelazador debe mapear al msb en la constelación.

3.3.6 Modulación

3.3.6.1 Modulación de datos

Luego del entrelazado de bit, los bits de datos son entrados serialmente al mapeador de constelaciones. Deben ser soportados, según mostrados en la figura 37, BPSK, QPSK mapeado-Gray, 16-QAM y 64-QAM. Las constelaciones mostradas en la figura 37 deben ser normalizadas mediante multiplicación de los puntos de la misma con el factor c indicado para lograr igual potencia media. Para cada modulación b_0 denota el I_{sb} . En el downlink deben ser soportadas codificación y modulación adaptativas por asignación. El uplink debe soportar diferentes esquemas de SS basado en la configuración de mensajes MAC burst provenientes del BS.

Figura 36. Constelaciones BPSK, QPSK 16-QAM Y 64-QAM

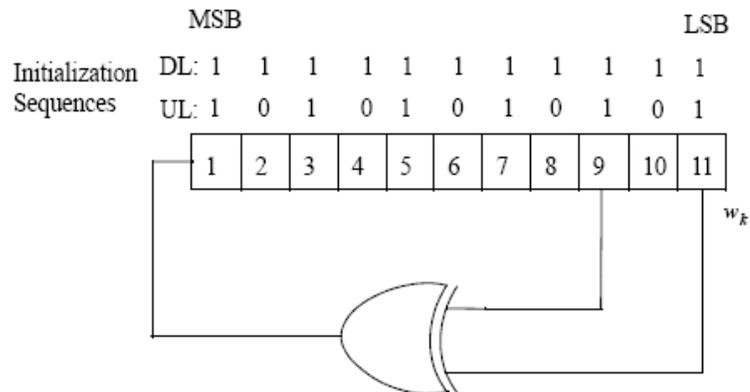


Los datos mapeados en la constelación deben ser subsecuentemente modulados en todas las subportadoras de datos asignadas en orden de índice creciente de frecuencia offset. El primer símbolo fuera del mapeo de constelación de datos debe ser modulado dentro de la subportadora asignada con la menor frecuencia índice offset.

3.3.6.2 Modulación piloto

La subportadoras piloto deben ser insertadas en cada burst de datos en orden de constituir el símbolo y deben ser moduladas acorde a la subportadora dentro del símbolo OFDM. El generador PRBS mostrado abajo, debe ser usado para producir una secuencia w_k . El polinomio para el generador PRBS debe ser $X^{11}+X^9+1$.

Figura 37. PRBS para modulación de piloto



El valor de la modulación de piloto para símbolo k OFDM es derivado w_k . En el downlink el índice k representa el índice de símbolo relativo al comienzo del subframe de downlink. En el uplink el índice k representa el índice de símbolo relativo al comienzo del burst. En el uplink y el downlink el primer símbolo del preámbulo es denotado como $k = 0$. Las secuencias de inicialización que deben ser usadas en el uplink y el downlink son mostradas en la figura 38.

En el downlink esto debe resultar en la secuencia 11111111111000000000110... donde el tercer uno, por ejemplo $w_2 = 1$, debe ser usado en el primer símbolo OFDM downlink seguido del frame preámbulo. Para cada piloto (indicado por el índice de frecuencia offset), la modulación BPSK debe ser derivada como sigue:

$$\text{DL: } c_{-88} = c_{-38} = c_{63} = c_{88} = 1 - 2w_k \quad \text{and} \quad c_{-63} = c_{-13} = c_{13} = c_{38} = 1 - 2\overline{w_k}$$

$$\text{UL: } c_{-88} = c_{-38} = c_{13} = c_{38} = c_{63} = c_{88} = 1 - 2w_k \quad \text{and} \quad c_{-63} = c_{-13} = 1 - 2\overline{w_k}$$

3.3.6.3 Codificaciones Rate_ID

Rate_IDs indican modulación y codificación a ser usadas en el primer burst downlink inmediatamente seguido del FCH, acorde a lo mostrado en la tabla XII. La codificación Rate_ID es estática y no puede ser cambiada durante la operación del sistema.

Tabla XII Codificaciones OFDM rate-ID

Rate_ID	Modulation RS-CC rate
0	BPSK 1/2
1	QPSK 1/2
2	QPSK 3/4
3	16-QAM 1/2
4	16-QAM 3/4
5	64-QAM 2/3
6	64-QAM 3/4
7-15	<i>Reserved</i>

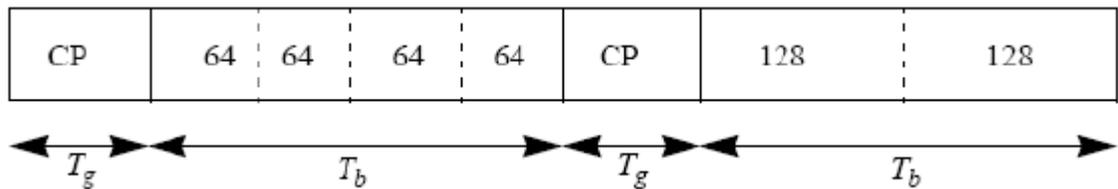
3.3.6.4 Modulación y estructura de preámbulo

Todos los preámbulos están estructurados como símbolos OFDM. Los símbolos OFDM están definidos por los valores de las subportadoras compuestas. Cada uno de estos símbolos OFDM contienen un prefijo cíclico cuya longitud es la misma que el CP para datos de símbolos OFDM.

El primer preámbulo en el PHY PDU downlink, y el preámbulo de rango inicial consisten de dos símbolos OFDM consecutivos. El primer símbolo OFDM usa solamente índices de subportadoras los cuales son múltiplo de 4. Como resultado la forma de onda en el dominio de tiempo en el primer símbolo consiste en cuatro repeticiones de 64 fragmentos de muestra precedidos por un CP. El segundo símbolo OFDM utiliza solamente subportadoras pares resultando en estructuras compuestas en el dominio del tiempo de dos repeticiones de 128 fragmentos de muestra precedido por un CP. La estructura en el dominio del tiempo es ejemplificada en la figura 39.

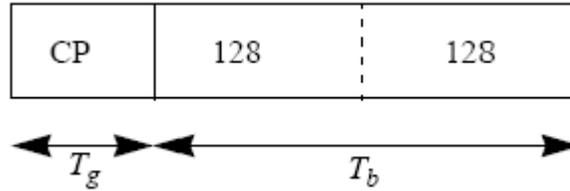
Esta combinación de dos símbolos OFDM está referenciada como de preámbulo largo.

Figura 38. Estructura de preámbulo de entrada para downlink y red



En el uplink cuando la totalidad de los 16 subcanales son usados, el preámbulo de dato, véase la figura 40, consiste en un símbolo OFDM utilizando sólo subportadoras pares. La forma de onda en el dominio del tiempo consiste de dos veces 128 muestras precedidas por un CP.

Figura 39 Estructura de preámbulo para dato uplink



En los burst de downlink que comienzan con un preámbulo y que caen dentro de la región codificada STC, el preámbulo debe ser transmitido desde ambas antenas de transmisión simultáneamente y deben consistir de un símbolo OFDM simple. El preámbulo transmitido desde la primera antena debe usar solamente subportadoras pares.

3.3.7 Estructura de Frame

3.3.7.1 PMP

En las bandas licenciadas el método de duplexión debe ser FDD o TDD. Las SSs FDD pueden ser H-FDD. En las bandas licenciadas exentas, el método de duplexión debe ser TDD. El intervalo de frame contiene transmisiones de la BS y SSs (PHY PDUs), huecos e intervalos de guarda.

El PHY OFDM soporta transmisiones basadas en frame. Un frame consiste de un subframe downlink y un subframe uplink. Un subframe downlink consiste solamente de un PHY PDU downlink. Un subframe uplink consiste de intervalos de contención programados para fluctuación inicial y requerimientos de ancho de banda, y uno o múltiples PHY PDUs, cada uno transmitidos desde diferentes SS.

