

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA



**ESTUDIO COMPARATIVO DE DESEMPEÑO ENTRE EL
PROTOCOLO IEEE 802.11b Y EL PROTOCOLO IEEE 802.16a EN
UN ESCENARIO EXTERNO**

INFORME DE SUFICIENCIA

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO ELECTRÓNICO

PRESENTADO POR:

MARCO TULIO HOLGUÍN TAPIA

**PROMOCIÓN
1999 – I**

**LIMA – PERÚ
2006**

**ESTUDIO COMPARATIVO DE DESEMPEÑO ENTRE EL PROTOCOLO IEEE
802.11b Y EL PROTOCOLO IEEE 802.16a EN UN ESCENARIO EXTERNO.**

*Dedico este trabajo a:
Mi madre, inspiración plena de lucha y
sacrificio.*

SUMARIO

Este trabajo presenta el estudio comparativo del funcionamiento a nivel de acceso al medio de los estándares IEEE 802.11 [1] e IEEE 802.16 [2]. Para el caso del protocolo IEEE 802.11, este análisis se centra en el método alternativo de acceso al medio descrito en el estándar, el cual es denominado Point Coordination Function, PCF – Función de Coordinación Puntual, mientras que para el estándar IEEE 802.16 el análisis es de carácter general. Dado el creciente aumento en la demanda por Internet de banda ancha, y el surgimiento del nuevo estándar IEEE 802.16 que regula el acceso inalámbrico de banda ancha, es de vital importancia el poder definir con precisión el desempeño que este estándar logrará comparándolo con su rival mas fuerte, el conocido y bastante estudiado IEEE 802.11. En este estudio se reproducen y analizan los resultados obtenidos por [3] sobre el Distributed Coordination Function, DCF – Función de Coordinación Distribuida. Para el caso de PCF, se presenta una modificación al modelo propuesto por [4] lo cual permite mejorar la precisión de dicho modelo.

Para el estándar IEEE 802.16, se presenta un nuevo modelo básico que describe el funcionamiento del protocolo.

El objetivo final del presente estudio es realizar un análisis comparativo de rendimiento a nivel de acceso al medio entre los estándares IEEE 802.11 e IEEE 802.16.

ÍNDICE

PROLOGO

CAPÍTULO I

EL ESTANDAR IEEE 802.11

1.1	Introducción.	3
1.1.1	Capa Física (PHysical LaYer – PHY).	3
1.1.2	Subcapa de Control de Acceso al Medio (Médium Access Control, MAC).	4
1.1.3	Capas Superiores.	4
1.2	Generalidades sobre Redes de Área Local Inalámbricas.	5
1.2.1	Definición de Red de Área Local Inalámbrica.	5
1.2.2	Aplicaciones de los Sistemas WLAN.	6
1.2.3	Configuraciones WLAN.	6
1.3	Nivel Físico. Arquitectura y Tecnologías de Modulación.	9
1.3.1	Arquitectura de Capas 802.11.	9
1.3.2	Tecnologías utilizadas en las Redes Inalámbricas.	10

CAPÍTULO II

EL ESTANDAR IEEE 802.16

2.1	Introducción.	15
2.2	Generalidades.	17
2.3	Aplicaciones.	18
2.4.1	Enlaces Celda-Switch (Backhaul) Celular.	19
2.4.2	Ancho de Banda bajo demanda.	19
2.4.3	Banda Ancha Residencial.	20
2.4.4	Áreas no cubiertas.	20
2.4.5	Servicios Inalámbricos Mejor Conectados.	21
2.4	Principales Características: Tasa de Transferencia, Escalabilidad, Calidad de	

Servicio y Seguridad.	22
2.4.1 Tasa de Transferencia.	22
2.4.2 Escalabilidad.	22
2.4.3 Cobertura.	23
2.4.4 Calidad de Servicio.	23
2.4.5 Seguridad.	23
2.5 Propagación y Técnicas de Modulación para Wimax.	24
2.5.1 Introducción.	24
2.5.2 Propagación NLOS Vs. LOS.	25
2.5.3 Soluciones Tecnológicas NLOS.	27
2.5.4 Modelos de Propagación NLOS.	33
2.5.5 Modelos SUI (Stanford University Interim).	34
2.5.6 Probabilidad de Predicción de Cobertura.	34
2.5.7 Rango de cobertura WiMAX.	35

CAPÍTULO III

EL CONTROL DE ACCESO AL MEDIO EN 802.11

3.1 Introducción.	37
3.2 Función de Coordinación Distribuida (Distributed Control Function, DCF).	37
3.3 Función de Coordinación Puntual (Point Coordination Function, PCF).	38

CAPÍTULO IV

EL CONTROL DE ACCESO AL MEDIO EN 802.16

4.1 Introducción.	43
4.2 Unidad Básica de Comunicación.	43
4.3 Frequency Division Duplex.	47
4.4 Time Division Duplex.	47
4.4.1 Downlink Subframe.	48
4.4.2 Uplink Subframe.	49

CAPÍTULO V

MODELOS ANALÍTICOS.

5.1 Modelos Teóricos.	51
5.1.1 Función de Coordinación Distribuida (Distributed Coordination Function, DCF).	51

5.1.2 Función de Coordinación Puntual (Point Coordination Function, PCF).	53
5.1.3 IEEE 802.16.	54

CAPÍTULO VI

RESULTADOS INDIVIDUALES

6.1 IEEE 802.11 DCF.	57
6.2 IEEE 802.11 PCF.	60
6.3 IEEE 802.16.	62
6.4 Evaluación Comparativa de Throughput.	64

CAPÍTULO VII

ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE WI-FI/WIMAX

7.1 Introducción.	66
7.2 Tecnología de Radio Wimax/Wi-Fi	66

CONCLUSIONES

1. Conclusiones Generales.	71
2. Conclusiones del Análisis de la Evaluación de Rendimiento.	72

BIBLIOGRAFIA

PRÓLOGO

El rápido crecimiento de la demanda por Internet de alta velocidad y servicios multimedia para uso residencial y de pequeños negocios, ha creado un mayor interés en el acceso de banda ancha en la última milla [7]. El Acceso inalámbrico de banda ancha (Broadband Wireless Access, BWA) aparece así como una tecnología atractiva, con numerosas ventajas y que se posiciona como una solución alternativa al acceso mediante una red alamburada como enlaces de fibra óptica, sistemas coaxiales que utilizan un cable modem y DSL [7][8].

Más allá de diferencia en el rango de cobertura, existen varias mejoras en la tecnología del enlace de radio que distinguen al estándar IEEE 802.11 del estándar IEEE 802.16. Entre estas mejoras se destacan la selección dinámica de frecuencia, que permite al sistema buscar automáticamente un canal sin uso, la incorporación de La Corrección de Errores en la Recepción (Forward Error Correction, FEC) y el manejo de cientos de usuarios [8].

En resumen, la diferencia fundamental entre el estándar IEEE 802.16 y el estándar IEEE 802.11 es que han sido diseñados para aplicaciones totalmente diferentes. El estándar IEEE 802.11 es una tecnología LAN diseñada para agregar movilidad a una LAN alamburada, mientras que el IEEE 802.16 fue diseñado para entregar acceso inalámbrico de banda ancha a una MAN [12].

El presente informe realiza un estudio comparativo del funcionamiento a nivel de acceso al medio de los estándares IEEE 802.11 e IEEE 802.16. Para el caso del protocolo IEEE 802.11, este análisis se centra en el método alternativo de acceso al medio descrito en [1], el cual es denominado Point Coordination Function (PCF), mientras que para el estándar IEEE 802.16 el análisis se centra en el funcionamiento en TDD. En este informe se reproducen los resultados obtenidos en [3] y [4]. Para el caso de PCF, se propone una mejora al modelo planteado por [4] con lo que se logra un modelo mas preciso.

Adicionalmente, en este informe se presenta un nuevo modelo que representa el funcionamiento del protocolo IEEE 802.16. Finalmente se evalúa comparativamente el rendimiento de saturación para los tres casos al aumentar la cantidad de estaciones que desean acceder a la red. El estudio realizado mostró una mayor eficiencia presentada por el estándar IEEE 802.16 en comparación con el estándar IEEE 802.11.

En los capítulos I y II se presentan las características más relevantes de los estándares IEEE 802.11 y 802.16 respectivamente, mientras que en los capítulos III y IV se presenta una descripción detallada del control de acceso al medio para los estándares IEEE 802.11 e IEEE 802.16 respectivamente. En el capítulo V se presentan los modelos analíticos, en el capítulo VI se presentan resultados obtenidos por medio de simulación, mientras que en el capítulo VII se comparan los resultados obtenidos para ambos protocolos en un ambiente similar y se presentan las conclusiones del presente trabajo.

CAPÍTULO I

EL ESTANDAR IEEE 802.11

1.1 Introducción.

En los últimos años se ha producido un crecimiento espectacular en lo referente al desarrollo y aceptación de las comunicaciones móviles y en concreto de las Redes de Área Local Inalámbrica (Wireless Local Area Networks). La función principal de este tipo de redes es la de proporcionar conectividad y acceso a las redes cableadas, como si de una extensión de éstas últimas se tratara, pero con la flexibilidad y movilidad que ofrecen las comunicaciones inalámbricas. El momento decisivo para la consolidación de estos sistemas fue la conclusión del estándar IEEE 802.11 en junio de 1997. En este estándar se encuentran las especificaciones tanto físicas como a nivel MAC que hay que tener en cuenta a la hora de implementar una red de área local inalámbrica.

La norma 802.11 ha sufrido diferentes extensiones para obtener modificaciones y mejoras. De esta manera, tenemos las siguientes especificaciones:

1.1.1 Capa Física (PHysical Layer – PHY).

- **IEEE 802.11.** Versión original del estándar, publicado en 1977. Especificación para 1-2 Mbps en la banda de los 2,4 GHz, usando Espectro Extendido con Salto de Frecuencias (Frequency Hopping Spread Spectrum, FHSS) o Espectro Extendido de Secuencia Directa (Direct Sequence Spread Spectrum, DSSS).
- **IEEE 802.11b.** Obtenido como consecuencia de la mejora del estándar inicial 802.11, DSSS capa física para incluir las velocidades de 5,5 y 11 Mbps, además de las de 1 Mbps y 2 Mbps del estándar inicial. Ratificado en 1999. También trabaja en la banda de los 2,4 GHz. La mayoría de las redes WLAN cumplen esta especificación.
- **Wi-Fi (Wireless Fidelity – Fidelidad Inalámbrica).** Promulgado por el WECA (Wireless Ethernet Compatibility Alliance – Alianza para la Compatibilidad de Ethernet Inalámbrica) para certificar productos 802.11b capaces de interoperar con los de otros

fabricantes.

- **IEEE 802.11a.** Estándar de capa física (IEEE Std. 802.11a-1999) operando en la banda de 5 GHz, con modulación OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing – Multiplexión por División Ortogonal de Frecuencia), soportando velocidades desde 6 hasta 54 Mbps.
- **IEEE 802.11g.** Surgido como extensión de mas alta velocidad (54 Mbps) del 802.11b capa física, y operando en banda de 2,4 GHz. A comienzos del 2002, el 802.11g decidió utilizar modulación OFDM. La presencia de usuarios 802.11b en una red 802.11g requería el envío de una ingente cantidad de información de cabecera para evitar colisiones. Tiene mayor alcance y menor consumo de potencia que 802.11a.
- **IEEE 802.11h.** Define el manejo de la banda de 5GHz.
- **IEEE 802.11n.** Mejora el rendimiento y la velocidad respecto a 802.11a/b/g. (>500Mbps).

En lo que respecta a otras especificaciones de la familia, cabe destacar que no se corresponde con ninguna definición de capa física, sino con una serie de mecanismos necesarios para el funcionamiento de la WLAN como sistemas propiamente dichos.

1.1.2 Subcapa de Control de Acceso al Medio (Médium Access Control, MAC).

- **IEEE 802.11d.** Configuraciones para regulaciones locales del espectro RF.
- **IEEE 802.11e.** Especificaciones de Calidad de Servicio (Quality of Service, QoS)
- **IEEE 802.11i.** Corrige las vulnerabilidades en los protocolos de encriptación y autenticación existentes. Engloba 802.1x, TKIP y AES.

1.1.3 Capas superiores.

- **IEEE 802.11c.** Puentes (*bridges*)
- **IEEE 802.11f.** Protocolos entre Puntos de Acceso (Inter Access Point Protocol, IAPP).

En este trabajo nos centraremos en el estudio general del estándar IEEE 802.11. El objetivo fundamental de las redes WLAN es el de proporcionar las facilidades no disponibles en los sistemas cableados y formar una red total donde coexistan los dos tipos de sistemas.

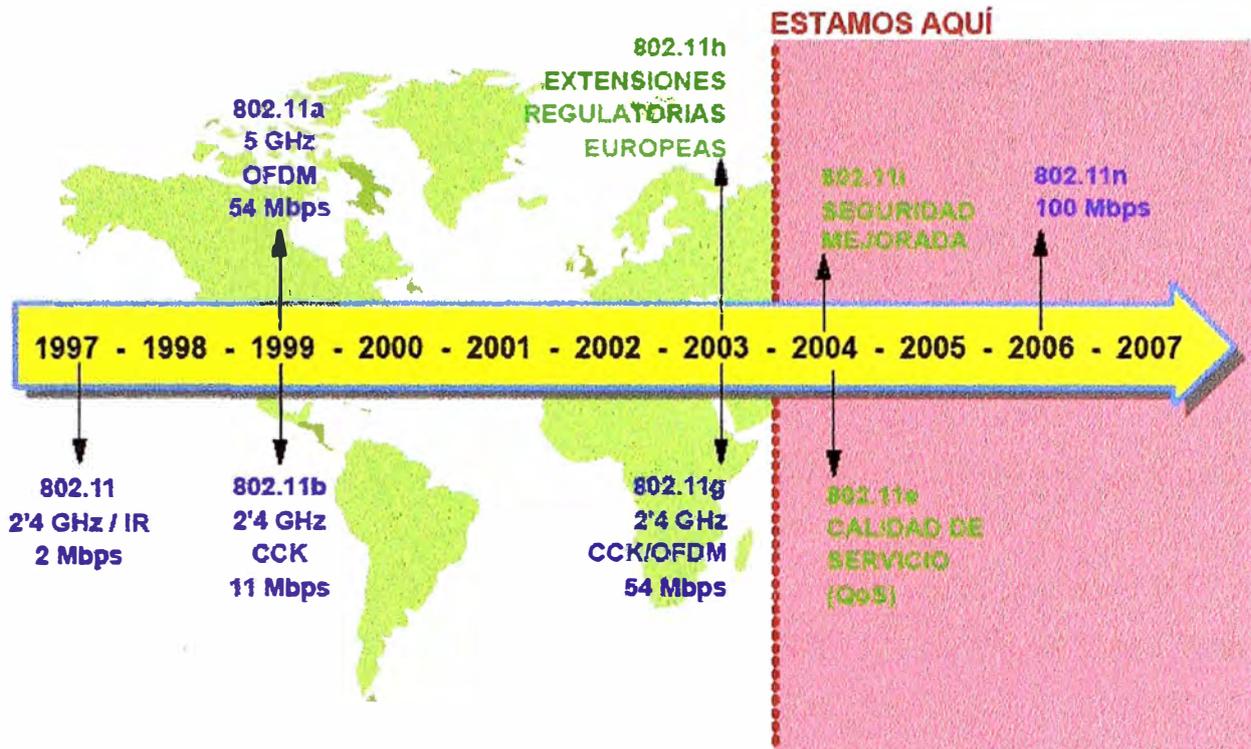


Figura 1.1 Línea de tiempo del estándar IEEE 802.11

1.2 Generalidades sobre Redes de Área Local Inalámbricas.

1.2.1 Definición de Red de Área Local Inalámbrica.

Una red de área local inalámbrica puede definirse como a una red de alcance local que tiene como medio de transmisión el aire. Por red de área local entendemos una red que cubre un entorno geográfico limitado, con una velocidad de transferencia de datos relativamente alta (mayor o igual a 1 Mbps tal y como especifica el IEEE), con baja tasa de errores y administrada de forma privada. Por red inalámbrica entendemos una red que utiliza ondas electromagnéticas como medio de transmisión de la información que viaja a través del canal inalámbrico enlazando los diferentes equipos o terminales móviles asociados a la red. Estos enlaces se implementan básicamente a través de tecnologías de microondas y de infrarrojos.