Un PHY PDU uplink comienza con un preámbulo largo el cual es usado para la sincronización PHY. El preámbulo es seguido por un burst FCH. El burst FCH es un

símbolo OFDM largo y es transmitido usando BPSK $\frac{1}{2}$ con esquema de codificación mandatorio. El FCH contiene prefijo DL_Frame para especificar el esquema burst y la longitud de uno o algunos burst downlink inmediatamente seguidos del FCH. Un mensaje DL-MAP si es transmitido en el frame corriente, debe ser el primer MAC PDU en el burst seguido del FCH. Un mensaje UL-MAP debe inmediatamente seguir a un mensaje DL-MAP (si uno es transmitido) o el DLFP. Si un mensaje UCD y DCD son transmitidos en el frame, deben seguir inmediatamente los mensajes DL-MAP y UL-MAP. Aunque el burst número uno contiene mensajes de broadcast MAC, no es necesario usar la modulación/codificación más robusta. Una modulación/codificación más eficiente puede ser usada si es soportada y aplicable a todas las SSs y BS.

El FCH está seguido por uno o múltiples burst uplink, cada uno transmitidos con diferentes esquemas burst. Cada burst downlink consiste en un número entero de símbolos OFDM. El esquema y dirección del primer burst downlink es especificado en el frame prefijo Downlink (DLFP). La dirección y esquema del máximo número posible de burst subsecuentes debe ser especificado en el DLFP. Por lo menos un DL-MAP entero debe ser difundido en el burst número uno dentro del intervalo Lost DL-MAP. La dirección y esquema de los otros burst están especificados en el DL-MAP. El esquema es especificado en un Rate_ID de 4 bit (para el primer burst DL) o por un DIUC. La codificación DIUC está definida en los mensajes DCD. Los campos HCS ocupan el último byte del DLFP. Si existen IEs en DLFP, el primer IE libre debe poseer todos los campos codificados como ceros. El subframe DL puede contener opcionalmente una zona STC, donde todos los burst DL son codificados STC. Si la zona STC está presente, el último IE usado en DLFP debe tener DIUC igual a cero.

En cada frame TDD (ver figura 41) el TTG y RTG deben ser insertados entre el subframe downlink y uplink y al final de cada frame respectivamente, para permitir que la BS se de vuelta.

Figura 40. Ejemplo de una estructura de frame o FDM con TDD

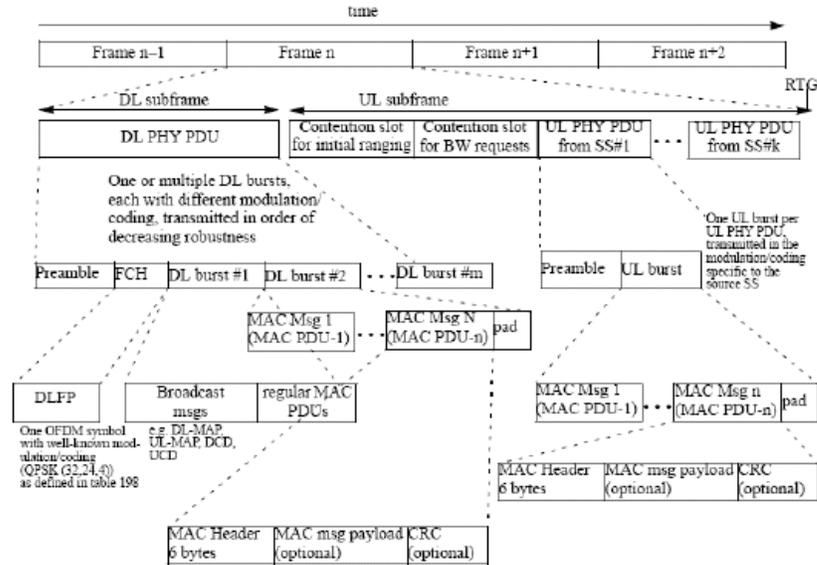
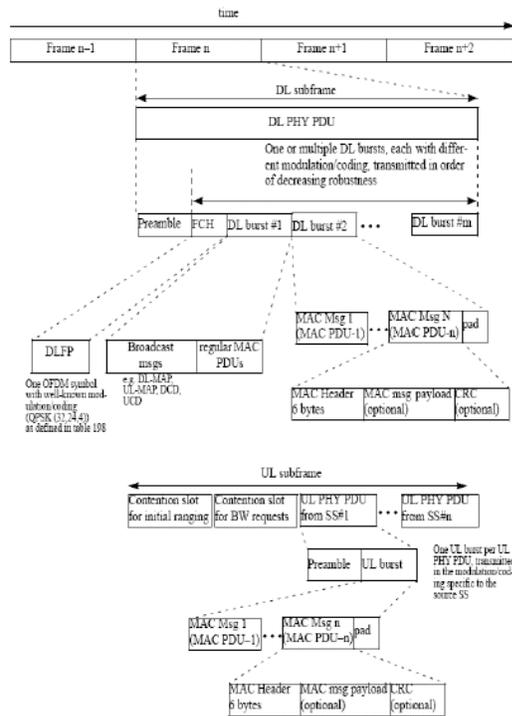


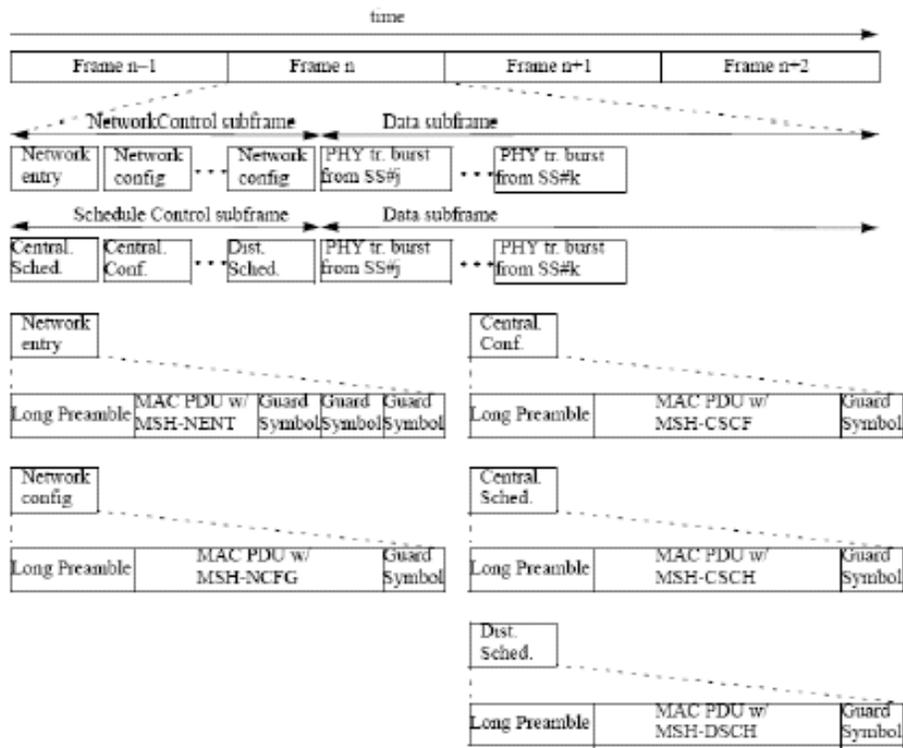
Figura 41. Ejemplo de una estructura de frame o FDM con FDD



3.3.7.2 Mesh

En adición a la estructura de frame PMP descrita en la sección anterior una estructura de frame opcional se encuentra definida para facilitar las redes Mesh, según la figura 42.

Figura 42. Estructura de frame mesh



Un frame Mesh consiste de un subframe de datos y otro de control. El subframe de control brinda dos funciones básicas. Una es la creación y mantenimiento de la cohesión entre los diferentes sistemas denominados “*network control*” en la figura 43. El otro es el esquema coordinado en la transferencia de datos entre sistema denominado “*Schedule control*” en la figura 43. Los frames con subframes de control de red ocurren periódicamente como lo indicado en el descriptor Network.

Todos los otros frames tienen un esquema de control de subframe. La longitud del subframe de control es fija y de una longitud de símbolos OFDM $MSH-CTRL-LEN \times 7$, con $MSHCTRL-LEN$ indicado en el descriptor de red.

Durante un control de red subframe los siete primeros símbolos están asignados por la entrada de red seguidos por $MSH-CTRL-LEN - 1$ sets de siete símbolos para configuración de red.

Durante un control de esquema de subframe el descriptor de red indica que cantidad de mensajes distribuidos de esquema ($MSH-DSCH-NUM$) pueden ocurrir en el control de subframe. El primer símbolo ($MSH-CTRL-LEN - MSH-DSCH-NUM$) * 7 son asignados para burst de transmisión conteniendo PDUs $MSH-CSCH$ y $MSH-CSCF$ donde el remanente es asignado para transmitir burst conteniendo PDU $MSH-DSCH$. El esquema distribuido de mensajes usando preámbulos largos puede ocurrir en los subframe de datos si no están en conflictos con el esquema dictado en el subframe de control. Todas las transmisiones en el control de subframe son enviadas usando QPSK $\frac{1}{2}$ con el esquema de codificación mandatorio. El subframe de datos está dividido en minislots los cuales, con posible excepción del último minislot en el frame, de tamaño máximo $[(OFDM \text{ symbols per frame} - MSH-CTRL-LEN \times 7)/256]$. Una asignación programada consiste de uno o más minislots.

3.3.7.3 Códigos de duración de Frame

La tabla XIII indica la duración específica de frame permitida. La duración de frame usada puede ser determinada por periodicidad de los preámbulos de inicio de frame. Una vez que una duración específica de frame fue seleccionada por la BS, esta no debe ser cambiada. El cambio de la duración de frame debe forzar a todos los SSs a resincronizarse con la BS.

Tabla XIII Códigos de duración de frames OFDM (TF ms)

Code	Frame Duration (ms)	Frames per Second
0	2.5	400
1	4	250
2	5	200
3	8	125
4	10	100
5	12.5	80
6	20	50
7-255	<i>Reserved</i>	

3.3.7.4 Formato de esquema burst

La tabla XIII define el formato del esquema burst downlink, el cual es usado en el mensaje DCD (ver 6.3.2.3.1 de IEEE P802.16-REVd/D4, marzo 2004). El esquema burst downlink está codificado con el tipo 1 con una longitud de 8 bit y una DIUC de 4 bit. El campo DIUC está asociado con el esquema burst downlink y los umbrales. El valor DIUC es usado en el mensaje DL-MAP y en DLFP para especificar en el esquema burst a ser usado por un burst downlink específico.

3.3.8 Mecanismos de control

3.3.8.1 Sincronización

3.3.8.1.1 Sincronización de red

Para realizaciones TDD y FDD es recomendado (pero no requerido) que todas las BS estén sincronizadas en tiempo a una señal común de tiempo. En el caso de pérdida de señal de tiempo de red las BSs pueden continuar operando y deben resincronizarse automáticamente a la señal de tiempo de red cuando esta es recuperada.

La sincronización de referencia debe ser un pulso de 1 pps. Una frecuencia de referencia de 10 MHz también puede ser usada. Estas señales son típicamente provistas por un receptor GPS.

Para realizaciones FDD y TDD las frecuencias de referencia derivadas de una referencia de tiempo pueden ser usadas para controlar la precisión de frecuencia de las BSs provistas que cumplimenten la precisión de frecuencia requerida en 3.4.9. Esto aplica durante la operación normal y durante la pérdida de referencia de tiempo.

3.3.8.1.2 Rango

Hay dos tipos de proceso de rango: el inicial y el periódico. El proceso de rango inicial (sincronización ordinaria) y el de potencia son desarrollados durante las dos fases de operación; durante la re-registración y cuando se pierden la sincronización; y secundariamente durante la transmisión en base periódica. El proceso inicial de rango usa un intervalo basado en contención de rango inicial, el cual requiere un preámbulo largo. El rango periódico usa burst de uplink regular.

Durante la registración un nuevo abonado se registra durante el proceso aleatorio de acceso al canal, y si tiene éxito es entrado en un proceso de rango bajo control de la BS. El proceso de rango es cíclico en naturaleza cuando los parámetros de potencia y de tiempo por defecto son usados para iniciar el proceso seguido por ciclos, donde parámetros recalculados son usados en sucesión hasta que los parámetros cumplen el criterio de aceptación para un nuevo abonado. Estos parámetros son monitoreados, medidos y guardados en la BS, y transmitidos a la unidad de abonado para uso durante el intercambio normal de datos.

Durante el intercambio de dato normal, los parámetros guardados son refrescados en base a una manera periódica en intervalos de refresco configurables para asegurar que los cambios en el canal puedan ser acomodados.

Los intervalos de refresco deben variar de una manera controlada en la unidad de abonado con base a la unidad de abonado. El proceso inicial de rango de transmisión debe usar un preámbulo largo y el esquema de burst mandatorio más robusto.

El proceso de rango en la re-registración sigue el mismo proceso que una nueva registración. Sin importar el tipo de duplexación, la duración apropiada del slot del proceso de rango inicial usado por el sistema inicial de acceso, depende del radio de celda proyectado. El preámbulo largo y el preámbulo subcanalizado deben ser transmitidos usando la misma potencia total. Como resultado la densidad espectral de un preámbulo largo debe ser de alrededor de 12 dB menor que la densidad de potencia espectral de un preámbulo subcanalizado. La BS sólo necesita detectar la energía que es enviada en un subcanal simple y puede responder mediante la registración de un subcanal simple identificando la SS por la oportunidad de transmitir, el número de frame y el subcanal de rango en el cual la transmisión fue recibida.

Una SS intentando el proceso de rango inicial subcanalizado debe usar su máximo seteo de potencia para el burst de rango inicial.

3.3.8.2 Requerimiento de ancho de banda

Puede haber dos tipos de regiones REQ en un frame. Estos dos tipos son REQ Region-Full y REQ Region-Focused. En el REQ Region-Full cuando la subcanalización no está activa cada oportunidad de transmitir debe consistir de un preámbulo corto y un símbolo OFDM usando el esquema de burst mandatorio más robusto.

Cuando la subcanalización está activa la registraci3n es particionada en Oportunidades de Transmisi3n (TOs) en frecuencia y en tiempo. El ancho (en subcanales) y la longitud (en s3mbolos OFDM) de cada oportunidad de transmisi3n es definida en el mensaje UCD definiendo $UIUC = 2$. La transmisi3n de una SS debe contener un pre3mbulo subcanalizado correspondiente al TO elegido, seguido por s3mbolos de datos OFDM usando el esquema de burst mandatario m3s robusto.

En el REQ Region-Focused una estaci3n debe enviar un c3digo corto a trav3s de la oportunidad de transmitir, la cual consiste de 4 subportadoras por dos s3mbolos OFDM. Cada oportunidad de transmitir dentro de un frame debe ser indexada por 3ndices consecutivos de oportunidad de transmitir. La primera ocurrencia de oportunidad de transmitir debe ser indexada a 0. Todas las SSs deben ser capaces de transmisi3n con contenci3n total. La capacidad de transmisi3n con contenci3n focalizada es opcional.

3.3.8.2.1 Selecci3n de par3metros

La SS debe examinar el mensaje UL_MAP para un frame futuro y seleccionar un REQ Region futuro durante el cual realiza su requerimiento. Si la contenci3n focalizada soportada = 1 es retornada por la BS en el mensaje SBC-RSP durante la inicializaci3n de la SS y si la SS soporta contenci3n focalizada puede elegir un REQ Region-Full o REQ Region-Focused. De otra manera debe elegir un REQ Region-Full.