En las redes tradicionales cableadas esta información viaja a través de cables coaxiales, pares trenzados o fibra óptica. Una red de área local inalámbrica, también llamada wireless LAN (WLAN), es un sistema flexible de comunicaciones que puede implementarse como una extensión o directamente como una alternativa a una red cableada. Este tipo de redes utiliza tecnología de radiofrecuencia minimizando así la necesidad de conexiones cableadas. Este hecho proporciona al usuario una gran movilidad sin perder conectividad.

El atractivo fundamental de este tipo de redes es la facilidad de instalación y el ahorro que supone la supresión del medio de transmisión cableado. Aún así, debido a que sus

prestaciones son menores en lo referente a la velocidad de transmisión, las redes inalámbricas son la alternativa ideal para hacer llegar una red tradicional a lugares donde el cableado no lo permite, y en general las WLAN se utilizan como un complemento de las redes fijas.

1.2.2 Aplicaciones de los Sistemas WLAN.

Las aplicaciones más típicas de las redes de área local que podemos encontrar actualmente son las siguientes:

- Implementación de redes de área local en edificios históricos, de difícil acceso y en general en entornos donde la solución cableada es inviable.
- Posibilidad de reconfiguración de la topología de la red sin añadir costes adicionales. Esta solución es muy típica en entornos cambiantes que necesitan una estructura de red flexible que se adapte a estos cambios.
- Redes locales para situaciones de emergencia o congestión de la red cableada.
- Estas redes permiten el acceso a la información mientras el usuario se encuentra en movimiento. Habitualmente esta solución es requerida en hospitales, fábricas, almacenes, etc.
- Generación de grupos de trabajo eventuales y reuniones ad-hoc. En estos casos no valdría la pena instalar una red cableada. Con la solución inalámbrica es viable implementar una red de área local aunque sea para un plazo corto de tiempo.
- En ambientes industriales con severas condiciones ambientales este tipo de redes sirve para interconectar diferentes dispositivos y máquinas.
- Interconexión de redes de área local que se encuentran en lugares físicos distintos. Por ejemplo, se puede utilizar una red de área local inalámbrica para interconectar dos o más redes de área local cableada situadas en dos edificios distintos.

1.2.3 Configuraciones WLAN.

El grado de complejidad de una red de área local inalámbrica es variable, dependiendo de las necesidades a cubrir y en función de los requerimientos del sistema que queramos implementar podemos utilizar diversas configuraciones de red.

a) Peer to Peer o Redes Ad-Hoc.

La configuración más básica de redes wlan es la llamada redes *de igual a igual* o redes *ad-hoc* y consiste en una red de dos terminales móviles equipados con la correspondiente

tarjeta adaptadora para comunicaciones inalámbricas. En la figura 1.2 mostramos un ejemplo. Para que la comunicación entre estas dos estaciones sea posible hace falta que se vean mutuamente de manera directa, es decir, que cada una de ellas esté en el rango de cobertura radioeléctrica de la otra. Las redes de tipo *ad-hoc* son muy sencillas de implementar y no requieren ningún tipo de gestión administrativa.

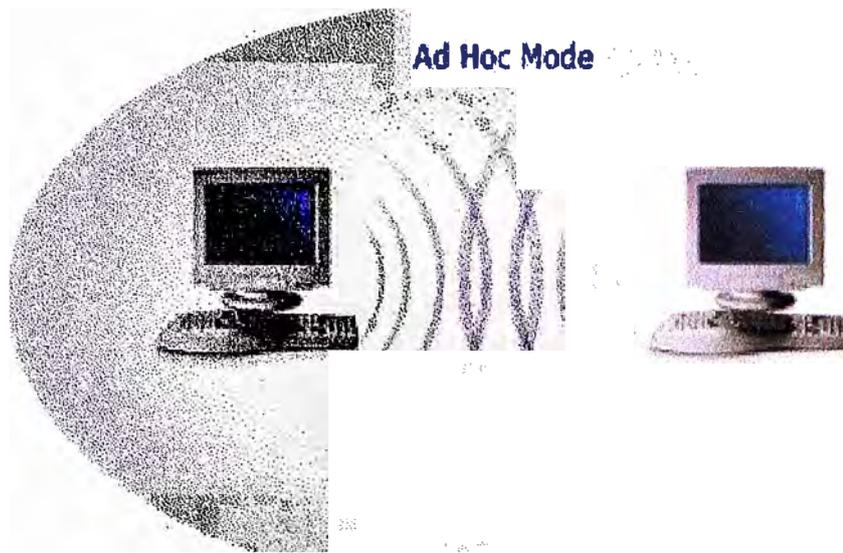


Figura 1.2 Red Ad-Hoc.

b) Modo Infraestructura.

Para aumentar el alcance de una red del tipo anterior hace falta la instalación de un *punto de acceso* (Access Point, AP). Con este nuevo elemento doblamos el alcance de la red inalámbrica (ahora la distancia máxima permitida no es entre estaciones, sino entre cada estación y el punto de acceso). En la figura 1.3 mostramos un ejemplo. Además, los *puntos de acceso* se pueden conectar a otras redes, y en particular a una red fija, con lo cual un usuario puede tener acceso desde su terminal móvil a otros recursos. Para dar cobertura en una zona determinada habrá que instalar varios puntos de acceso de tal manera que podamos cubrir la superficie necesaria con las celdas de cobertura que proporciona cada punto de acceso y ligeramente solapadas para permitir el paso de una celda a otra sin perder la comunicación.

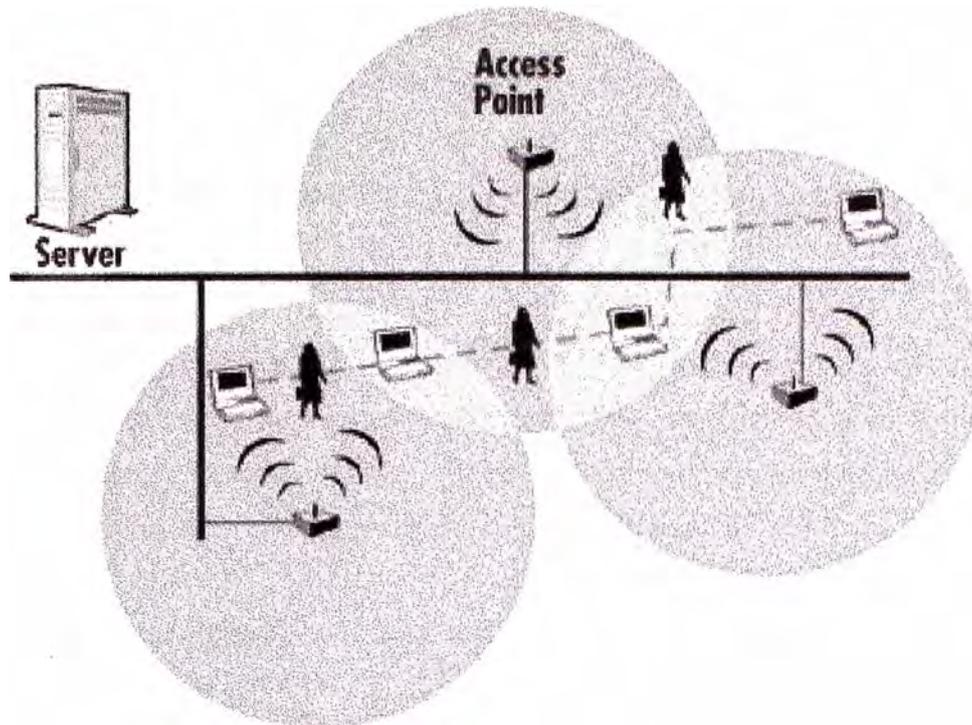


Figura 1.3 Redes de Infraestructura.

a) Enlace entre varias LAN o WMAN.

Para finalizar, otra de las configuraciones de red posibles es la que incluye el uso de antenas direccionales. El objetivo de estas antenas direccionales es el de enlazar redes que se encuentran situadas geográficamente en sitios distintos tal y como se muestra en la figura 1.4. Un ejemplo de esta configuración lo tenemos en el caso en que tengamos una red local en un edificio y la queramos extender a otro edificio. Una posible solución a este problema consiste en instalar una antena direccional en cada edificio apuntándose mutuamente. A la vez, cada una de estas antenas está conectada a la red local de su edificio mediante un punto de acceso. De esta manera podemos interconectar las dos redes locales.

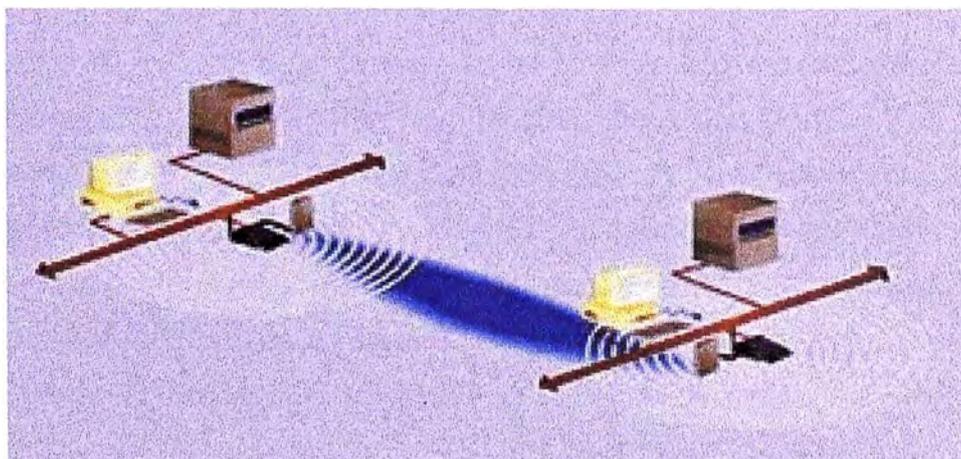


Figura 1.4 Enlace entre varias LAN o WMAN.

1.3 Nivel Físico. Arquitectura y Tecnologías de Modulación.

En este apartado realizaremos una revisión de la arquitectura de la capa de nivel físico, donde nos centraremos en describir ligeramente el funcionamiento de la capa de convergencia, resaltando el proceso de transmisión y recepción y las técnicas de modulación utilizadas por 802.11 y 802.11b.

1.3.1 Arquitectura de Capas 802.11.

La capa física proporciona una serie de servicios a la capa MAC o capa de acceso al medio. Diferentes tecnologías de capa física se definen para transmitir por el medio inalámbrico. La figura 1.5 muestra el detalle respecto de modelo OSI.

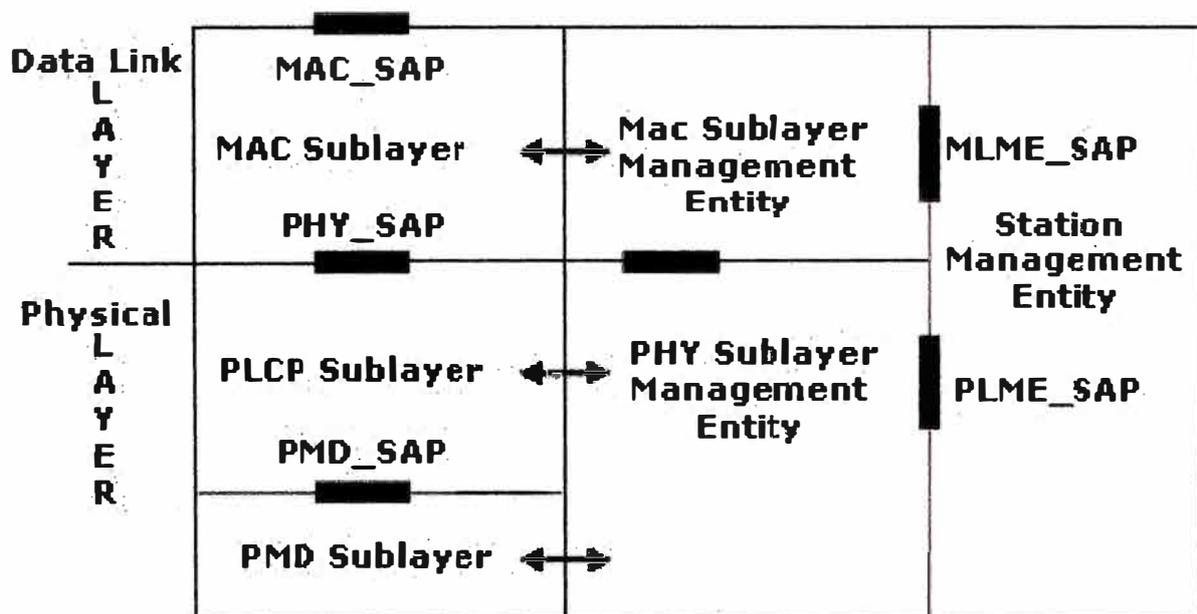


Figura 1.5 Porción del modelo de referencia OSI/IEC que cubre el estándar inalámbrico.

La capa física de servicios consiste en dos protocolos:

- Una función de convergencia de capa física, que adapta las capacidades del sistema físico dependiente del medio (Physical Medium Dependent, PMD). Esta función es implementada por el protocolo PLCP (Physical Layer Convergente Protocol – Procedimiento de Convergencia de Capa Física), que define una forma de mapear MPDUs (Message Protocol Data Unit – Mensajes de Unidad de Datos de Protocolo) o unidades de datos MAC en un formato de tramas susceptibles de ser transmitidas o recibidas entre diferentes estaciones o STAs (Stations – Estaciones) a través de la capa PMD.
- Un sistema PMD, cuya función define las características y un medio de transmitir y

recibir a través de un medio sin cables entre dos o más STAs.

La comunicación entre MACs de diferentes estaciones se realizará a través de la capa física mediante una serie de puntos de acceso al servicio, donde la capa MAC invocará las primitivas de servicio.

Además de estas capas, podemos distinguir la capa física de gestión. En esta capa podemos distinguir la estructura MIB (Management Information Base – Base de Información de Administración) que contienen por definición las variables de gestión, los atributos, las acciones y las notificaciones requeridas para gestionar una estación. Consiste en un conjunto de variables donde podemos especificar o contener el estado y la configuración de las comunicaciones de una estación.

1.3.2 Tecnologías utilizadas en las Redes Inalámbricas.

Podemos distinguir tres tecnologías, dos de espectro ensanchado y una de infrarrojos.

a) Tecnologías de Espectro Ensanchado.

La tecnología de espectro ensanchado consiste en difundir la señal de información a lo largo del ancho de banda disponible, es decir, en vez de concentrar la energía de las señales alrededor de una portadora concreta lo que se hace es repartirla por toda la banda disponible. Este ancho de banda total se comparte con el resto de usuarios que trabajan en la misma banda de frecuencias. Existen dos tipos de tecnologías de espectro ensanchado:

- Espectro Ensanchado por Secuencia Directa (Direct Sequence Spread Spectrum, DSSS).
- Espectro Ensanchado por Salto en Frecuencia (Frequency Hopping Spread Spectrum, FHSS).

a1) Tecnología de Espectro Ensanchado por Secuencia Directa (DSSS).

Esta técnica consiste en la generación de un patrón de bits redundante llamado *señal de chip* para cada uno de los bits que componen la señal de información y la posterior modulación de la señal resultante mediante una portadora de RF. En recepción es necesario realizar el proceso inverso para obtener la señal de información original.

La secuencia de bits utilizada para modular cada uno de los bits de información es la llamada secuencia de Barker y tiene la siguiente forma:

+1, -1, +1, +1, -1, +1, +1, +1, -1, -1, -1.