Si la Regi3n REQ elegida es REQ Region-Focused la SS debe tambi3n seleccionar un c3digo de contenci3n de la tabla XIV y similarmente un canal de contenci3n de la tabla XV. El canal de contenci3n debe ser seleccionado de la tabla XIV basado en una selecci3n aleatoria con igual probabilidad entre el grupo de canales de contenci3n posibles que son consistentes con la registraci3n, como lo indicado en la tabla XV.

Los índices -100 a $+100$ en el cuerpo de la tabla XV se refieren a los índices de subportadoras.

El número de códigos de contención que pueden ser usados por una SS que soporta subcanalización es denotado CSE. El código de contención debe ser seleccionado en forma aleatoria con igual probabilidad desde un arreglo de códigos apropiados de la tabla XIV acorde al valor de CSE.

Si la BS soporta subcanalización el último código de contención CSE debe ser usado solamente por SSs que tengan habilitado la subcanalización y que deseen recibir asignaciones subcanalizadas. En respuesta, la BS puede proveer la asignación requerida como una asignación canalizada usando un subcanal 1/16; puede proveer la registración requerida como una registración total (default), o puede proveer no registración después de todo. El valor de CSE es transmitido en los mensajes TLV de canal codificado UCD. El valor por defecto de CSE es 0.

Una BS que soporta contención focalizada puede asignar la región de contención focalizada basada en el BSID, reduciendo la probabilidad de interferencia de SSs en las celdas vecinas y en la misma frecuencia.

Cualquier asignación de región con contención focalizada debe ser restringida a un índice de subcanal par (significando que no es tan estrecho como un subcanal 1/8), proveyendo entre 6 y 48 canales de contención.

Tabla XIV Códigos de contención OFDM

Contention code index	bit 0	bit 1	bit 2	bit 3
0	1	1	1	1
1	1	-1	1	-1
2	1	1	-1	-1
3	1	-1	-1	1
4	-1	-1	-1	-1
5	-1	1	-1	1
6	-1	-1	1	1
7	-1	1	1	-1

Tabla XV Canales de contención OFDM

Contention channel index	frequency offset index 0	frequency offset index 1	frequency offset index 2	frequency offset index 3	Contention Channel belongs to subchannel (See Table 192)
0	-100	-37	1	64	0b00010
1	-99	-36	2	65	0b00010
2	-98	-35	3	66	0b00010
3	-97	-34	4	67	0b00010
4	-96	-33	5	68	0b00010
5	-95	-32	6	69	0b00010
6	-94	-31	7	70	0b00110
7	-93	-30	8	71	0b00110
8	-92	-29	9	72	0b00110
9	-91	-28	10	73	0b00110
10	-90	-27	11	74	0b00110
11	-89	-26	12	75	0b00110
12	-87	-50	14	51	0b01010
13	-86	-49	15	52	0b01010
14	-85	-48	16	53	0b01010
15	-84	-47	17	54	0b01010
16	-83	-46	18	55	0b01010

Tabla XVI Canales de contención OFDM (continuación)

Contention channel index	frequency offset index 0	frequency offset index 1	frequency offset index 2	frequency offset index 3	Contention Channel belongs to subchannel (See Table 192)
17	-82	-45	19	56	0b01010
18	-81	-44	20	57	0b01110
19	-80	-43	21	58	0b01110
20	-79	-42	22	59	0b01110
21	-78	-41	23	60	0b01110
22	-77	-40	24	61	0b01110
23	-76	-39	25	62	0b01110
24	-75	-12	26	89	0b10010
25	-74	-11	27	90	0b10010
26	-73	-10	28	91	0b10010
27	-72	-9	29	92	0b10010
28	-71	-8	30	93	0b10010
29	-70	-7	31	94	0b10010
30	-69	-6	32	95	0b10110
31	-68	-5	33	96	0b10110
32	-67	-4	34	97	0b10110
33	-66	-3	35	98	0b10110
34	-65	-2	36	99	0b10110
35	-64	-1	37	100	0b10110
36	-62	-25	39	76	0b11010
37	-61	-24	40	77	0b11010
38	-60	-23	41	78	0b11010
39	-59	-22	42	79	0b11010
40	-58	-21	43	80	0b11010
41	-57	-20	44	81	0b11010
42	-56	-19	45	82	0b11110
43	-55	-18	46	83	0b11110
44	-54	-17	47	84	0b11110
45	-53	-16	48	85	0b11110
46	-52	-15	49	86	0b11110
47	-51	-14	50	87	0b11110

3.3.8.2.2 Transmisión con contención total

Si la Región REQ elegida es una REQ Región-Full, la SS debe transmitir un preámbulo corto seguido de un encabezado MAC de requerimiento de ancho de banda. Si aparece una registración de contención total en una región subcanalizada, la registración es canalizada en dos oportunidades de transmisión (TOs) ambas en frecuencias y en tiempo. El ancho (en subcanales) y longitud (en símbolos OFDM) de cada oportunidad de transmisión es definida en el mensaje UCD definiendo $UIUC = 2$.

La transmisión de una SS debe contener un preámbulo de subcanalización correspondiente al TO elegido, seguido por símbolo de dato OFDM usando el esquema burst mandatario más robusto.

3.3.8.2.3 Transmisión con contención focalizada

El mecanismo de requerimiento de ancho de banda REQ Región-Focused consiste en dos fases. La fase 1 es cuando una SS requiere ancho de banda y envía una señal a la BS en el uplink TO del REQ Región-Focused identificado por $UIUC = 3$. Un intervalo uplink REQ Región-Focused con $UIUC = 3$ debe ser 4 subportadoras por dos símbolos OFDM.

Control de Potencia

Como el control de frecuencia, el algoritmo de control de potencia debe ser soportado con el canal uplink con calibración inicial y procedimiento periódico de ajuste sin pérdida de dato. El objetivo del algoritmo de control de potencia es llevar la densidad de potencia recibida desde un abonado dado a un nivel deseado.

La densidad de potencia recibida es definida como la potencia total recibida desde un subscriptor dado dividido por el número activo de subportadoras.

Cuando no es empleada la subcanalización, el número de subportadoras activas es igual a todos los abonados y el algoritmo de control de potencia debe entregar la potencia total recibida desde un abonado dado al nivel deseado. La estación base debe ser capaz de proveer mediciones de potencia precisas de las señales de burst recibidas. Este valor puede ser comparado contra un nivel de referencia y el error resultante puede ser reenviado a la SS en un mensaje de calibración proveniente de la MAC. El algoritmo de control de potencia debe ser diseñado para soportar atenuación de potencia debido a la pérdida por distancia o a fluctuaciones de potencia a velocidades de 30 dB/seg con profundidades de por lo menos 10 dB. La implementación exacta del algoritmo es una especificación del fabricante. El rango total de control de potencia consiste en una porción fija y en una porción que es automáticamente controlada por realimentación.

El algoritmo de control de potencia debe tomar en cuenta la interacción del amplificador de potencia de RF con diferentes esquemas de burst. Por ejemplo cuando se cambia de un esquema de burst a otro, los márgenes deben ser mantenidos para prevenir la saturación del amplificador y para prevenir la violación de máscaras de emisiones.

Cuando es empleada subcanalización, la SS debe mantener la misma densidad de potencia transmitida a menos que sea alcanzado el máximo nivel de potencia. Esto es, cuando el número de subcanales activos asignados a un usuario es reducido, la potencia transmitida total debe ser reducida totalmente por la SS, sin mensajes de control de potencia adicionales. Cuando el número de subcanales es incrementando, la potencia total transmitida debe ser incrementada proporcionalmente. Sin embargo el nivel de potencia transmitido no debe exceder el máximo nivel dictado por consideraciones de integridad de señal y requerimientos regulatorios. Las estaciones de abonado deben reportar el máximo de potencia disponible y el nivel normalizado de potencia transmitida.

Las estaciones de abonado deben reportar la máxima potencia disponible y la potencia transmitida actual. Estos parámetros pueden ser usados por la estación base para asignación óptima del esquema de codificación y modulación y también para asignación óptima de subcanales. El algoritmo es especificado por el fabricante. Estos parámetros son reportados en un mensaje SBC-REQ. La potencia transmitida actual debe ser reportada en un mensaje REQRSP si la bandera relevante en el mensaje REP-REQ ha sido seteado.

La potencia transmitida actual es la potencia del burst que transporta el mensaje. La máxima potencia disponible es reportada por las constelaciones BPSK, QPSK, 16-QAM y 64-QAM. La potencia transmitida actual y los parámetros de máxima potencia son reportados en dBm. Los parámetros son cuantizados en pasos de 0.5 dBm en un rango que va de -64 dBm a 63.5 dBm.

Valores fuera de este rango deben ser asignados a extremos cercanos. Las SSs que no soportan QAM 64 deben reportar el valor 0x00 en el máximo campo de potencia QAM 64.

3.3.9 Mediciones de calidad de canal

Las señales de medición de calidad RSSI y CINR y estadísticas asociadas pueden ayudar en procesos como selección/asignación de BS y selección de esquemas de burst adaptativos. Como la conducta de un canal es variante en el tiempo son definidas la desviación estándar y promedio. La implementación de estadística RSSI, CIRN, y sus reportes es mandatorio.

El proceso mediante el cual son tomadas las mediciones RSSI no necesariamente requieren bloqueo de demodulación del receptor; por esta razón las mediciones de RSSI ofrecen razonablemente evaluaciones de fuerza de canal confiables incluso a bajos niveles de señal. De otra manera aunque las mediciones CINR requieren bloqueo del receptor, estas proveen información de las condiciones de operaciones actuales del receptor, incluyendo interferencias y niveles de ruido y nivel de señal.

3.3.10 Requerimientos de frecuencia y timing

En la BS las frecuencias central transmitida, frecuencias central recibida y la frecuencia de reloj de símbolo debe ser derivada desde el mismo oscilador de referencia. En la BS la tolerancia de frecuencia de referencia debe ser ± 8 ppm en bandas licenciadas hasta 10 años desde la fecha de fabricación del equipamiento. En la SS la frecuencia central de transmisión y la referencia de reloj de símbolo deben ser sincronizadas y bloqueadas a la BS con una tolerancia de un máximo del 2 % del espaciamiento de subportadoras.

Para dispositivos que soportan Mesh todos los dispositivos deben tener ± 20 ppm de tolerancia máxima de frecuencia y lograr sincronización a sus nodos vecinos con una tolerancia de un máximo del 3 % del espaciamiento de subportadora. Durante el periodo de sincronización, la SS debe adquirir sincronización de frecuencia dentro de la tolerancia especificada antes de intentar cualquier transmisión uplink. Durante la operación normal la SS debe rastrear los cambios de frecuencias y debe diferir cualquier transmisión si se pierde la sincronización.

4 ANÁLISIS TÉCNICO Y ECONÓMICO PARA LA IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA WIMAX 802.16, EN EL ÁREA METROPOLITANA DE GUATEMALA.

4.1 Análisis técnico de la implementación del sistema Wimax 802.16

4.1.1 Visión de la red implementada Wimax.

Uno de los objetivos más grandes que se pretenden alcanzar con WiMAX es mejorar en movilidad. Wi Fi fué una primera aproximación pero la verdadera movilidad se tendrá con Wi Max.

En lo que se refiere al alcance; estamos hablando de kilómetros a diferencia de Wi Fi que son metros; con WiMAX estamos hablando teóricamente de unos cincuenta kilómetros; en la práctica eso es posible siempre y cuando se logre que las dos antenas se vean la una a la otra, que haya línea de vista. Ese es el máximo posible, el típico de celda puede llegar a ser de cinco kilómetros aproximadamente.

Es una distancia grande, hoy en telefonía celular no se tiene una distancia de más de cinco kilómetros entre un teléfono y una celda, en promedio y éste, lo que busca, es más o menos ajustarse a eso. Pero las tecnologías inalámbricas que tienen ese alcance dan un ancho de banda que es irrisorio, estamos hablando de Kilobits (miles) por segundo y con WiMAX estamos hablando de Megabits (millones) por segundo.

Y la tercera característica importante es justamente esa, ancho de banda; la primera es estándar global, la segunda, cobertura, distancia entre los equipos y la tercera ancho de banda.

El principal aporte es que WiMAX aumentará los niveles de penetración de banda ancha, sobretodo en Guatemala ya que la penetración es tan baja.

Con WiMAX eso puede cambiar radicalmente, porque se pueden iluminar con señal WiMAX la Metrópoli entera obteniendo que cualquier persona pueda acceder a banda ancha; ya no dependeremos que haya disponibilidad de líneas DSL o de cable o de fibra, sino que virtualmente cualquier persona podría acceder.

La visión con WiMAX es precisamente aumentar la cobertura de banda ancha a nivel Metropolitano y Nacional; en el año 2008 ya se contabilizaron aproximadamente un millón conectados a Internet. Con WiMAX lo que se pretende es llegar a los 3 millones en el año 2010 en toda Guatemala.

Una radio base que es la que cubre todo una zona con niveles de disponibilidad de servicio suficientemente sólidos está costando alrededor de los **60 mil dólares**; por supuesto, encuentras equipos desde los **20 o 30 mil dólares**, pero una radio base orientada a una “telco”, una compañía que tiene que ofrecer unos niveles de servicio mínimos, entonces son 60 mil dólares que cubren una zona de dos kilómetros de radio.

En una ciudad pequeña, con pocas radio bases se puede tener cobertura completa; pero en ciudades grandes toca poner muchas más radio bases; ese es uno de los parámetros claves a la hora de tener en cuenta al armar el modelo de negocios.

El otro parámetro, que es finalmente el más importante de todos, es el costo de los modems. Estamos con una tecnología que está hasta ahora penetrando el mercado; por lo tanto, los volúmenes de manufactura no son los más altos y los costos unitarios no son los mejores. Un modem a estas alturas puede estar costando en la franja de los **800 dólares** aproximadamente.

Eso fue lo que ocurrió con Wi Fi. En la medida en que se logró manufactura en masa, los costos de los *acces point* pasaron de 1000 dólares a 50 dólares en menos de una década. Es el parámetro más importante para una empresa de telecomunicaciones porque el volumen incremental está allí; si se tiene que multiplicar 300 dólares por cinco

mil, diez mil o cincuenta mil usuarios, esto termina siendo al variable más crítica desde el punto de vista financiero.

Otro factor que entra a incidir a la hora de hacer el cálculo del modelamiento del negocio es el tipo de módems, los hay indoor (lo instalo dentro de la casa) y hay otros que son outdoor, que requieren la antena externa.

Los indoor tienen un alcance de entre uno y dos kilómetros aproximadamente, los outdoor pueden llegar a los cinco kilómetros. Eso impacta el modelo de negocio en que, entre más pequeña sea la cobertura (de cada celda), se tendrá que poner más radio bases.

El retorno de inversión por supuesto está allí, la penetración de Internet en países como Guatemala es tan baja que la oportunidad es muy grande en realidad, los niveles de crecimiento que se están teniendo son altísimos y la oportunidad es muy grande.

Después de WiMAX fijo

La banda ancha es el mejor mecanismo que tienen las Empresas de Telecomunicaciones para mejorar el ingreso promedio por usuario, y más adelante, ya se vendrá el tema de los 2,5 Gigas, donde la cosa se pone aun más interesante porque se podrá tener en algún momento en los próximos dos o tres años un celular con WiMAX conectado a la red o una PDA o un teléfono inteligente o un portátil.

Está diseñado para la movilidad, porque eso exige técnicamente algunas cosas que no son soportadas por la generación actual que es WiMAX fijo; ese escenario de la verdadera movilidad va a representar una gran revolución en materia de conectividad.