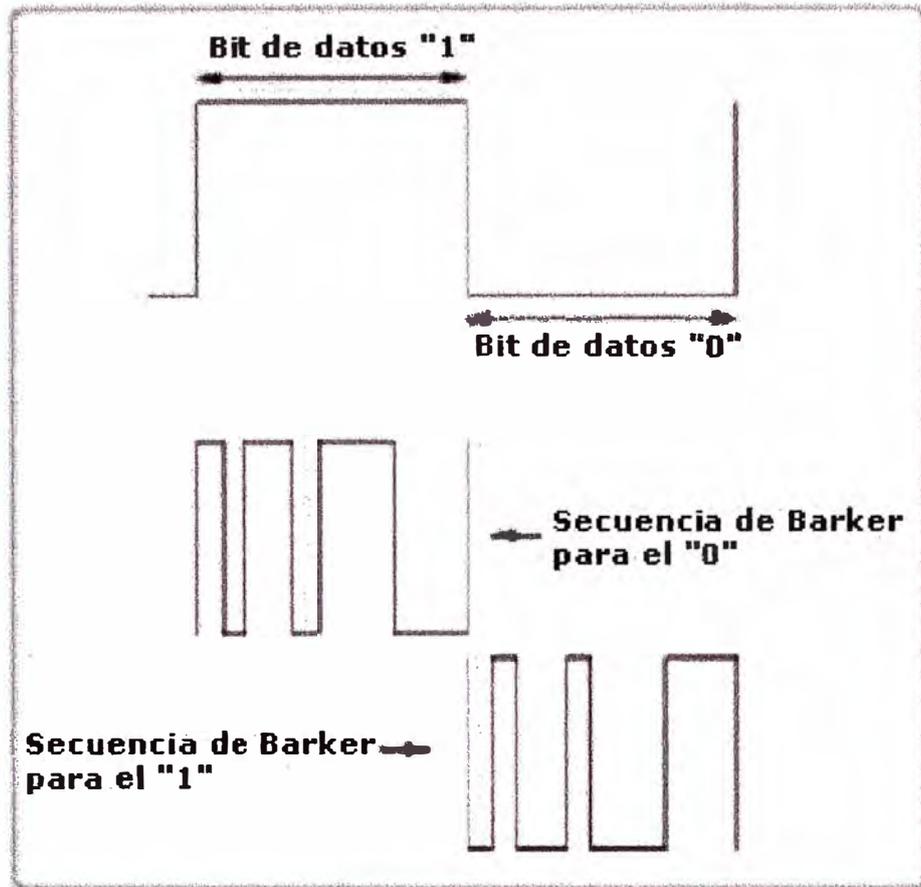


Figura 1.6 Codificación de la información mediante la secuencia de Barker.

En la figura 1.6 mostramos el aspecto de una señal de dos bits a la cual le hemos aplicado la secuencia de Barker. DSSS tiene definidos dos tipos de modulaciones a aplicar a la señal de información una vez se sobrepone la señal de *chip* tal y como especifica el estándar IEEE 802.11: la modulación DBPSK, (Differential Binary Phase Shift Keying – Modulación por Desplazamiento de Fase Binaria Diferencial) y la modulación DQPSK (Differential Quadrature Phase Shift Keying – Modulación por Desplazamiento de Fase en Cuadratura Diferencial) proporcionando unas velocidades de transferencia de 1 y 2 Mbps respectivamente.

En el caso de Estados Unidos y de Europa la tecnología de espectro ensanchado por secuencia directa, DSSS, opera en el rango que va desde los 2.4 GHz hasta los 2.4835 GHz, es decir, con un ancho de banda total disponible de 83.5 MHz. Este ancho de banda total se divide en un total de 14 canales con un ancho de banda por canal de 5 MHz de los cuales cada país utiliza un subconjunto de los mismos según las normas reguladoras para cada caso particular.

En topologías de red que contengan varias celdas, ya sean solapadas o adyacentes, los canales pueden operar simultáneamente sin apreciarse interferencias en el sistema si la

separación entre las frecuencias centrales es como mínimo de 30 MHz. Esto significa que de los 83.5 MHz de ancho de banda total disponible podemos obtener un total de 3 canales independientes que pueden operar simultáneamente en una determinada zona geográfica sin que aparezcan interferencias en un canal procedentes de los otros dos canales. Esta independencia entre canales nos permite aumentar la capacidad del sistema de forma lineal con el número de puntos de acceso operando en un canal que no se esté utilizando y hasta un máximo de tres canales.

a2) Tecnología de Espectro Ensanchado por Salto en Frecuencia (FHSS).

La tecnología de espectro ensanchado por salto en frecuencia consiste en transmitir una parte de la información en una determinada frecuencia durante un intervalo de tiempo llamada *dwell time* inferior a 400ms. Pasado este tiempo se cambia la frecuencia de emisión y se sigue transmitiendo a otra frecuencia. De esta manera cada tramo de información se va transmitiendo en una frecuencia distinta durante un intervalo muy corto de tiempo.

Cada una de las transmisiones a una frecuencia concreta se realiza utilizando una portadora de banda estrecha que va cambiando (saltando) a lo largo del tiempo. Este procedimiento equivale a realizar una partición de la información en el dominio temporal.

El orden en los saltos en frecuencia que el emisor debe realizar viene determinado según una secuencia pseudoaleatoria que se encuentra definida en unas tablas que tanto el emisor como el receptor deben conocer. La ventaja de estos sistemas frente a los sistemas DSSS es que con esta tecnología podemos tener más de un punto de acceso en la misma zona geográfica sin que existan interferencias si se cumple que dos comunicaciones distintas no utilizan la misma frecuencia portadora en un mismo instante de tiempo.

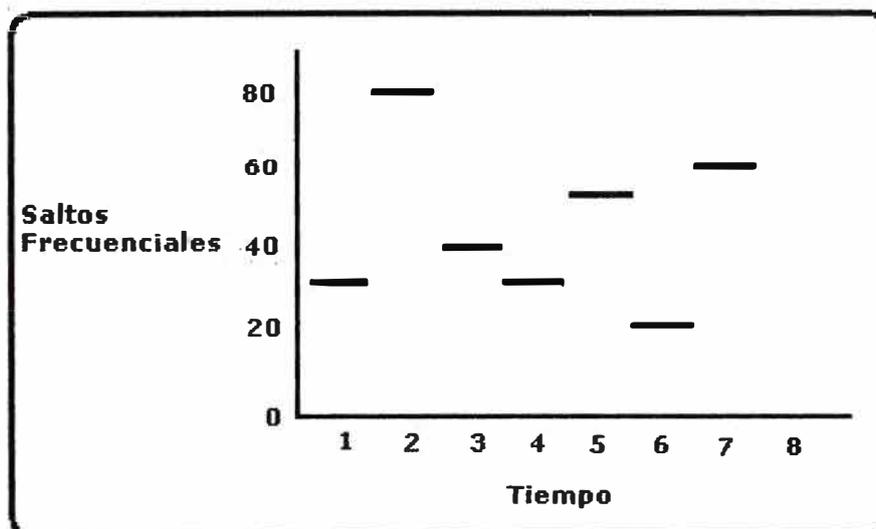


Figura 1.7 Modo de trabajo de la técnica FHSS.

Si se mantiene una correcta sincronización de estos saltos entre los dos extremos de la comunicación el efecto global es que aunque vamos cambiando de canal físico con el tiempo se mantiene un único canal lógico a través del cual se desarrolla la comunicación.

Para un usuario externo a la comunicación la recepción de una señal FHSS equivale a la recepción de ruido impulsivo de corta duración. El estándar IEEE 802.11 describe esta tecnología mediante la modulación FSK (Frequency Shift Keying – Modulación por Desplazamiento de Frecuencia), y con una velocidad de transferencia de 1 Mbps ampliable a 2 Mbps bajo condiciones de operación óptimas.

b) Tecnología de infrarrojos.

Una tercera tecnología, de momento no demasiado utilizada a nivel comercial para implementar WLANs, es la de infrarrojos. Los sistemas de infrarrojos se sitúan en altas frecuencias, justo por debajo del rango de frecuencias de la luz visible. Las propiedades de los infrarrojos son, por tanto, las mismas que tiene la luz visible. De esta forma los infrarrojos no pueden pasar a través de objetos opacos pero se pueden reflejar en determinadas superficies.

Las longitudes de onda de operación se sitúan alrededor de los 850-950 nm, es decir, a unas frecuencias de emisión que se sitúan entre los $3,15 \times 10^{14}$ Hz y los $3,52 \times 10^{14}$ Hz. Los sistemas que funcionan mediante infrarrojos se clasifican según el ángulo de apertura con el que se emite la información en el emisor en:

- Sistemas de corta apertura, de haz dirigido o de visibilidad directa que funcionan de manera similar a los mandos a distancia de los aparatos de televisión. Esto supone que el emisor y el receptor tienen que estar orientados adecuadamente antes de empezar a

transmitirse información.

- Sistemas de gran apertura, reflejados o de difusión que radian tal y como lo haría una bombilla, permitiendo el intercambio de información en un rango más amplio. La norma IEEE 802.11 especifica dos modulaciones para esta tecnología: la modulación 16 ppm y la modulación 4 ppm proporcionando unas velocidades de transmisión de 1 y 2 Mbps respectivamente. Esta tecnología se aplica típicamente en entornos de interior para implementar enlaces punto a punto de corto alcance o redes locales en entornos muy localizados como puede ser una aula concreta o un laboratorio.

CAPÍTULO II

EL ESTANDAR IEEE 802.16

2.1 Introducción.

En el año 2000, el grupo IEEE 802 inicio el “IEEE 802.16 Working Group” para crear estándares que regulen el acceso inalámbrico de banda ancha con el objeto de ofrecer una solución escalable, de bajo costo y alta capacidad (tanto de usuarios como de tasa de transmisión) para extender el backbone de fibra óptica [10]. Al igual que en el estándar 802.11, en el estándar IEEE 802.16 también es posible encontrar distintas RLI dentro de los que se destacan el 802.16 que utiliza el espectro entre 10 GHz y 66 GHz y que requiere línea de vista (Line of Sight, LOS) entre el transmisor y el receptor, 802.16a¹ que funciona en la banda de frecuencias entre 2 GHz y 11 GHz, y el 802.16e que está enfocado en proveer movilidad al estándar y que funciona en bandas menores de 6 GHz [10][12]. Los últimos dos RLI no necesitan LOS y pueden funcionar con enlaces obstruidos (Non Line of Sight, NLOS).

El estándar IEEE 802.16 permite alcanzar tasas de transferencia máxima que fluctúan entre 32 y 130[Mbps] dependiendo del ancho del canal de frecuencia y de la técnica de modulación [11]. Adicionalmente se destaca que el estándar IEEE 802.16 posee la capacidad de utilizar las ventajas ofrecidas por los sistemas de antenas avanzados que actualmente se encuentran disponibles.

Varios operadores y proveedores de servicios pueden estar no familiarizados con los detalles del estándar IEEE 802.16, pero esta tecnología inalámbrica está a punto de revolucionar el acceso de banda ancha de la industria. El estándar 802.16, la ‘Interfase de

¹El estándar IEEE 802.16 fue liberado en Diciembre de 2001, mientras que el IEEE 802.16a fue liberado en Enero de 2003 [12].

Aire para sistemas de Acceso Fijos de Banda Ancha', es también conocido como la interfase de Aire IEEE WirelessMAN. 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 cableada 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 cableado.

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 (Personal Area Network, PAN), IEEE 802.11 para Redes de Área Local (Local Area Network, LAN), 802.16 para Redes de Área Metropolitana (Metropolitan Area Network, MAN), e IEEE 802.20 para Redes de Área Amplia (Wide Area Network, 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.

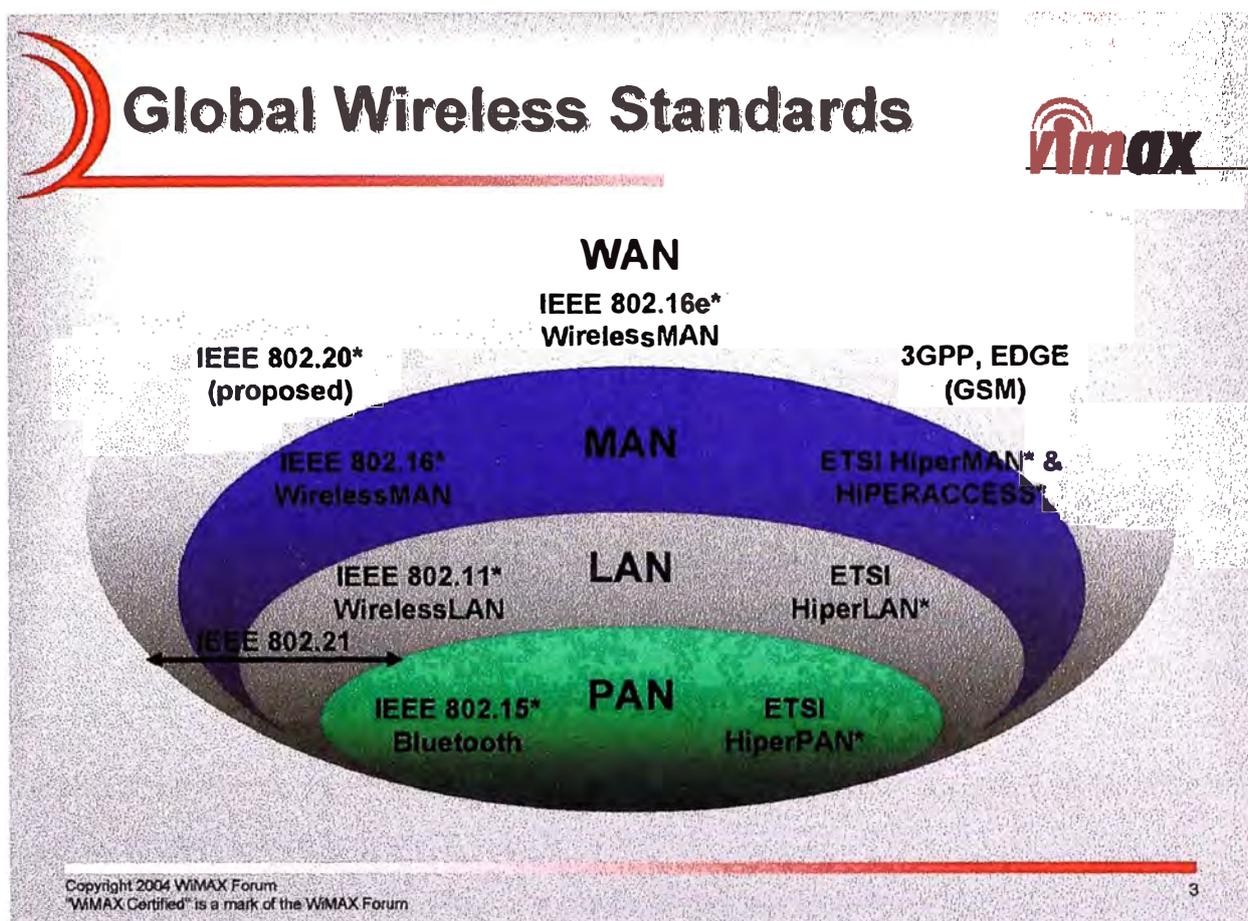


Figura 2.1 El estándar IEEE 802.16 es uno de los numerosos estándares inalámbricos complementarios creados por el IEEE para ayudar a asegurar interoperabilidad y reducir el riesgo del desarrollo de la tecnología inalámbrica.

2.2 Generalidades.

En enero del 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 GHz – 66 GHz publicado en Abril del 2002. Este subrango de frecuencias en 11 GHz permite el desempeño de enlaces sin ‘línea de vista’, haciendo al IEEE802.16a 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 en los techos de viviendas o edificios en vez de 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 Km con celdas típicas de 6.5 a 9.5 Km. Dentro del radio de celda típico, el desempeño sin línea de vista y throughput (rendimiento) son óptimos. Además, el 802.16a provee una tecnología inalámbrica ideal

para conectar WLAN's 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' (mejor esfuerzo) para usuarios residenciales. La especificación 802.16 también incluye funciones de seguridad robustas y la Calidad de Servicio (Quality of Service, 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 (Voice over Internet Protocol, VoIP).

Adicionalmente al 802.16a, existen 3 estándar ampliamente desarrollados. El primero está relacionado con los protocolos y las pruebas de los estándares de interoperabilidad (802.16c), el segundo habla de los perfiles de sistemas para conseguir la interoperabilidad (802.16d) y el tercero es el encargado de aplicaciones móviles (802.16e). El estándar 802.16b es el encargado de todo lo relacionado con la calidad del servicio del sistema QoS, una de las grandes innovaciones de este. A continuación presentamos un resumen de la familia IEEE 802.16.

- **IEEE 802.16.** 10 – 66 GHz, Modulación QAM.
- **IEEE 802.16a.** 2 – 11 GHz, OFDM y OFDMA.
- **IEEE 802.16b/c.** Interoperabilidad y especificación de certificaciones.
- **IEEE 802.16d.** Añade 2 – 11 GHz a especificaciones de Interoperabilidad.
- **IEEE 802.16-2004.** Reemplaza a 802.16, 802.16a y 802.16d.
- **IEEE 802.16e.** Movilidad. No publicado todavía, previsto para 2005/07.

2.3 Aplicaciones.

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

2.4.1 Enlaces Celda-Switch (Backhaul) Celular.

Los proveedores del backbone de Internet en USA 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 solamente el 20 por ciento de las torres celulares son interconectadas de manera inalámbrica en USA. En Europa, donde es menos común para intercambios entre carriers locales alquilar sus líneas a terceras partes, los proveedores de servicios necesitan alternativas eficientes. Subsecuentemente, la interconexión inalámbrica es usada en el 80 por ciento de las torres Europeas de telefonía celular. Con la potencial remoción del requerimiento de alquiler por el FCC de USA, los proveedores de servicio celular van a buscar interconexión inalámbrica de mejor costo como alternativa. 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.

2.4.2 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, además estas organizaciones pueden requerir reubicarse en áreas donde el servicio esté disponible. En los mercados actuales, se sabe 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' (sobre demanda) en forma temporaria para diferentes eventos. La tecnología inalámbrica hace posible que el proveedor de servicios pueda 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 ultima milla, significan una nueva oportunidad de ganancias para los operadores.

2.4.3 Banda Ancha Residencial.

Las 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 Km desde la oficina central de conmutación. Las redes de TV por cable también poseen estas limitaciones, careciendo las más 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 cableados 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. Además, el rango de soluciones de 802.16a, la ausencia del requerimiento de línea de vista, gran ancho de banda, y la inherente flexibilidad y bajo costo ayudan a superar las limitaciones de las tecnologías cableadas e inalámbricas propietarias.

2.4.4 Áreas no cubiertas.

La tecnología inalámbrica basada en IEEE 802.16 es también una opción natural para las áreas rurales no cubiertas y suburbios con baja densidad de población. En estas áreas, instalaciones locales y gobierno trabajan juntos con los proveedores de servicios inalámbricos de Internet (Wireless Internet Service Provider, WISP) para brindar servicio. Recientes estadísticas muestran que hay más de 2500 WISPs (USA) que toman ventajas del espectro no licenciado para brindar servicio a más de 6000 mercados en USA (Fuente: ISP-Market 2002). En el mercado internacional, la mayoría de los emprendimientos están en el espectro licenciado y son operados por carriers locales que requieren servicios de voz en adición a datos de alta velocidad.

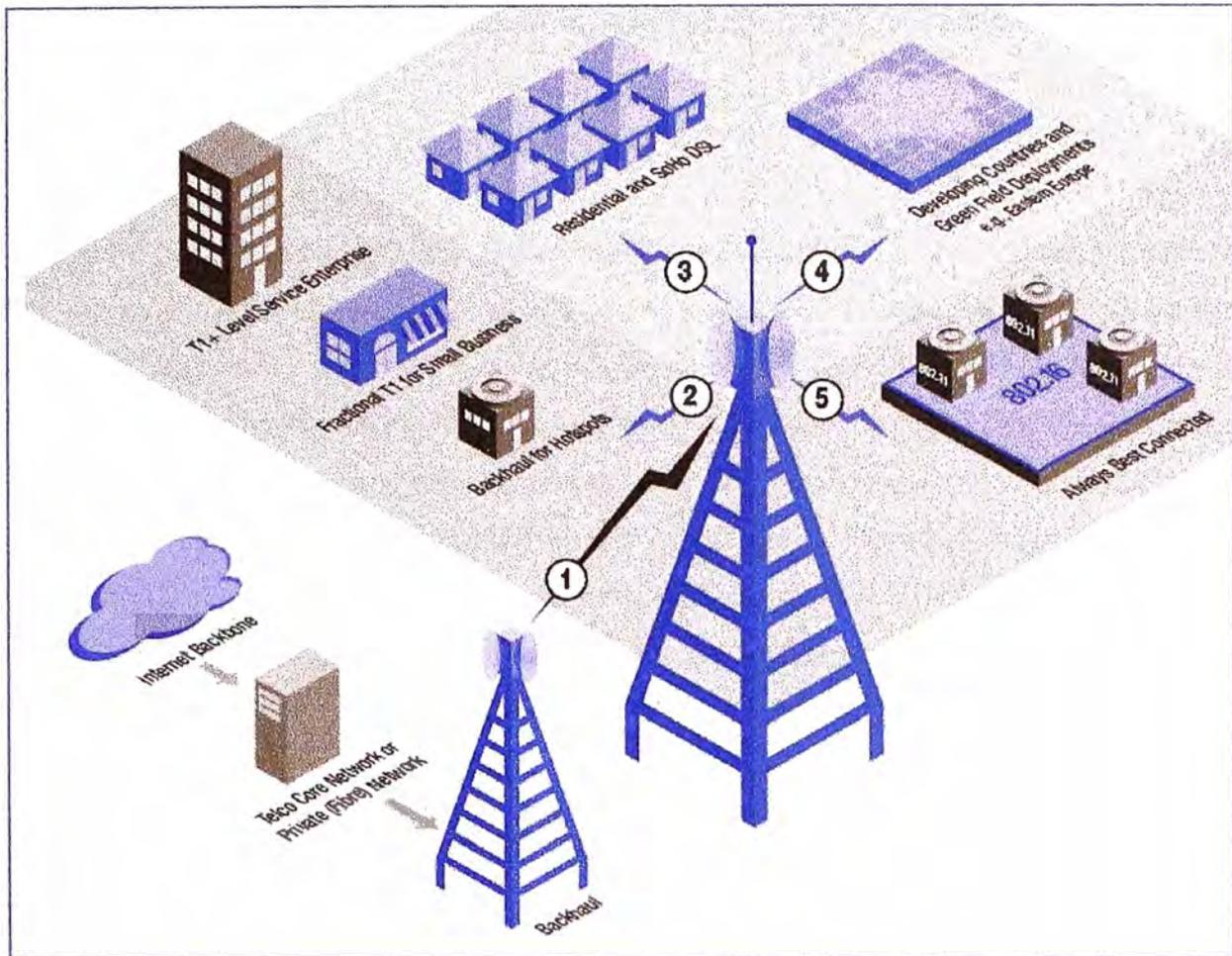


Figura 2.2 El estándar IEEE 802.16 permite soluciones que cumplen con las necesidades de una variedad de segmentos de acceso de banda ancha.

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, WLL) es a menudo usado para describir estas aplicaciones, dado que es utilizado como un sustituto para los tradicionales enlaces locales de cobre para telefonía fija.

2.4.5 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 Proveedores de Servicio de Internet Inalámbrico aún cuando estos se movilicen fuera de sus hogares, o vayan a otras localidades que también tienen un WISP.

2.4 Principales Características: Tasa de Transferencia, Escalabilidad, Qos y Seguridad.

2.4.1 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 (Quadrature Amplitude Modulation – Modulación por Amplitud en Cuadratura), el orden de modulación se reduce a 16 QAM o QPSK (Quadrature Phase Shift Keying – Codificación por cambio de fase en cuadratura), la cual reduce la tasa de transferencia e incrementa el rango efectivo.

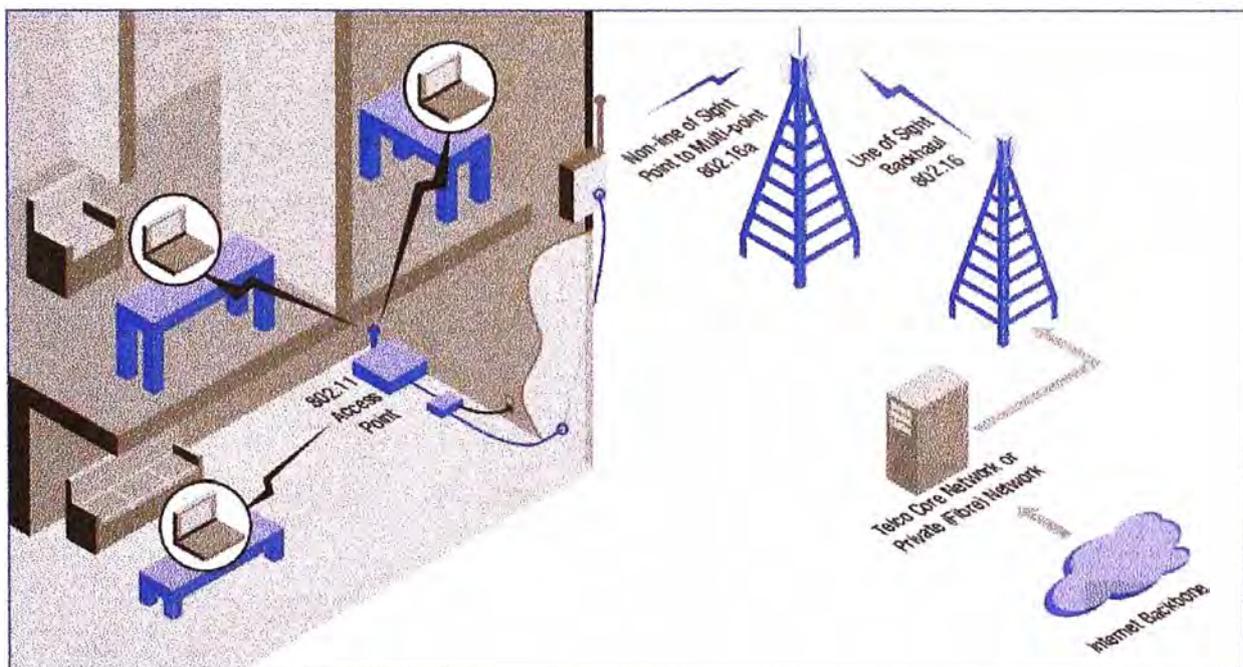


Figura 2.3 El estándar IEEE 802.16 permite conexiones punto-multipunto fuera de la línea de vista y aplicaciones de enlaces en línea de vista.

2.4.2 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 re-usar el mismo espectro en dos o más sectores creando aislaciones propias entre las antenas de estaciones base.

2.4.3 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.

2.4.4 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.

2.4.5 Seguridad.

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

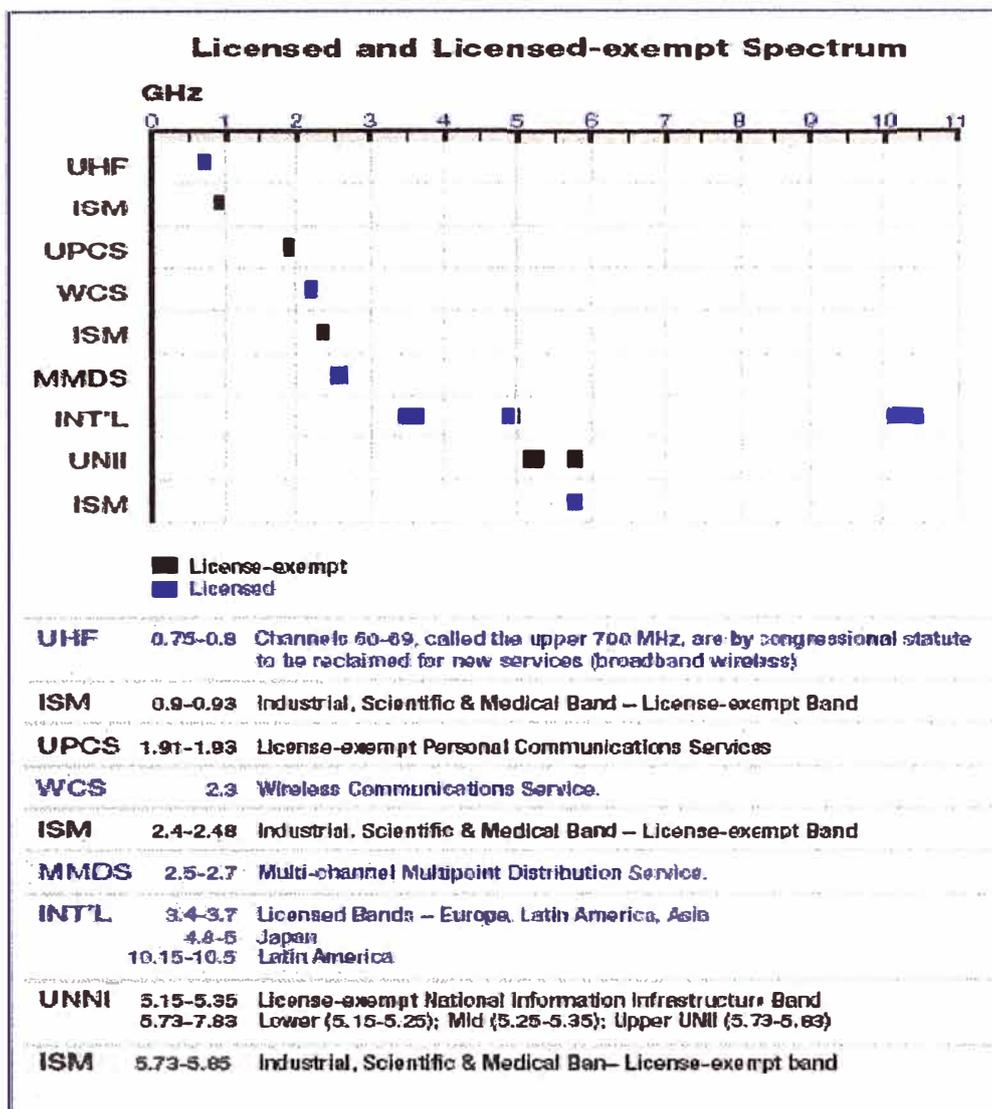


Figura 2.4 El estándar IEEE 802.16 está diseñado para el espectro de bandas licenciadas y no licenciadas-exentas para acomodar fácilmente el planeamiento de celdas a través del mundo.

2.5 Propagación y Técnicas de Modulación para WiMAX.

2.5.1 Introducción.

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

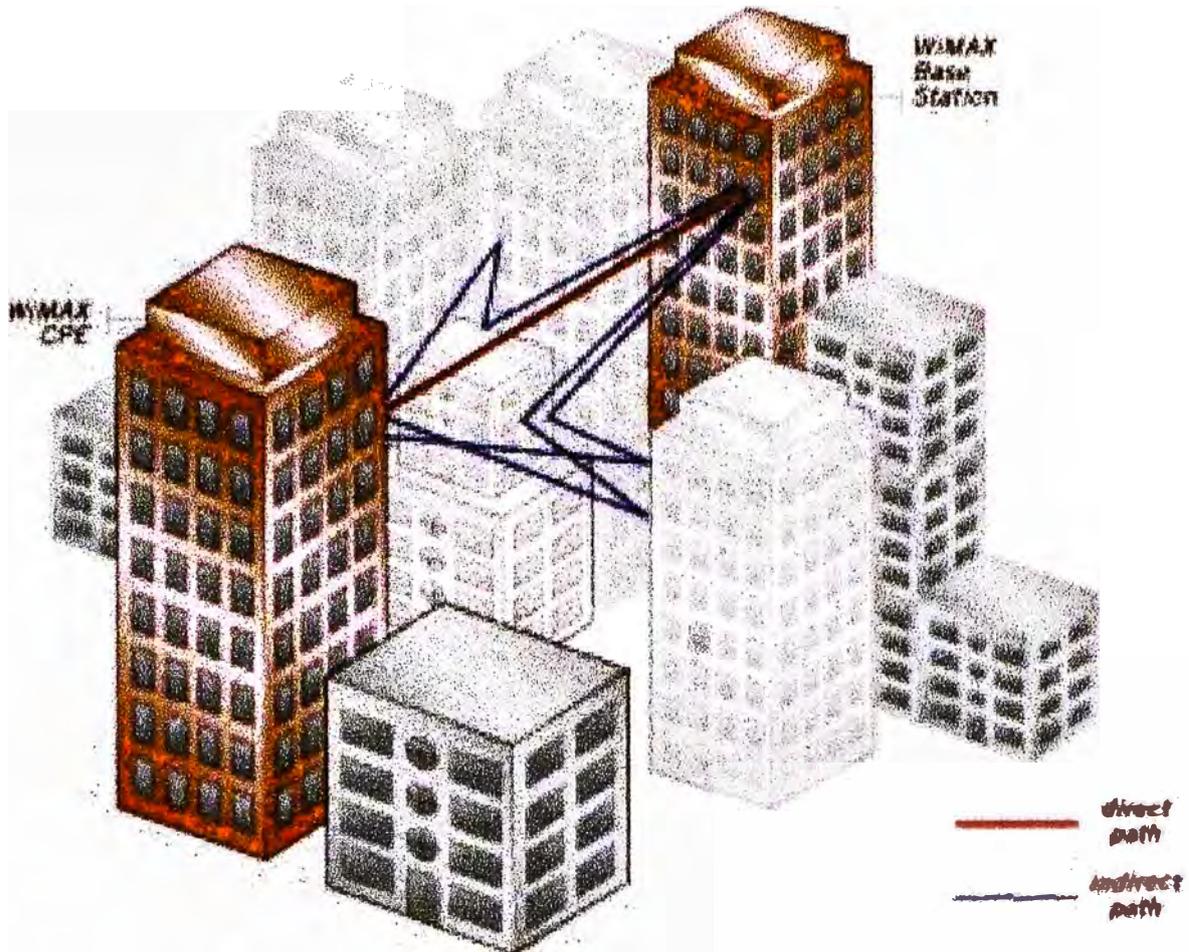


Figura 2.6 Zona de Fresnel NLOS.