Las ventajas de WiMAX sobre 3G

WiMAX móvil seguramente va a ofrecer un mejor ancho de banda. Además, es un estándar global. Eso significa que no hay que estar pagándole regalías a compañías telefónicas, (en telefonía celular muchos operadores tienen que pagar unas regalías onerosas). Acá lo que se busca es que sea un estándar de facto, un estándar de industria donde no haya que pagar regalías y eso hace que el costo del servicio para el usuario al final del día sea más económico.

Aportación de la banda ancha al desarrollo de Guatemala

Un estudiante de secundaria le escribía a algún profesor de otra nación agradeciéndole por ayudarlo a pasar física. El estudiante vió un video que éste profesor publicó en Internet en uno de esos sitios que aloja video y finalmente entendió cómo era que reaccionaba el sodio bajo determinadas circunstancias.

Este estudiante lo pudo hacer porque tenía banda ancha, porque tenía acceso a toda esa información, resulta que en Guatemala, nuestros estudiantes de secundaria, rara vez tienen acceso a esa información. Ese ejemplo ilustra claramente la diferencia que hay entre educarse con acceso a la banda ancha que es virtualmente educarse con acceso al planeta entero y educarse sin acceso a la banda ancha.

Internet es fundamental para el desarrollo de cualquier sociedad hoy por hoy; pero no es suficiente con el acceso de Internet. Es Internet más la banda ancha, porque sin banda ancha la gente aborta cualquier conexión telefónica en cuestión de minutos.

WiMAX es una tecnología que viene, una promesa muy sólida en cuanto a anchos de banda y en cuanto a costos, que son dos variables cruciales para mejorar la penetración de banda ancha en la región.

4.1.2 Pasos para la implementación del sistema Wimax, en área metropolitana de Guatemala.

Planeación de radio frecuencia

Para este estudio se han contemplado 6 nodos para completar la cobertura del Área Metropolitana. Debemos tomar en consideración los siguientes puntos para realizar una buena planeación de Radio Frecuencia:

Frecuencias

Uno de los puntos más importantes a considerar en un análisis es la Frecuencia ya que de ésta depende el funcionamiento de todo el sistema y es uno de los recursos más caros. Se requiere un mínimo de espectro de RF (Radio Frecuencia) de 60MHz; por ejemplo, si es en la banda 3.6GHz podríamos tener el siguiente rango 3625MHz hasta 3685MHz.

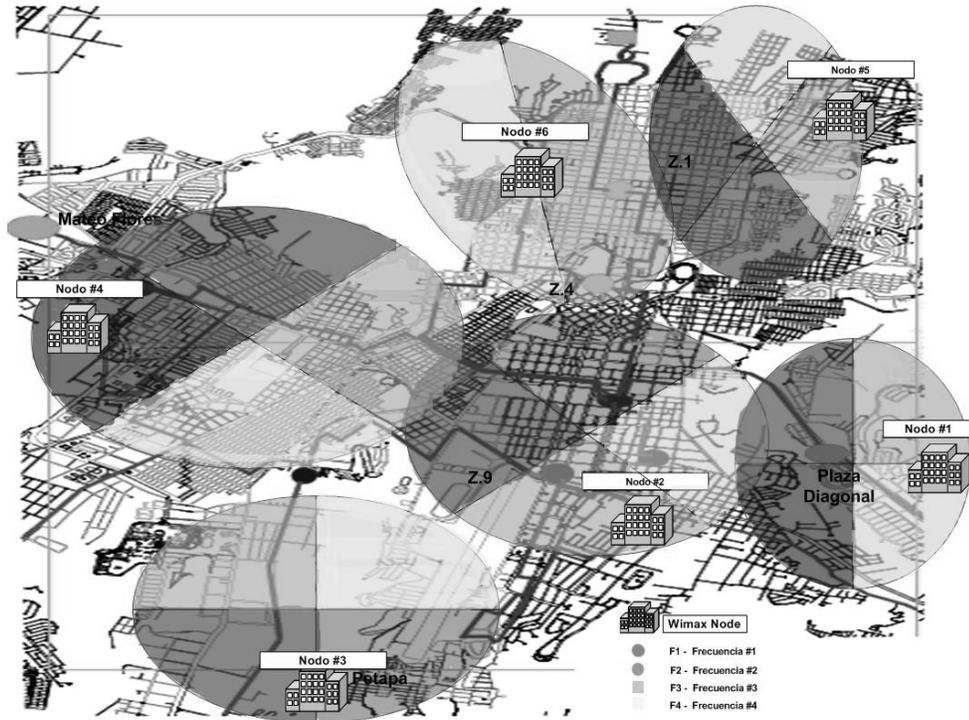
Existen 3 opciones para operar las frecuencias:

- Compra en la SIT (Superintendencia de Telecomunicaciones).
- Renta de las frecuencias a un tercero.
- Efectuar el proyecto en bandas NO Licenciadas (2.4GHz y 5.8GHz).

Distribución de las frecuencias

Debido a que se requiere evitar interferencia provocadas por nuestras propias frecuencias de operación, es necesario distribuir las frecuencias de manera adecuada como se puede observar en la figura 43.

Figura 43. Distribución de frecuencias en el área metropolitana de Guatemala



Existen dos formas para la utilización de las frecuencias:

FDD: Duplexación de división de frecuencia

En FDD se utiliza un canal de frecuencia de Bajada (*Downstream*) y un canal de frecuencia de subida (*Upstream*). En esta configuración podemos obtener simetría de Ancho de Banda. Una desventaja es que necesitamos más espectro de frecuencia

TDD: Dúplex por división de tiempo

En TDD se utiliza un mismo canal de Frecuencia para Bajada y Subida; en este caso el Ancho de Banda no es simétrico ya que tendremos mayor Ancho de Banda de Bajada que de Subida, aproximadamente en la relación 100:60. Una ventaja es que necesitamos menos espectro de frecuencia para operar.

Orientación de antenas

Debido a la geografía del área metropolitana de Guatemala es necesario tomar en consideración la orientación de las antenas, tanto horizontal como vertical. También hay que realizar un buen estudio de mercado para determinar la densidad de clientes para la región metropolitana.

Distribución de ancho de banda

Una vez se haya elaborado el estudio de mercado podemos tener una proyección de acuerdo al ancho de banda que se utilizaría por nodo, dependerá de las especificaciones de los fabricantes ya que las antenas sectoriales tienen un promedio de cobertura en la vida real de 10Mbps ~ 15Mbps. El número de sectores a instalar en un nodo está en función directa con la densidad de clientes que se quiere cubrir, por ejemplo:

Si tenemos un área donde debido a la densidad de clientes se requiera un Ancho de Banda de 30Mbps sería necesario instalar un sector con 3 antenas; hay que recordar que por cada antena se va a requerir un canal de frecuencia adicional si es TDD y 2 canales de frecuencia si es FDD.

Consideraciones climáticas

La región metropolitana de Guatemala está considerada como un país tropical debido a la precipitación de lluvia que se tiene por temporada (Mayo-Agosto). Dentro de los estándares está catalogada como una región P; esto implica que la cantidad de lluvia que se haga presente en el patrón de radiación afectará el enlace entre el Nodo y el Cliente.

Los fabricantes diseñan los equipos en función de la interferencia por lluvia, la frecuencia y la potencia y toman en consideración una caída por desvanecimiento en sus transmisores, por ejemplo:

Nivel Optimo de Recepción -65dB

Caída del Enlace -90dB

Umbral de Desvanecimiento por lluvia 10dB

Para este caso en específico el nivel mínimo de cada uno de los enlaces deberá ser de -80dB, cualquier enlace que se encuentre por debajo de ese nivel no deberá ser aceptado ya que cuando llueva el enlace está fuera de servicio.