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 diversas 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 co-canal 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 (Customer Premises Equipment, 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.

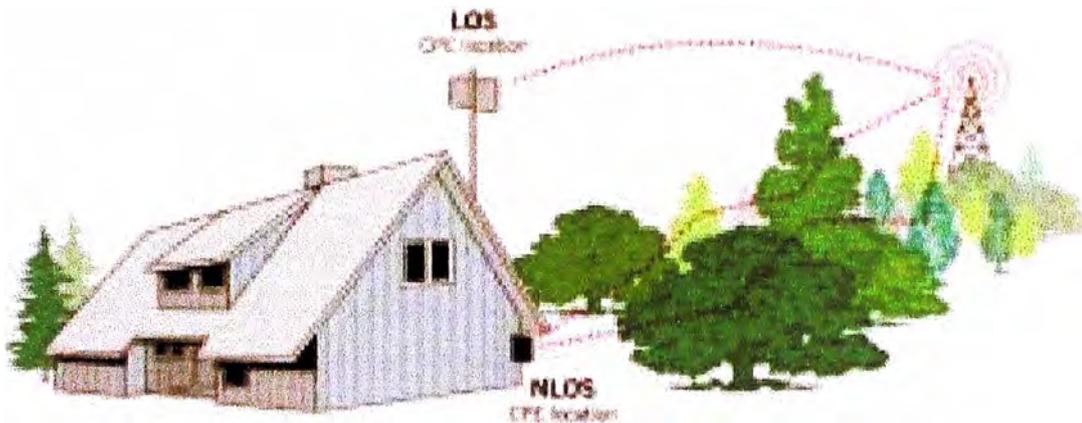


Figura 2.7 Ubicación del equipo de abonado (CPE) para condición NLOS.

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. Esto está más elaborado en las próximas secciones de este capítulo.

2.5.3 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.
- Técnicas de Corrección de Error.
- Control de Potencia.

a) Tecnología OFDM.

La tecnología OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing – Multiplexión por División Ortogonal de Frecuencia) 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 inter-símbolo (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 subportadoras que son relativamente fáciles de ecualizar. Un ejemplo es mostrado en la figura 2.8 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.

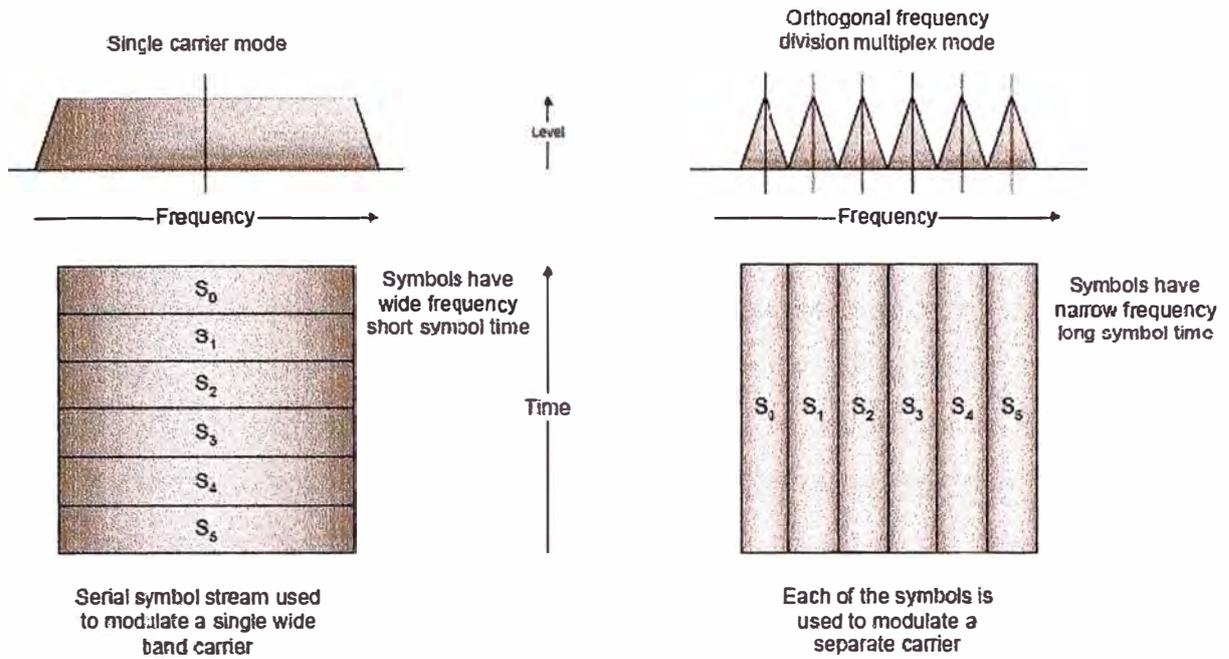


Figura 2.8 OFDM vs. portadora simple. Datos serie convertidos en símbolos (cada símbolo puede representar 1 o más bit de datos).

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.

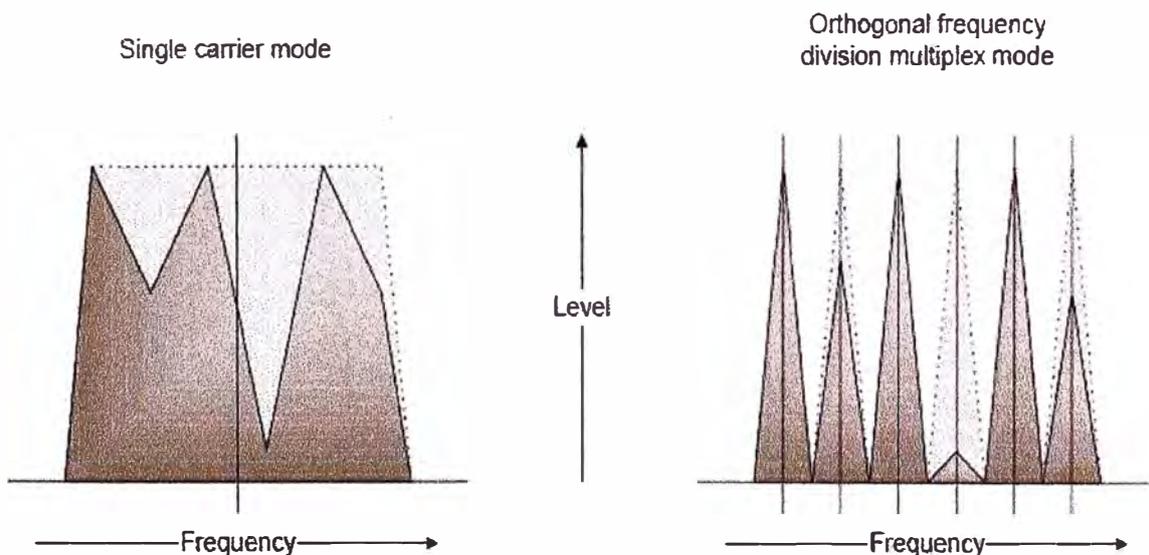


Figura 2.9 Señales recibidas OFDM y portadora simple. El área de puntos representa el espectro transmitido. El área sólida es la entrada del receptor.

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.

b) 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 sub-canalización 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.



Transmitted downstream OFDM spectrum from the base station, each slot represents a RF carrier



Transmitted upstream OFDM spectrum from the CPE, all carriers are transmitted but at a quarter of the level of the base station, hence the range will be less



Transmitted upstream OFDM spectrum from the CPE using only a quarter of the carriers, but at the same level as the base station, hence the range will be the same with a quarter of the capacity

Figura 2.10 Efecto de la sub-canalización.

c) 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.

d) 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.

e) Modulación Adaptativa.

La modulación adaptativa permite al sistema WiMAX ajustar el sistema de modulación dependiendo de la condición de relación señal/ruido (Signal to Noise Ratio, 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.

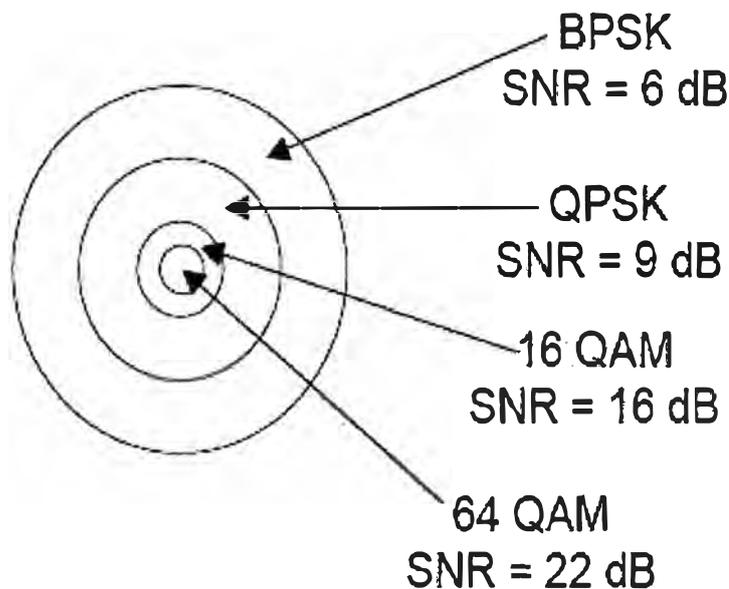


Figura 2.11 Radio de celda relativo para modulación adaptativa.

f) 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 (Forward Error Correction – Corrección del primer error) 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 (Automatic Repeat Request, ARQ) es usado para corregir errores que no pueden ser corregidos mediante FEC, teniendo la información errónea recibida. Esto mejora significativamente el BER (Bit error rate – Índice de Error Binario).

g) 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 base 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 dependiente del despeje y las obstrucciones.

2.5.4 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, factores de terreno, alturas de antenas receptora y transmisora 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 el Web site del IEEE ó en el vinculo 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.

2.5.5 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 (Radio Frequency – Radiofrecuencia) 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.

2.5.6 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.

2.5.7 Rango de cobertura WiMAX

Esta sección describe 2 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 2.2 asume que un sub-canal simple es usado para extender el límite de la celda lo más lejos posible.

Assumptions		Frequency: 3.5 GHz		Full featured		Standard	
		Bandwidth: 3.5 MHz		From	To	From	To
Cell radius (km)	Per 60° sector						
		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		

Tabla 2.2 Ejemplo Estación Base estándar vs. Funcionalidad Completa.

Acorde a lo mostrado el rendimiento alcanzable con el equipo de abonado de interior autoinstalable de funcionalidad completa tiene un incremento de 10 veces en área de cobertura sobre el estándar. La figura 2.12 da una representación diagramática de las implicaciones LOS y NLOS de los dos diferentes tipos de estaciones base.

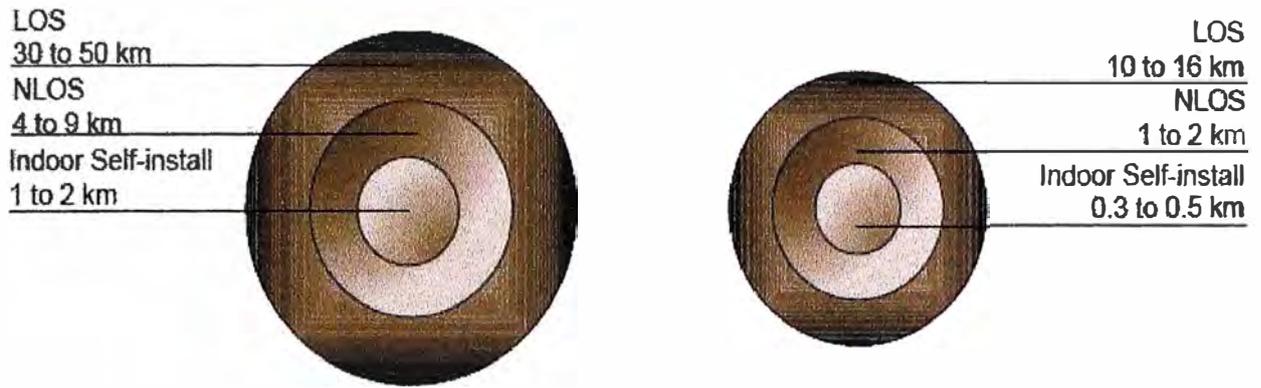


Figura 2.12 Radio de celda para funcionalidad completa vs. estándar

CAPÍTULO III

EL CONTROL DE ACCESO AL MEDIO EN 802.11

3.1 Introducción

El estándar IEEE 802.11 [1] describe la arquitectura de la sub capa MAC, incluyendo la Función de Coordinación Distribuida (Distributed Control Function, DCF), la Función de Coordinación Puntual (Point Coordination Function, PCF), y la coexistencia de ambos mecanismos en una IEEE 802.11 LAN. En la figura 3.1 se muestra la arquitectura de la capa MAC para 802.11.

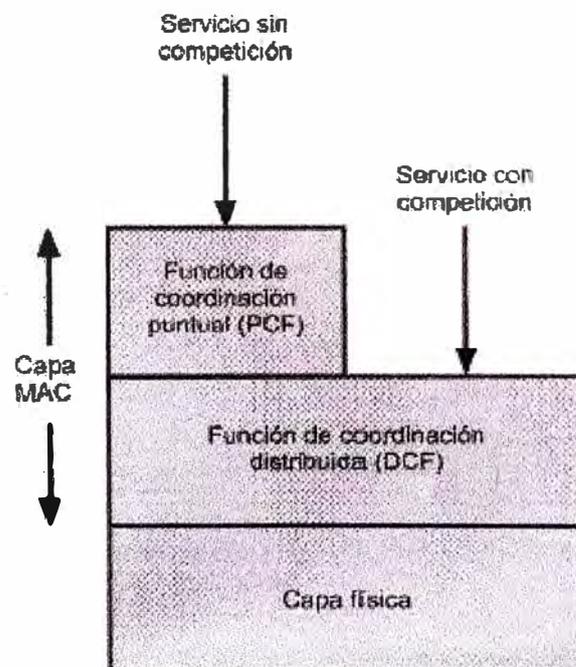


Figura 3.1 Arquitectura de la capa MAC para 802.11 [1].

3.2 Función de Coordinación Distribuida (Distributed Control Function, DCF).

El método fundamental de acceso para una red IEEE 802.11 es la DCF, conocida como Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance (CSMA/CA). Este método de contienda puede ser utilizado tanto en redes tipo ad-hoc como en redes tipo infraestructura, es un método de contienda y consiste básicamente en definir un sistema de intervalos de espera y tiempos de back-off que ayudan a reducir, pero no eliminar, la posibilidad de colisión [12]. Cuando una estación quiere transmitir envía un requerimiento RTS (Ready to Send) a la estación base. La estación base responde con un CTS (Clear to Send) y luego la estación transmite. Dado que CSMA/CA no es capaz de detectar una colisión oyendo el canal, cuando una transmisión es exitosa, la estación base envía un ACK (Acknowledgment) a todas las estaciones. Si el ACK no es recibido dentro de cierto tiempo, se asume un paquete errado [3]. En la Figura 3.2 se muestra un esquema del funcionamiento típico del sistema RTS/CTS¹.

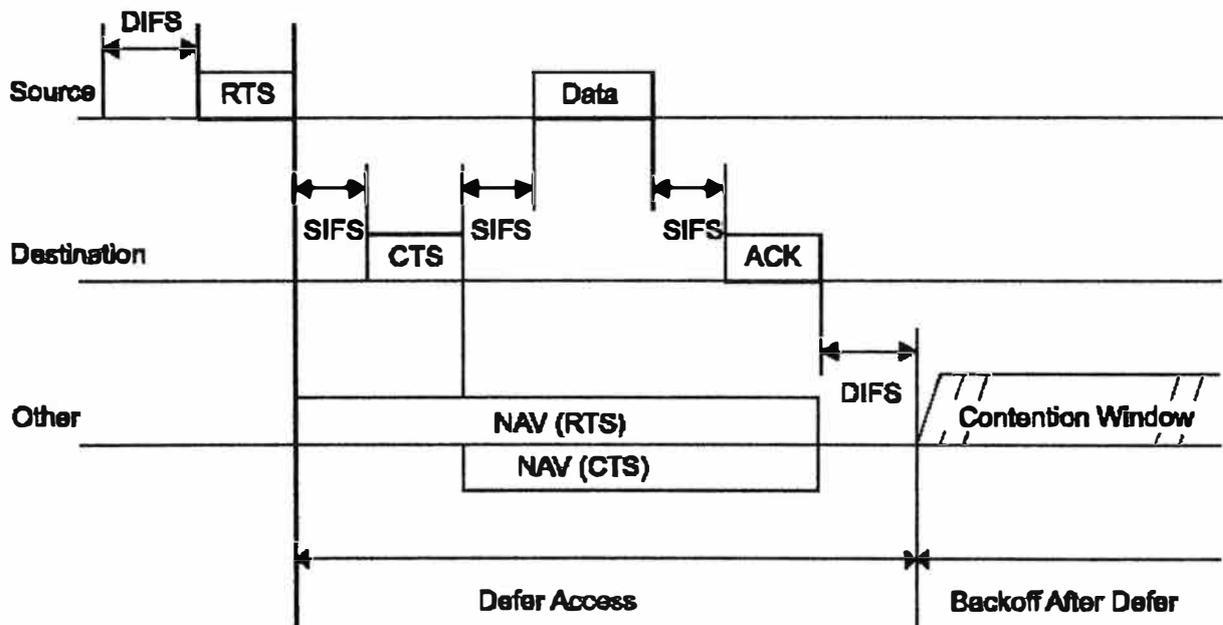


Figura 3.2 Funcionamiento del sistema RTS CTS [1].

3.3 Función de Coordinación Puntual (Point Coordination Function, PCF).

El estándar IEEE 802.11 también incorpora un método de acceso opcional libre de contienda, conocido como PCF, el cual es sólo utilizable en redes del tipo infraestructura. A diferencia de DCF en donde el control de acceso es distribuido entre las estaciones, en

¹ También denominado MACA (Multiple Access with Collision Avoidance)

PCF existe un Point Coordinator (PC), quien se encarga de controlar el acceso y que generalmente opera en el Access Point (AP). PCF podría resumirse como un sistema de encuesta (polling) en la cual el PC hace de polling master.

En este método de funcionamiento existe un período libre de contienda (CFP, Contention Free Period) el cual es controlado por la PCF, y un período de contienda (CP, Contention Period) controlado por la DCF. Estos períodos se alternan en forma cíclica cada cierto tiempo como se muestra en la Figura 3.3

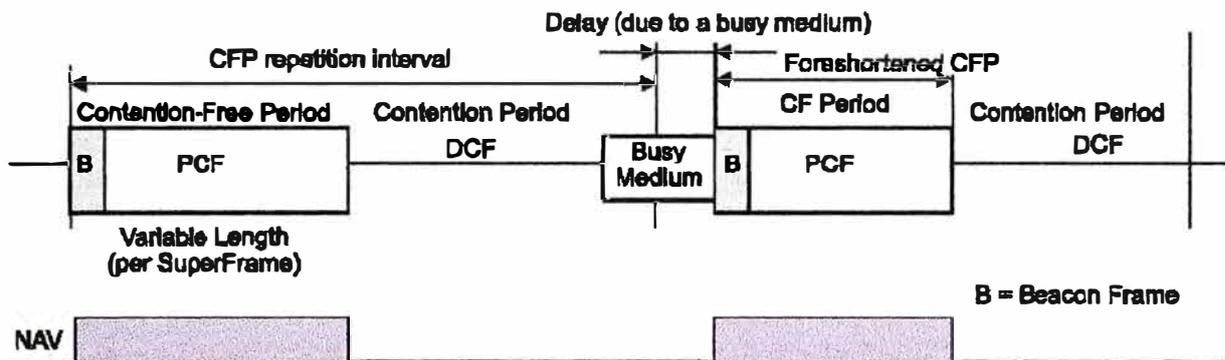


Figura 3.3 Comportamiento cíclico de los períodos CFP y CP [1].

Cada CFP comienza siempre con un Beacon Frame que contiene información de control que es enviada a todas las estaciones (STAs). Para que el período libre de contienda comience, es necesario que el PC se apropie del canal luego de haber terminado una transmisión utilizando DCF. Esto se logra esperando un tiempo PIFS (PCF Interframe Space) el cual es menor que el DIFS (DCF Interframe Space) que corresponde al tiempo que debe esperar una STA para transmitir un RTS luego de un ACK en el modo DCF. En la Figura 3.4 se puede apreciar la duración relativa de los tiempos SIFS², PIFS y DIFS. En PCF, el PC se adelanta transmitiendo un Beacon después de un tiempo PIFS, apoderándose así del canal durante el CFP.

²SIFS es el tiempo entre frames RTS, CTS y DATA para DCF. Ver Figura 3.2

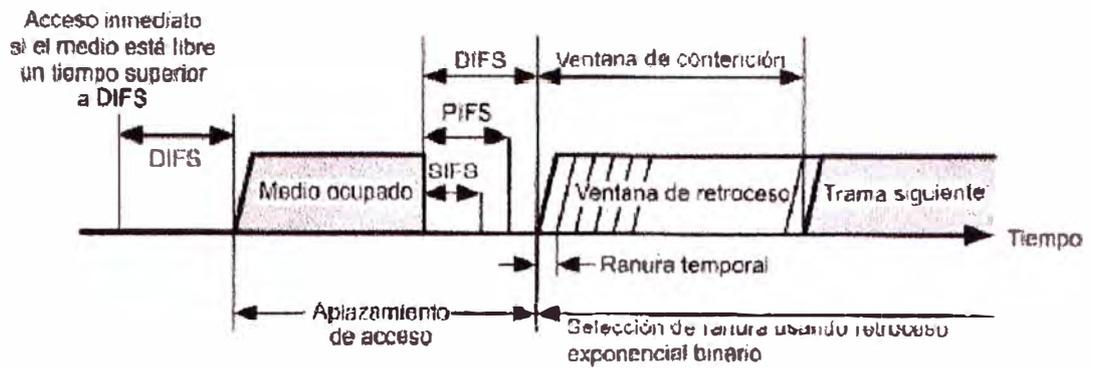


Figura 3.4 Relación entre SIFS, PIFS y DIFS [1].

Si bien el CFP tiene un tiempo asignado máximo denominado $CFP_{MaxDuration}$, este puede ser acortado debido a que el medio se puede encontrar ocupado por una transmisión del DCF como se detalla en la Figura 3.3 También existe la posibilidad de que el tiempo de duración del CFP sea menor al máximo si el PC así lo determina.

Luego de transmitir el Beacon inicial, el PC tiene distintas alternativas de transmisión hacia estaciones encuestables las cuales se describen en la Tabla 3.1. En forma análoga, en la Tabla 3.2 se detallan las posibles respuestas de una STA al PC.

Tabla 3.1 Tipos de mensajes que puede transmitir el PC a una STA.

Mensaje	Descripción
Data	Se utiliza para enviar datos desde el PC cuando no existe un frame previo a confirmar ni una próxima STA a encuestar.
Data+CF-ACK	Se utiliza para enviar datos desde el PC cuando es necesario confirmar la recepción de un frame previo y no existe una próxima STA a encuestar.
Data+CF-Poll	Se utiliza para enviar datos desde el PC cuando no existe un frame previo a confirmar y sí existe una próxima STA a encuestar.
Data+CF-ACK+CF-Poll	Se utiliza para enviar datos desde el PC cuando existe un frame previo a confirmar y también existe una próxima STA a encuestar.
CF-Poll	Se utiliza cuando el PC no envía datos, no existe un frame previo a confirmar y sí existe una próxima STA a encuestar.

CF-ACK+CF-Poll	Se utiliza cuando el PC no envía datos existe un frame previo a confirmar y también existe una próxima STA a encuestar.
CF-ACK	Se utiliza cuando el PC no envía datos, es necesario confirmar la recepción de un frame previo y no existe una próxima STA a encuestar.
CF-End	Señaliza el término de un CFP cuando no existe una frame previo a confirmar.
CF-End+ACK	Señaliza el término de un CFP cuando además existe una frame previo a confirmar.

El Network Allocation Vector (NAV) es utilizado para prevenir que las estaciones transmitan en un determinado período de tiempo y causen contienda por el medio. Cada vez que un Beacon es transmitido por el PC, todas las STAs determina su NAV como se muestra en la Figura 3.3 utilizando el CFPMaxDuration, en donde se aprecia que durante todo el CFP las estaciones tienen determinado su NAV y así evitan transmitir. Esta abstención para transmitir se mantiene durante todo el CFP excepto cuando la STA es encuestada por el PC. Al recibir el mensaje de término del CFP las STAs reiniciarán su NAV.

Tabla 3.2 Tipos de frames que puede transmitir la STA.

Mensaje	Descripción
CF-ACK	Se utiliza cuando se recibe correctamente el frame y no se desea transmitir datos.
CF-ACK +Data	Se utiliza cuando se recibe correctamente el frame y además se desea transmitir datos.

En la figura 3.5 se muestra un esquema típico de transferencia en un CFP. En esta figura es posible apreciar el Beacon que señala el comienzo del CFP luego de esperar un tiempo PIFS. Se destacan las encuestas (poll) hechas por el PC y las respuestas de las distintas STAs. También es posible apreciar el NAV que se reinicia antes del CFPMaxDuration debido el frame CF-End enviado por el PC. Se debe notar que el tiempo entre frames es SIFS al igual que en DCF, y que en caso de que no exista una respuesta a una encuesta se

espera un tiempo PIFS para seguir con la siguiente encuesta.

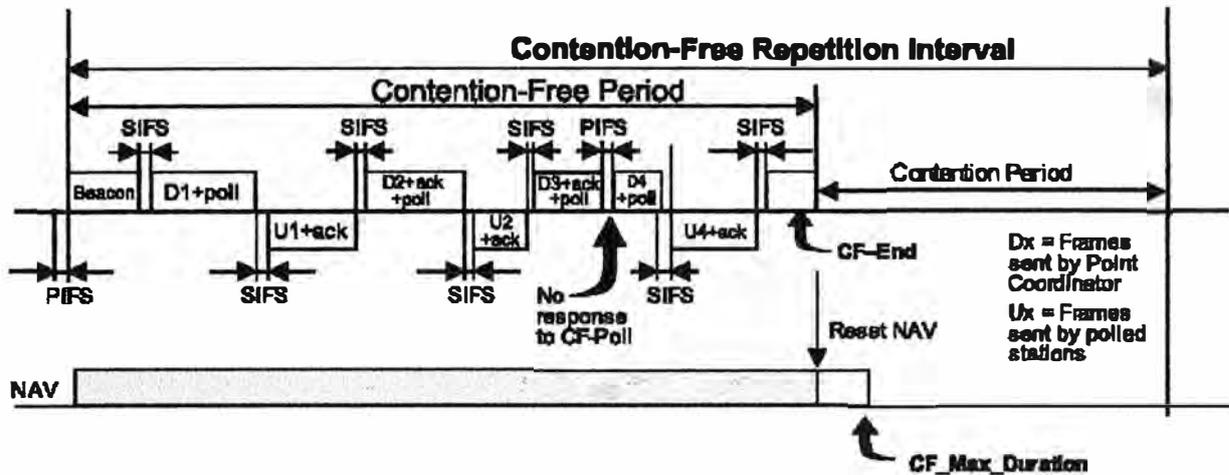


Figura 3.5 Ejemplo de transferencia en un CFP [1].

Se debe mencionar que el PC está facultado para transmitir datos o frames de control a estaciones no-encuestables, las que deberán responder con un ACK luego de un SIFS como en DCF.

El PC maneja una Lista de Encuesta (Polling List) que permite seleccionar las STAs que recibirán los CF-Polls (Contention-Free Poll) durante un CFP. En el caso de que el PC utilice el CFP sólo para enviar frames, esta lista no es necesaria. Esta lista se utiliza para forzar al PC a realizar la encuesta y dar la posibilidad a que una STA envíe datos aunque el PC no tenga datos que enviar a esta.

Para que una STA sea considerada como una STA encuestable o no-encuestable, lo que implica pertenecer o no pertenecer a la lista respectivamente, debe indicarlo en los mensajes de Association Request y Reassociation Request. Si una STA desea cambiar su status, se debe reasociar y solicitar estar o no incluido en la Polling List.

CAPÍTULO IV

EL CONTROL DE ACCESO AL MEDIO EN 802.16

4.1 Introducción.

El estándar IEEE 802.16 [2] describe un control de acceso al medio que puede compartir el canal de radio entre cientos de usuarios. Este estándar usa un mecanismo del tipo Solicitud/Entrega (Request/Grant Protocol) similar al utilizado por los sistemas de cable modem (DOCSIS). El acceso al medio se puede configurar por Time Division Duplex (TDD) con un único canal de comunicación, como por Frequency Division Duplex (FDD) con varios canales en distintas portadoras. Para ambos casos, el protocolo de acceso utiliza acceso Múltiple por división en el tiempo (TDMA, Time Division Multiple Access) el cual ranura el tiempo tanto en el canal de subida (desde el terminal a la estación base) como el de bajada (desde la estación base hacia el terminal). Para el caso de TDMA sobre FDD, 802.16 permite una comunicación Full-Duplex, mientras que para TDMA sobre TDD la comunicación es Half-Duplex. En ambos casos el sistema permite reservar un determinado ancho de banda para aplicaciones que necesitan ancho de banda garantizado como VoIP, Video, etc.

4.2 Unidad Básica de Comunicación.

El MAC Protocol Data Unit (MAC PDU) es la unidad básica de comunicación intercambiada entre la capa MAC de la Estación Base (Base Station, BS) y las Estaciones Subscriptoras (Subscriber Stations, SSs).

El MAC PDU posee tres campos como se puede apreciar en la figura 4.1. El primer campo es de largo fijo y corresponde al Generic MAC Header, el segundo campo es opcional, de largo variable, y corresponde a la carga (Payload) que puede contener sub headers, mientras que el tercer campo correspondiente al CRC, es también opcional y protege tanto

al Generic MAC Header como al Payload.

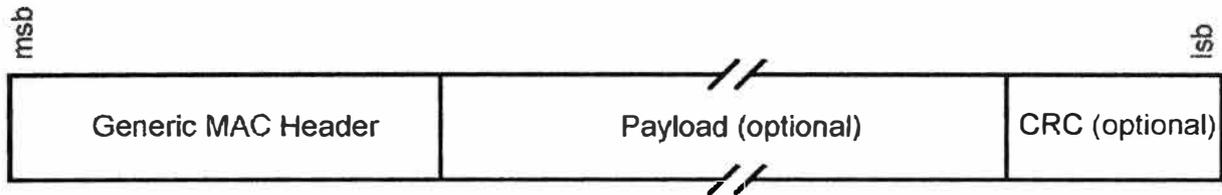


Figura 4.1 Formato de un MAC Protocol Data Unit [2].

El estándar [2] define 2 tipos de MAC Headers: Generic MAC Header (GMH) y Bandwidth Request Header (BRH) los que son señalizados en el primer bit (Single Bit Header Type, HT) del MAC PDU: HT=0 para un Generic Header y HT=1 para un Bandwidth Request. En la figura 4.2 se muestra el formato de un GMH.

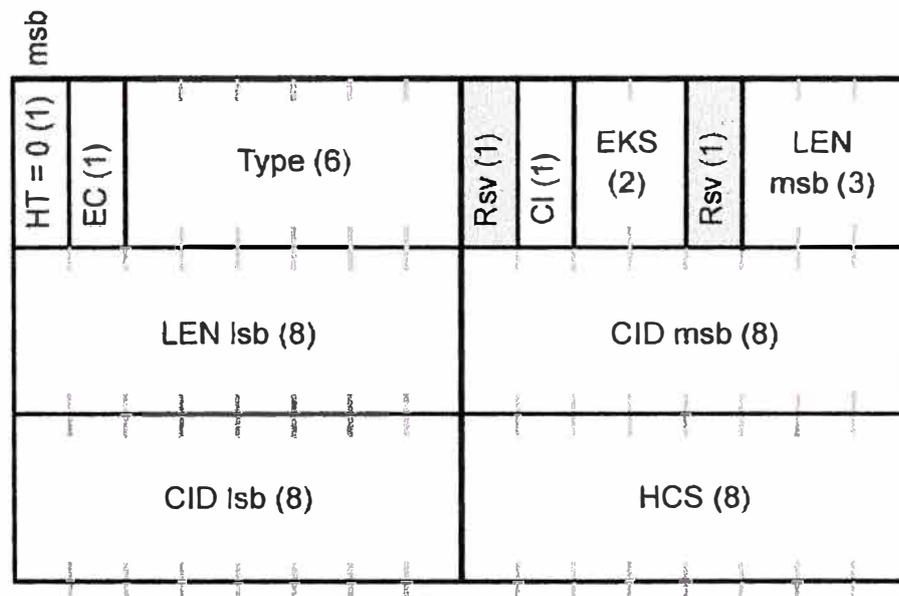


Figura 4.2 Formato de un Generic MAC Header [2].