4.1.3 Nuevos servicios implementados.

- **Internet.**

WiMAX proporciona acceso a Internet de alta velocidad en un rango de cobertura de varios kilómetros de radio. En teoría, WiMAX proporciona velocidades de aproximadamente 70 Mbps en un rango de 50 kilómetros. El estándar WiMAX tiene la ventaja de permitir conexiones inalámbricas entre un transceptor de la estación base (BTS) y miles de abonados sin que éstos tengan que estar en línea de

visibilidad (LOS) directa con esa estación. Esta tecnología se denomina NLOS que significa sin línea de visibilidad. En realidad, WiMAX sólo puede eludir obstáculos pequeños, como árboles o una casa y no puede atravesar montañas ni edificios altos. Cuando se presentan obstáculos, el rendimiento total real puede ser inferior a 20 Mbps.

- **Broadcast TV.**

Broadcast TV son señales de audio y vídeo transmitida por el aire las ondas de un motivo basado en el transmisor. Estas señales son generalmente libres de tomar y están en espectros de frecuencia específica.

- **Telefonia privada (Switching de Telefonía).**

- **Empresas interconectadas en todas las sucursales de una gran ciudad sin cables.**

- **Pasarela para sistemas de pago en áreas muy grandes.**

- **Transmisión de contenidos de banda ancha para cine digital (de un Emisor a todos los cines de una ciudad).**

- **Voz sobre IP para una empresa.**

El VoIP permite la segmentación del mensaje vocal en una serie de paquetes IP que pueden viajar a través de la red para después ser reagrupados para la conversación sea ininterrumpida. Las redes inalámbricas, que han permitido la comunicación vocal costo-efectiva, se extenderán por medio de una red IP hasta las comunidades que no tienen conexión, lo cual pondrá en peligro los potenciales mercados de los operadores de telecomunicación preexistentes. Tal como sucede con la telefonía móvil, el VoIP podrá

ofrecer la capacidad de mantener conversaciones en tiempo real. El VoIP tiene muchas más probabilidades de obtener una fuente sostenible de financiación que muchas otras aplicaciones, en especial en las áreas rurales donde el uso de otros servicios inicialmente puede estar limitado por la falta de conocimiento de su existencia por parte de los habitantes.

4.2 Análisis económico de la implementación del sistema Wimax 802.16

Todas las empresas buscan aumentar su rentabilidad para poder competir en el mercado y ofrecerle al cliente un mejor servicio. Para poder competir en el mundo tan cambiante de las telecomunicaciones hay que realizar constantemente cambios, caminar al paso de los avances tecnológicos, y brindar un mejor desempeño en los servicios. Cualquier empresa que desee realizar cambios necesita hacer una inversión de capital que permita implementar nuevos servicios.

4.2.1 Ventajas económicas de Wimax

Conectividad más barata

El costo para proveer acceso a redes de comunicación vocal y de datos utilizando tecnologías inalámbricas, aún en áreas rurales, se acerca a US\$300 por abonado, en comparación con los US\$1.000 de las fibras ópticas o el cobre en áreas urbanas, sin que deba renunciarse a la calidad ni la transmisión. Mientras que las fibras ópticas y el cobre cuestan, en general, entre US\$20.000 y US\$40.000 por kilómetro de conectividad, se pueden suministrar centenares de kilómetros de conectividad por US\$50.000.

Esta ventaja económica, que continuará aumentando a medida que las tecnologías inalámbricas son utilizadas cada vez más en el mundo, puede ser usada para conectar áreas metropolitanas de manera costo-efectiva y hasta autosostenible.

Conectividad autosostenible

Las compañías de telecomunicación han sido históricamente subvencionadas o han tenido temporalmente el monopolio sobre los consumidores con el fin de amortizar los costos fijos de la infraestructura de comunicación. Dado esa situación, no se había pensado que la infraestructura de telecomunicación podría mantenerse a sí misma. Con la tecnología WiMAX se pueden alcanzar ganancias considerables que hacen que la condición de las empresas llegue a ser autosostenible.

4.2.2 Estudio financiero

La parte fundamental de esta parte del estudio es la matriz financiera que incluye los gastos como inversión y los ingresos por los beneficios y servicios que genera el proyecto. Esta matriz permite encontrar los parámetros de decisión: el Valor Actual Neto (VAN) y la Tasa Interna de Retorno (TIR). Se ha tomado en cuenta el valor del dinero en el tiempo suponiendo una tasa de ganancia durante 5 años del 10% no acumulativa que es el porcentaje típico de pago anual por bancos locales o tasa interna aceptable. Para poder decidir si el proyecto es económicamente viable, el criterio de decisión será:

- Que el Valor Actual Neto (VAN) calculado en la matriz financiera deberá ser mayor o igual a cero.
- Que la Tasa Interna de Retorno (TIR) calculada en la matriz financiera sea mayor que la tasa interna aceptable.
- Que la relación Beneficio/Costo sea igual o mayor a cero.

Sí estos criterios se cumplen significa que el proyecto deja ganancias considerables.

Tabla XVII MATRIZ FINANCIERA

MATRIZ FINANCIERA

		Períodos					
Costos	Descripción	0	1	2	3	4	5
Costos de Construcción del Sistema	6 x Estación Base Wimax	\$311,214.00					
	Costo CPE Equipo Cliente	\$330,000.00	\$247,500.00	\$206,250.00	\$206,250.00	\$123,750.00	
	Software y Licencias	\$18,018.00					
	Capacitación a los Instaladores	\$10,000.00			\$8,000.00		
	Sistema de Gestión	\$20,000.00					
	Costos de Comunicación (Fibra Sectores)	\$50,000.00	\$50,000.00	\$50,000.00	\$50,000.00	\$50,000.00	\$50,000.00
Costos de Instalación	Capacitación del Usuario	\$10,000.00			\$8,000.00		
	Instalación y Configuración de Equipos	\$45,000.00	\$40,000.00	\$20,000.00	\$20,000.00	\$15,000.00	\$5,000.00
	Costo de Pruebas	\$5,000.00					
	Otros gastos de Instalación	\$5,000.00					
Costos de Operación y Mantenimiento	Mantenimiento Preventivo y Soporte de Equipos		\$5,000.00	\$5,000.00	\$10,000.00	\$5,000.00	\$5,000.00
	Reparación y Repuesto de Equipos		\$5,000.00	\$5,000.00	\$5,000.00	\$5,000.00	\$5,000.00
	Actualización de Software de Equipos		\$3,000.00	\$3,000.00	\$6,000.00	\$3,000.00	\$3,000.00
	Otras Instalaciones		\$3,000.00	\$3,000.00	\$3,000.00	\$3,000.00	\$3,000.00
	Recurso Humano	\$7,000.00	\$7,000.00	\$7,000.00	\$5,000.00	\$5,000.00	\$3,000.00
TOTAL INVERSION		\$811,232.00	\$360,500.00	\$299,250.00	\$321,250.00	\$209,750.00	\$74,000.00
Beneficios	Descripción	0	1	2	3	4	5
Beneficios Tangibles	Fácil Aprovechamiento		\$25,000.00	\$15,000.00	\$10,000.00	\$7,000.00	\$5,000.00
	Facilidad de Implementación y Crecimiento		\$50,000.00	\$45,000.00	\$45,000.00	\$30,000.00	\$25,000.00
	Ahorro en Costos de Operación y Mantenimiento		\$10,000.00	\$10,000.00	\$8,000.00	\$7,000.00	\$6,000.00
	Ahorro en Equipos e Infraestructura		\$150,000.00	\$140,000.00	\$125,000.00	\$100,000.00	\$75,000.00
Beneficios Estratégicos	Implementación de Nuevos Servicios		\$10,000.00	\$10,000.00	\$8,000.00	\$70,000.00	\$5,000.00
	Incursión en Nuevos Mercados		\$10,000.00	\$10,000.00	\$8,000.00	\$5,000.00	\$5,000.00
	Diversificación de Productos		\$15,000.00	\$10,000.00	\$10,000.00	\$7,500.00	\$5,000.00
	Atracción de Nuevos Clientes		\$20,000.00	\$25,000.00	\$30,000.00	\$25,000.00	\$20,000.00
	Ampliación de Volumen de Operación y Crecimiento		\$40,000.00	\$45,000.00	\$50,000.00	\$40,000.00	\$35,000.00
Proyección de Ventas			\$300,000.00	\$275,000.00	\$275,000.00	\$250,000.00	\$200,000.00
BENEFICIOS TOTALES			\$630,000.00	\$585,000.00	\$569,000.00	\$541,500.00	\$381,000.00
FLUJO NETO EFECTIVO		-\$811,232.00	\$269,500.00	\$285,750.00	\$247,750.00	\$331,750.00	\$307,000.00

4.2.3 Valor Actual Neto (VAN)

Tomando como referencia la Matriz Financiera calculamos el VAN.