En el GMH se especifica el HT descrito anteriormente, la encriptación del Payload (EC=1 cuando el Payload no es encriptado, y EC=0 cuando sí es encriptado), el tipo de Payload incluyendo la presencia de subheaders (Type), la existencia del CRC (CI=1 existe CRC y CI=0 no existe CRC), la Encryption Key Sequence (EKS), el largo del MAC PDU incluyendo el header (LEN), el Identificador de Conexión (CID) y la Secuencia Verificadora del Header (Header Check Sequence, HCS).

Para el caso de un BRH, el formato es el mostrado en la figura 4.3

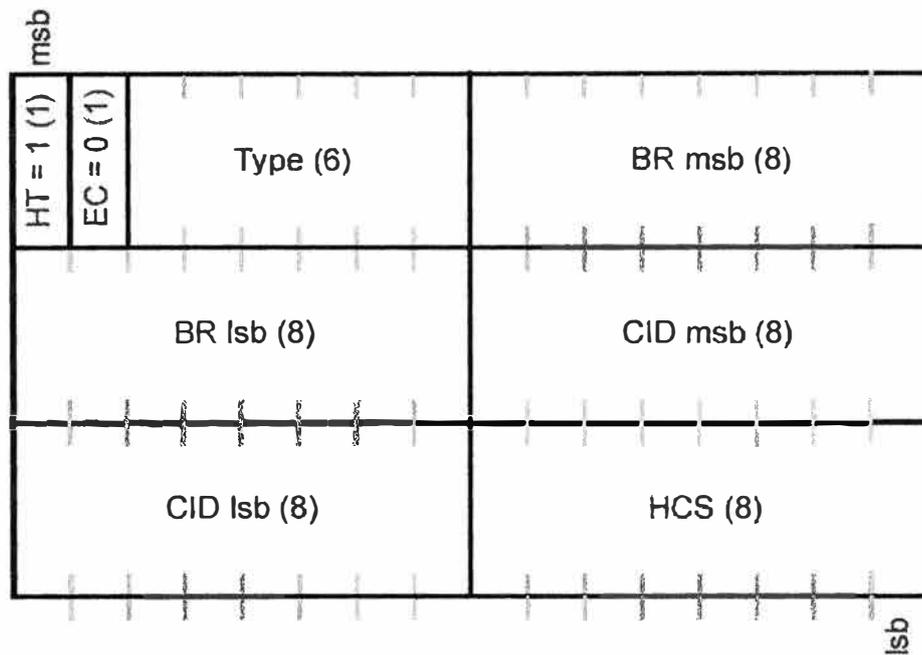


Figura 4.3 Formato de un Bandwidth Request Header [2].

En el BRH el EC será cero, indicando que no existe encriptación, el Type puede ser 000000 para incrementar el ancho de banda en BR bytes ó 000001 que reemplaza el ancho de banda asignado anteriormente, el Bandwidth Request (BR) indicará la cantidad de bytes requeridos, el CID indicará el tipo de flujo de servicio para el cual se está haciendo el requerimiento de ancho de banda y también se incluye el HCS. Se destaca que como el BRH es un requerimiento de ancho de banda, no contiene Payload, y por ende es de largo fijo (6 bytes).

Los mensajes de administración (MAC Management Messages) son insertados en el Payload del PDU y comienzan con un campo Type que especifica el tipo de mensaje como se muestra en la figura 4.4. Seguido al campo Type va el Management Message Payload. Entre todos los tipos de mensajes de administración los siguientes dos poseen especial relevancia:

- Downlink Map (DL-MAP) Message: Define el acceso a la información para el enlace de bajada. Especifica cuando se realizarán las transiciones de la capa física dentro del downlink subframe.
- Uplink Map (UL-MAP) Message: Asigna el acceso al enlace de subida. Define el lugar de transmisión para cada SS como también el lugar para los periodos de contienda

utilizados para las operaciones de manutención inicial y las peticiones de ancho de banda.



Figura 4.4 Formato de un MAC Management Message [2].

Dentro de las características más relevantes respecto a la construcción de un MAC PDU se encuentran:

- **Concatenación.** Es posible agrupar en una transmisión múltiples PDU.
- **Fragmentación.** Un paquete más grande que un PDU puede ser dividido en varios PDUs y de esta forma se evita la disminución del throughput al perderse paquetes de gran tamaño.
- **Parking.** En el caso de paquetes de tamaño menor a un PDU, estos pueden ser agrupados en un mismo PDU y de esta forma se aumenta la eficiencia evitando el mayor overhead que se produciría al enviar paquetes muy pequeños.
- **CRC.** Si es requerido, será incluido en todos los PDUs de datos y de administración y cubre el header y el payload una vez que hayan sido encriptados (si está habilitada la encriptación).
- **Encriptación.** Permite encriptar la información del Payload.
- **ARQ.** El Automatic Repeat Request no es soportada por el estándar, lo que implica que no se solicitan retransmisiones.

Existen cuatro tipos de servicios de scheduling para el enlace de subida soportados:

- **Unsolicited Grant Service (UGS).** Soporta servicios de tiempo real que generen paquetes de largo fijo en forma periódica (ejemplo: voz sobre IP, sin supresión de silencios).
- **Real-Time Polling Service (rtPS).** Soporta servicios de tiempo real que generen paquetes de largo variable, en forma periódica. (ejemplo.: video MPEG).
- **Non-Real Time Polling Service (nrtPS).** Soporta servicios que no son de tiempo real y que generen paquetes de largo variable a intervalos regulares de tiempo (FTP banda ancha).
- **Best Effort Service (BE).** No reserva ancho de banda (no asegura tasas de transmisión),

asigna según tasas disponibles y no da prioridad.

Todos los tipos de servicios requerirán de aumentos o disminuciones en forma dinámica del ancho de banda asignado, exceptuando el UGS el cual tiene una tasa fija de transmisión asignada. Por esto, la estación base debe permitir a los SS que informen sus requerimientos de ancho de banda. Estas peticiones se pueden realizar por medio del BRH como se explicó anteriormente (Campos BR y Type), o bien por medio de un Piggy Back Request que va anexo a un PDU con datos.

El primer tipo se utiliza para entregar el ancho de banda que no esté utilizando, mientras que el segundo se puede utilizar para solicitar un aumento en el ancho de banda cuando se tiene un gran archivo para ser enviado.

4.3 Frequency Division Duplex

En este modo de funcionamiento, el enlace de bajada está separado en frecuencia del enlace de subida, por lo que la BS puede transmitir en ráfagas mientras que el Uplink utiliza TDMA. Este modo permite funcionamiento Full-Duplex por parte de una SS. Si una SS funcionara en Half-Duplex la BS no debe asignar ancho de banda en el enlace de subida en el mismo instante en que espera datos en el enlace de bajada.

4.4 Time Division Duplex

Cuando el funcionamiento es TDD, el enlace de subida y enlace de bajada transmiten en distintos instantes de tiempo, existiendo una trama de duración fija, la cual es dividida en un Uplink sub-frame y Downlink sub-frame, los que a su vez están divididos en ranuras temporales (Physics Slots, PS) como se muestra en la figura 4.5. El ancho de banda del enlace de subida y del enlace de bajada puede variar, desplazando la división entre los sub-frames en forma adaptiva, lo cual puede ser de mucha utilidad para aprovechar el hecho de que el tráfico de Internet es asimétrico, ya que este modo de funcionamiento permite efectuar la división entre el ancho de banda de subida y de bajada en forma simple.

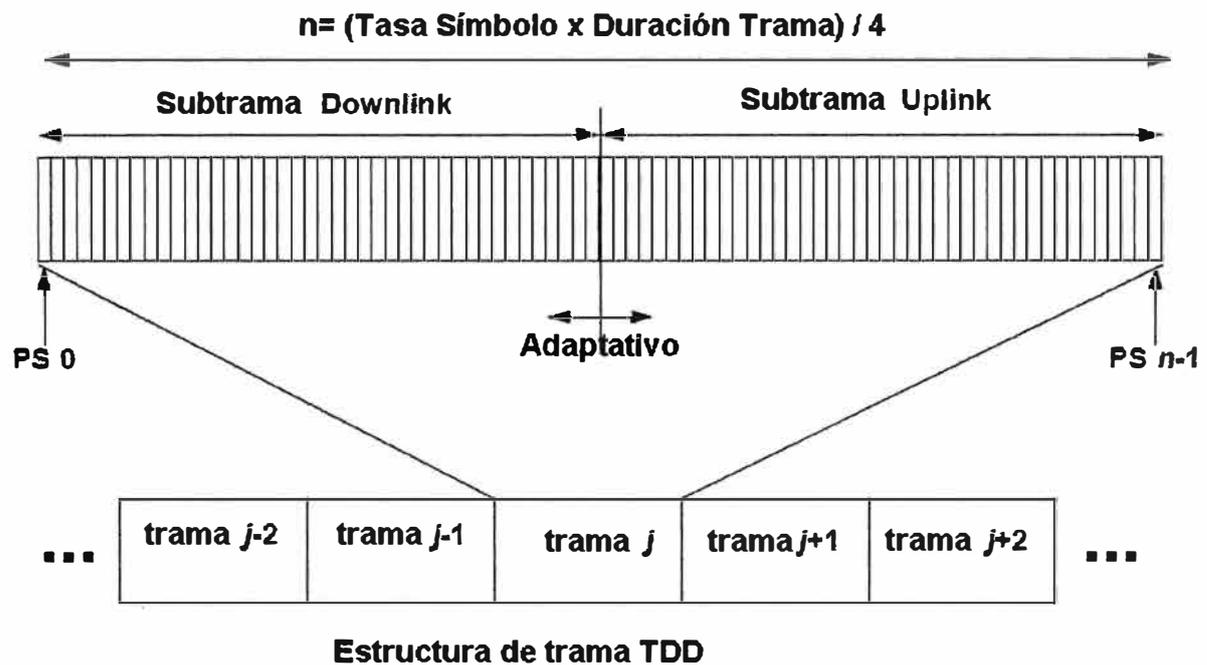


Figura 4.5 Estructura de trama para TDD [2].

Existen mini slots que son asignados por la BS para tareas de mantenimiento o para que las SSs envíen peticiones. En estos mini slots pueden suceder colisiones las que se solucionan utilizando un sistema de backoff exponencial por parte de las SSs, similar al utilizado por CSMA/CA en 802.11.

El Downlink Burst Profile (DBP) que describe las propiedades de la transmisión, es determinado dinámicamente por la BS de acuerdo a la calidad de la señal que recibe de una determinada SS. Se destaca que existe la posibilidad de que distintas SS posean diferentes DBP (debido a que la calidad de los enlaces es distinta) con lo cual se logra una mejora en la eficiencia del ancho de banda.

4.4.1 Downlink Subframe.

El Downlink subframe comienza con un frame de preámbulo para sincronización y ecualización. Esto es seguido del DL-MAP y el UL-MAP declarando los PS en los cuales los burst comienzan. Seguido se tiene una porción TDM en donde la BS envía los datos organizados en burst, con diferentes burst profiles y por ende distintos niveles de robustez a las diferentes estaciones. Estos burst son transmitidos de mayor a menor robustez. En la figura 4.6 se muestra la situación anterior en donde al final del subframe se agrega el Tx/Rx Transition Gap (TTG) que separa el frame de bajada del frame de subida.

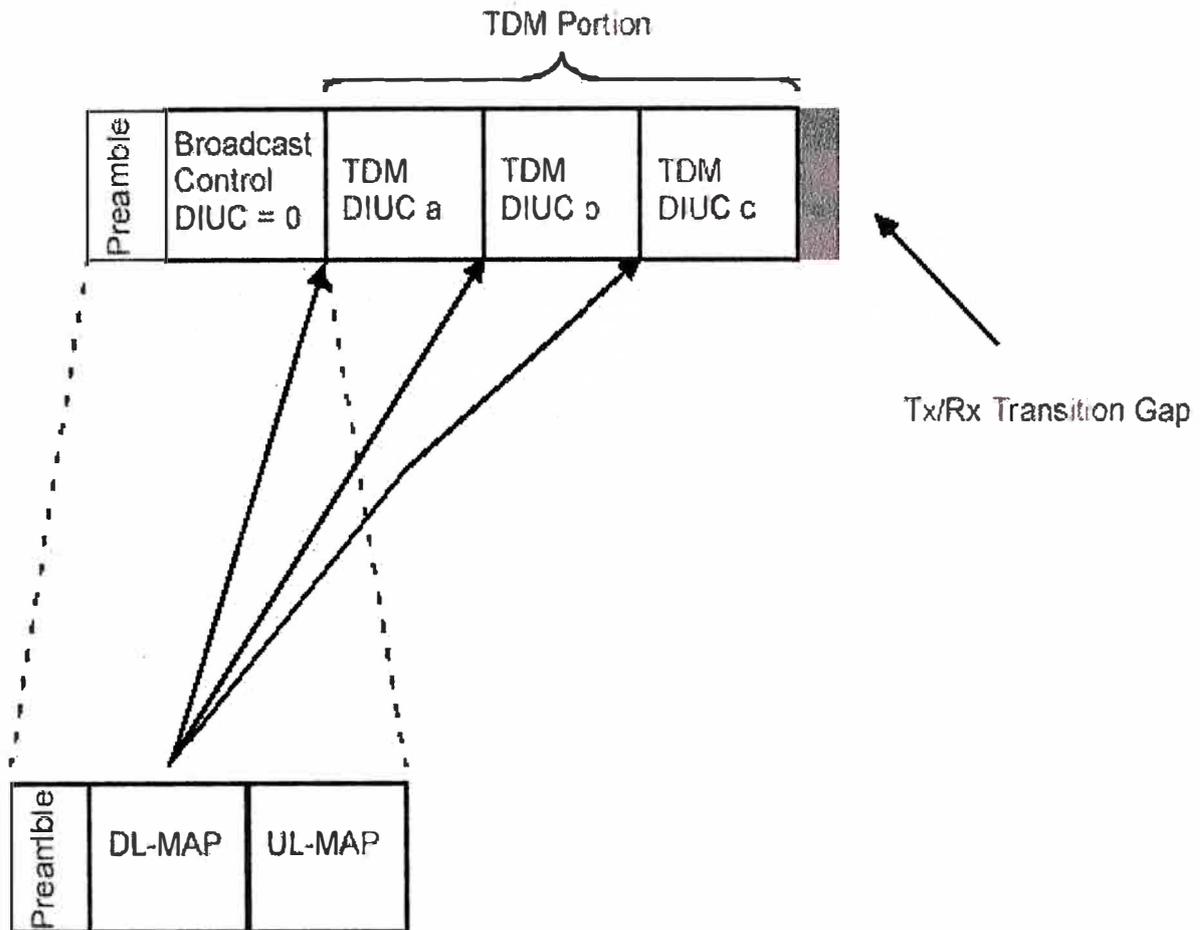


Figura 4.6 Estructura del frame para enlace de bajada en TDD [2].

4.4.2 Uplink Subframe.

La estructura del Uplink Frame usado por una SS para transmitir a la BS se muestra en la figura 4.7. Existen 3 clases de burst que puede transmitir una SS:

- Los que son transmitidos en intervalos de contienda reservados para manutención inicial.
- Los que son transmitidos en intervalos de contienda definidos para intervalos de requerimientos reservados para responder a encuestas multicast y broadcast.
- Los que son transmitidos en intervalos definidos especialmente para una SS individual.