Tabla XVIII Cálculo del valor actual neto

Flujo Neto de Efectivo suponiendo el 10% de Interés Anual	
Año 0	-\$811,232.00
Año 1	\$269,500.00
Año 2	\$285,750.00
Año 3	\$247,750.00
Año 4	\$331,750.00
Año 5	\$307,000.00
VAN	\$273,275.83

Según este criterio es aceptable y factible económicamente.

4.2.4 Tasa Interna de Retorno (TIR)

Si tomamos en cuenta la Matriz Financiera podemos calcular el TIR.

Tabla XIX Cálculo de la tasa interna de retorno

Flujo Neto de Efectivo suponiendo el 10% de Interés Anual	
Año 0	-\$811,232.00
Año 1	\$269,500.00
Año 2	\$285,750.00
Año 3	\$247,750.00
Año 4	\$331,750.00
Año 5	\$307,000.00
TIR	22.08%

Según este criterio, la Tasa Interna de Retorno es de 22% mayor que la tasa mínima aceptable (10%) que se tomo para este proyecto, por lo tanto el proyecto es aceptable y factible económicamente.

4.2.5 Punto de Equilibrio

Tomando como referencia la Matriz Financiera se calcula el Punto de Equilibrio

Tabla XX Cálculo del punto de equilibrio

Flujo Neto de Efectivo suponiendo el 10% de Interés Anual	
Año 0	-\$811,232.00
Año 1	\$269,500.00
Año 2	\$285,750.00
Año 3	\$247,750.00
Año 4	\$331,750.00
Año 5	\$307,000.00
PE	2.81
	2 años 9 meses

Según el cálculo anterior, la inversión se recuperará en 2.81 años o sea 2 años y 9 meses aproximadamente.

4.2.6 Análisis costo-beneficio

Uno de los puntos importantes en la decisión del nivel tecnológico a implementar en cada una de las actividades, es la relación COSTO-BENEFICIO que arroja cada una de ellas. Esta relación manifiesta la diferencia económica que surge entre el paquete tecnológico aplicado y los rendimientos físicos proyectados u obtenidos en las producciones evaluadas. La planificación consciente y racional de las actividades, debe ser una estrategia fundamental y constante en las empresas eficientes. El desarrollo de planes de producción, significa la posibilidad de relacionar las actividades entre sí, con un fin predeterminado, creando la sinergia adecuada a cada sistema productivo.

Sabiendo que, nunca los máximos rendimientos se corresponden con las máximas ganancias, es que debemos precisar cual es la máxima ganancia posible en cada actividad, para lo cual la determinación de la relación COSTO-BENEFICIO es imprescindible. Tomando como referencia la Matriz Financiera podemos calcular la Relación Costo / Beneficio de la siguiente manera:

Tabla XXI Cálculo relación costo/beneficio

	Inversion	Ingresos
Periodo	Suponiendo 10% de Interes Anual	
Año 0	\$811,232.00	\$0.00
Año 1	\$360,500.00	\$630,000.00
Año 2	\$299,250.00	\$585,000.00
Año 3	\$321,250.00	\$569,000.00
Año 4	\$209,750.00	\$541,500.00
Año 5	\$74,000.00	\$381,000.00
VAN	\$1,816,843.45	\$2,248,975.69
Beneficio / Costo		1.24

Según este criterio la Relación Beneficio / Costo es mayor a cero, lo que nos lleva a la conclusión de que los beneficios del proyecto son mayores que los costos y esto lo hace económicamente viable. Se puede ver en los cálculos anteriores que se cumplen los criterios de decisión que citamos al principio del estudio financiero:

- El Valor Actual Neto \$273,275.83 es mayor a cero.
- La Tasa Interna de Retorno de 22.08% es mayor a la Tasa Interna Aceptable 10%.
- La relación Beneficio / Costo 1.24 es mayor a cero.

En base a lo anterior podemos concluir que el proyecto es económicamente viable y que deja una ganancia considerable; la recuperación de la inversión según las ganancias anuales se calcula en 2.81 años o sea 2 años y 9 meses.

CONCLUSIONES

1. Las tecnologías de banda ancha inalámbrica de alta velocidad basadas en el estándar IEEE 802.16 prometen abrir oportunidades de mercado económicamente viables para operadores, proveedores de servicio de Internet inalámbrico y fabricantes de equipamiento. La flexibilidad de la tecnología inalámbrica, combinada con la alta velocidad, escalabilidad, alto alcance y funciones de calidad de servicio del estándar IEEE 802.16 ayudarán a llenar los vacíos de cobertura de banda ancha en la red metropolitana y alcanzar miles de nuevos clientes residenciales y de negocios en Guatemala; por tal razón es un fuerte competidor para compañías de cable y proveedores de ADSL.
2. WiMAX permite implementar redes cuya cobertura es de casi un centenar de kilómetros, lo que la convierte en candidata ideal para montar estas redes metropolitanas, así como para llevar el acceso a Internet a lugares alejados de las ciudades donde sencillamente no existe la opción del acceso cableado o no es rentable.
3. WiMAX está llamada a ser la sucesora del WiFi pero a gran escala. Las conexiones WiFi se idearon con el objetivo puesto en eliminar los cables dentro de una oficina, una casa o un local no muy grande. Debido a su popularidad su uso se ha ido extendiendo y se han intentado usar para montar lo que se conocen como redes metropolitanas.
4. WiMAX será de mucho beneficio para muchas empresas que usan diversas tecnologías para la transmisión de información, ya que facilitará de modo significativo la migración e implementación de nuevos servicios en el área metropolitana de Guatemala.

RECOMENDACIONES

1. Se necesita realizar un buen análisis de Radio Frecuencia, para determinar que las frecuencias a utilizar estén libres y así evitar interferencias posteriores que pudieran afectar el funcionamiento de la red WiMAX.
2. Si queremos lograr un buen desempeño de la red se debe hacer pruebas previas sobre parámetros como ancho de banda, latencia, cobertura, etc., ya que de esta manera lograremos ajustar los requerimientos de la red que deseamos implementar.
3. Contar con equipos de medición para espectro radioeléctrico y cableados para resolución de problemas del sistema ya en funcionamiento.
4. Siempre es bueno que la empresa proveedora cuente con un mapa digitalizado de la ciudad en donde se va instalar WiMAX, para facilitar la planeación de instalación de nuevos nodos.
5. Es de gran importancia contar con un buen sistema de tierras, tanto en nodos como en sitio de cliente para prevenir fallas irreparables y aumentar la vida útil del equipamiento.

BIBLIOGRAFÍA

1. Itzik Kitroser (IEEE P802.16-REVd Chief Technical Editor), **Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems** (Draft Revision), Año 2004.
2. Wimax < <http://es.wikipedia.org> > Año 2005.
3. Frank Ohrtman **Wimax Handbook Building 802-16 Wireless Networks** – Año 2005.
4. INTEL Corporation , White Paper: **Broadband Wireless Access** – Año 2003.
5. Eugene Crozier , White Paper: **WiMAX NLOS Features, WiMax Forum** – Año 2004.
6. Michael F. Finneran, **WiMax versus Wi-Fi**, dBrn Associates Inc., Año 2004.