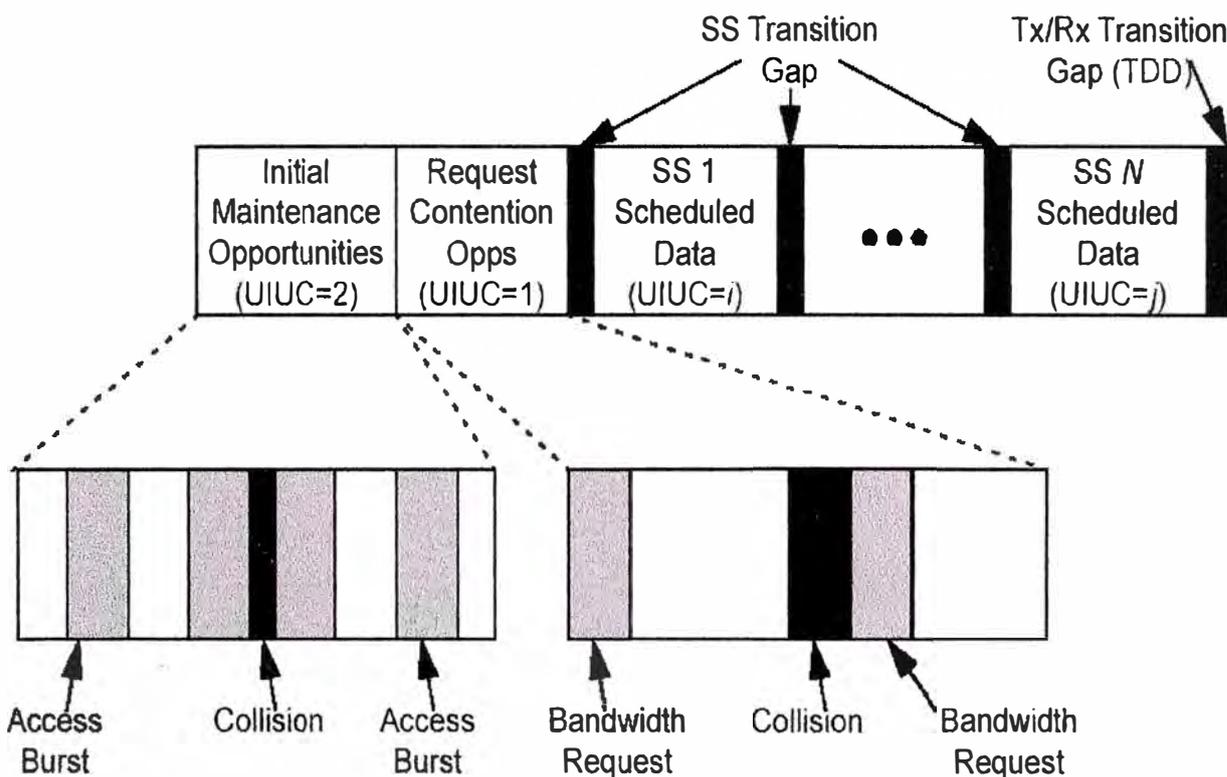


Figura 4.7 Estructura del frame para enlace de subida en TDD [2].

Cualquiera de estos tipos de burst pueden estar presentes en un frame dado en un orden y cantidad (limitada por el número de PS disponibles en el frame) determinada por el BS en el UL-MAP que fue enviado en el downlink subframe. Luego de los dos intervalos de contienda, los slots serán agrupados para la transmisión de una SS con su correspondiente burst profile especificado por la BS. Se destacan en la figura 4.7 el SS Transition Gap que separa la transmisión de varias SSs durante el uplink subframe.

CAPÍTULO V

MODELOS ANALÍTICOS.

A continuación se presentan los análisis teóricos ya existentes y mejoras a estos, un modelo nuevo y simple para el estándar IEEE 802.16, así como también los resultados de las simulaciones realizadas.

5.1 Modelos Teóricos.

5.1.1 Función de Coordinación Distribuida (Distributed Control Function, DCF).

El autor de [3] modela el sistema como una cadena de Markov bidimensional, en donde cada estado es determinado por la cantidad de colisiones que se han producido (número de veces que la estación ha doblado su ventana de backoff), y el valor del contador de backoff. En estado estacionario, se suponen las probabilidades de transmisión τ y las probabilidades condicionales de colisión p , constantes e independientes de cada estación. Utilizando la cadena de Markov se puede demostrar que el valor de τ y p se puede obtener resolviendo numéricamente las siguientes ecuaciones:

$$b_{0,0} = \frac{2(1-2p)(1-p)}{(1-2p)(W+1) + pW(1-(2p)^m)} \quad (5.1)$$

$$\tau = \sum_{i=0}^m \frac{1-p^{m+1}}{1-p} b_{0,0} \quad (5.2)$$

$$p = 1 - (1-\tau)^{n-1} \quad (5.3)$$

donde W es la ventana mínima de contienda, m es la máxima cantidad de etapas de backoff, n es la cantidad de estaciones y $b_{i,k}$ representa la probabilidad en estado estacionario de encontrarse en el estado (i, k) .

Para calcular el Throughput se debe dividir el tiempo utilizado para transmitir información en el tiempo total, para lo cual es necesario conocer la probabilidad de transmitir P_{tr} y la probabilidad de transmitir exitosamente P_s . Las expresiones para P_{tr} y P_s se muestran a continuación:

$$P_{tr} = 1 - (1 - \tau)^n \quad (5.4)$$

$$P_s = \frac{n\tau(1 - \tau)^{n-1}}{1 - (1 - \tau)^n} \quad (5.5)$$

Con lo anterior, se puede expresar el Throughput para DCF como:

$$S_{DCF} = \frac{E[\text{tiempo para enviar el payload}]}{E[\text{largo de un slot de tiempo}]} \quad (5.6)$$

$$= \frac{P_{tr}P_sE[L]}{(1 - P_{tr})\delta + P_{tr}P_sT_s + (1 - P_s)P_{tr}T_c} \quad (5.7)$$

Donde δ es la duración de un slot, $E[L]$ es el primer momento del payload L , T_s es la duración de una transmisión exitosa y T_c es la duración de una colisión.

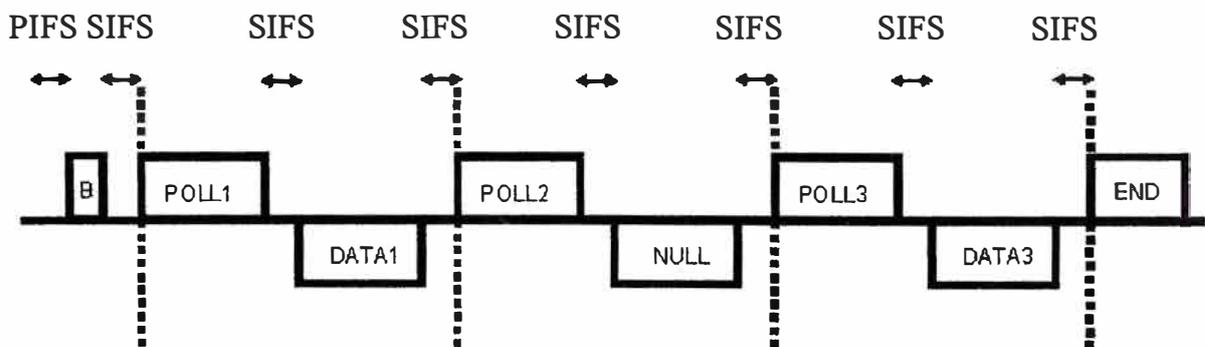
El valor de T_s y T_c dependen del modo de funcionamiento de DCF, que puede ser modo básico o modo RTS/CTS. En la Tabla 5.1 se muestra un resumen con las expresiones donde los superíndices *bas* y *rts* representan el modo básico y el RTS/CTS respectivamente. En esta tabla se agrega H que corresponde al encabezado MAC sumado al encabezado Físico que posee cada paquete enviado. Se destaca que los valores para los tiempos de colisión consideran los ACK timeout y CTS timeout como se detalla en [14].

Tabla 5.1 Expresiones para t_s y t_c al utilizar modo básico y RTS/CTS.

Parámetro	Expresión
T_s^{bas}	= H+E[L]+ σ +SIFS+ACK+ σ +DIFS
T_c^{bas}	= H+E[L]+ σ +SIFS+ACK+DIFS
T_s^{rts}	= RTS+ σ +SIFS+CTS+ σ +SIFS+ H+E[L]+ σ +SIFS+ACK+ σ +DIFS
T_c^{rts}	= RTS+ σ +SIFS+CTS+DIFS

5.1.2 Función de Coordinación Puntual (Point Coordination Function, PCF).

El autor [4] presenta un modelo básico que describe el funcionamiento para PCF. Este modelo considera una encuesta circular tipo round-robin a todas las estaciones asociadas, las cuales se dividen en dos grupos: n Estaciones Activas, las cuales tienen siempre un paquete por transmitir, y $(T - n)$ Estaciones Inactivas, las que están asociadas a la red, pero no tienen paquetes para transmitir. Las estaciones activas contestarán siempre con un frame de datos a la encuesta, mientras que las estaciones inactivas contestarán con un frame del tipo NULL. Una representación temporal del funcionamiento con estas consideraciones se muestra en la figura 5.1.

**Figura. 5.1** Diagrama temporal del funcionamiento de PCF [4].

POLL es definido como el tiempo para realizar un CF-ACK+CF-Poll o un CF-Poll, DATA es un frame del tipo CF-ACK+Data y NULL es un frame del tipo CF-ACK, como se detalla en la tabla 3.2.

Dado que el análisis realizado por [4] no considera los tiempos al comienzo del CFP, ni tampoco al final de este, el autor considera necesario agregar estos dos componentes, a fin de obtener un modelo más preciso. Así, B es la duración del Beacon inicial enviado por el

AP para apoderarse del canal luego de un CP, el cual es enviado después de un tiempo PIFS, y END es un frame del tipo CF-End ó CF-End+ACK según corresponda, que indica la finalización CFP.

Con las anteriores consideraciones, es posible calcular el Throughput de saturación como:

$$S = \frac{nE[L]}{PIFS + B + SIFS + nT_D + (T - n)T_N + END} \quad (5.8)$$

donde T_D y T_N son los tiempos de duración de una encuesta a una estación activa y a una inactiva respectivamente, las que se pueden expresar como:

$$T_D = POLL + \sigma + SIFS + H + E[L] + \sigma + SIFS \quad (5.9)$$

$$T_N = POLL + \sigma + SIFS + NULL + \sigma + SIFS \quad (5.10)$$

En las ecuaciones (5.9) y 5.10) aparece el retardo de propagación σ así como el $H+E[L]$ que representa la duración de un frame de datos, en donde H corresponde a la duración del MAC Header y el PHY Header adicionados a los datos $E[L]$.

Con la mejora agregada al modelo se espera obtener un Throughput de saturación menor pero al mismo tiempo más exacto.

5.1.3 IEEE 802.16.

Para el estándar IEEE 802.16, no se conoce ningún modelo como los presentados anteriormente para DCF y PCF del estándar IEEE 802.11, por lo cual, a continuación se plantea un primer modelo simple que permite representar el funcionamiento del protocolo a nivel de acceso al medio, y de esta forma calcular el rendimiento de saturación en la red.

El modelo considera la existencia de n estaciones que están en estado de saturación, y existe sólo tráfico desde las estaciones hacia la base. Todas estas estaciones se encuentran en idénticas condiciones y el sistema funciona en modo TDD.

El frame inicialmente es de 1 ms de duración, existen 4000 slots físicos (PS, Physical Slots) en un frame, el ancho de banda del canal utilizado es 20 MHz, la modulación utilizada es QPSK 1/2 para el enlace de bajada que solo transmite frames de control, y 64-QAM 3/4 para los datos, y la tasa de símbolos es 16[MBaud]. Todas estas consideraciones están de acuerdo al estándar [2]. Adicionalmente, se considera que el sistema lleva

funcionando un largo tiempo de tal forma que no existen nuevas asociaciones de estaciones ni requerimientos adicionales de ancho de banda.

En la figura 5.2 se muestra la estructura del frame para el IEEE 802.16. Se puede apreciar que el superframe es dividido en el Downlink Subframe (DL Subframe) y el Uplink Subframe (UL Subframe).

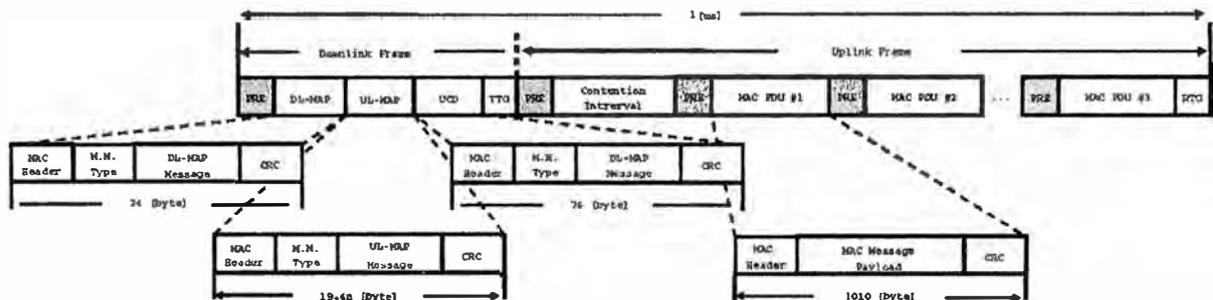


Figura 5.2 Estructura del frame para el IEEE 802.16 funcionando en TDD [2][5][6]

a) DL Subframe.

El DL Subframe comienza con un preámbulo (PRE) de 32 símbolos utilizado para sincronización, seguido a éste se envía el DL-MAP, que precede al UL-MAP y al UDC (Uplink Channel Descriptor), para terminar con un TTG (Tx/Rx Transition Gap) que corresponde a un tiempo para que las estaciones cambien del estado recepción al estado de transmisión, y que debe ser de una duración mínima de 5[μ s] según el estándar [2].

El DL-MAP consiste de un MAC Header de 6[byte], un Management Message Type (M.M. Type) de 1[byte] y un DL-MAP Message de 13[byte], valor que normalmente es mayor pues se necesita indicar el comienzo de cada paquete enviado en el enlace de bajada. Como en este caso se considera solo tráfico de subida, estos campos no existen. El DL-MAP termina, al igual que todos los MAC-PDU, con un CRC de 4[byte].

El UL-MAP consiste de un MAC Header de 6[byte], un Management Message Type (M.M. Type) de 1[byte] y un UL-MAP Message de largo variable. Este valor depende de los mensajes que van a ser enviados en el enlace de subida, por cada MAC-PDU a enviar, este campo aumentará en 4[byte], aumentando así la duración del DL-Subframe. El UL-MAP termina, al igual que todos los MAC-PDU, con un CRC de 4[byte].

El UDC consiste de un MAC Header de 6[byte], un Management Message Type (M.M. Type) de 1[byte] y un UL-MAP Message de 65[byte]. Este mensaje de administración describe el largo del preámbulo a utilizar, el tamaño de los intervalos de contienda, la

duración de los SS Transition Gaps, el tipo de modulación, el tipo de FEC utilizado entre otras características para el enlace de subida. El UCD termina, al igual que todos los MAC-PDU, con un CRC de 4[byte].

b) UL Subframe.

El UL-MAP comienza con dos intervalos de contienda para mantenimiento y requerimientos de ancho de banda. Seguido a este intervalo de contienda, se envían los MAC-PDUs, cada uno de ellos precedido por un preámbulo que puede ser de 16 ó 32 símbolos, valor que es definido en el UCD. Al final del DL-Subframe existe la posibilidad que exista un intervalo de tiempo donde el canal no es utilizado, esto debido a que el ultimo paquete enviado no coincide perfectamente con el fin del DL-Subframe. Para terminar, se agrega el RTG (Rx/Tx Transition Gate) similar al TTG.

Con todo lo anterior, se puede expresar el rendimiento como:

$$S = \frac{N.E[L]}{I[ms]} \quad (5.11)$$

donde N es la cantidad de paquetes enviados en el UL-Subframe por las n estaciones existentes y se puede expresar como:

$$N = \left[\frac{(1 - T_{DSF} - TTG - RTG[ms]) * P\left[\frac{PS}{ms}\right]}{T_{MPDU} [PS]} \right] \quad (5.12)$$

en donde T_{DSF} es la duración del DL-Subframe, T_{MPDU} es la duración de un MAC-PDU, y el numerador de (5.8) corresponde a la cantidad de PSs disponibles para transmitir, lo cual debe dividirse en la duración (en [PS]) de un MAC-PDU.

El valor de T_{DSF} se puede expresar como:

$$T_{DSF} = PRE + DL-MAP + UL-MAP + UCD \quad (5.13)$$

donde la duración de UL-MAP depende de la cantidad de estaciones existentes n.

CAPÍTULO VI

RESULTADOS INDIVIDUALES

6.1 IEEE 802.11 DCF.

En la tabla 6.1 se muestra un resumen con los parámetros utilizados en las simulaciones.

Tabla 6.1 Resumen de los parámetros utilizados para la simulación del estándar IEEE 802.11

Parámetro	Valor
W	32
m	5
PHY Header	192 bits
MAC Header	224 bits
RTS	160 bits
CTS	112 bits
ACK	112 bits
δ	20 μ s
SIFS	10 μ s
DIFS	50 μ s
ACK Timeout	314 μ s
CTS Timeout	314 μ s
MAC Payload	8000 bits
Tasa de Transmisión	1 Mbps

En la figura 6.1 se puede apreciar como el desempeño del sistema decrece notablemente cuando la cantidad de usuarios aumenta en el modo básico. Es posible también apreciar

como se mejora el desempeño con el uso de las tramas RTS/CTS.

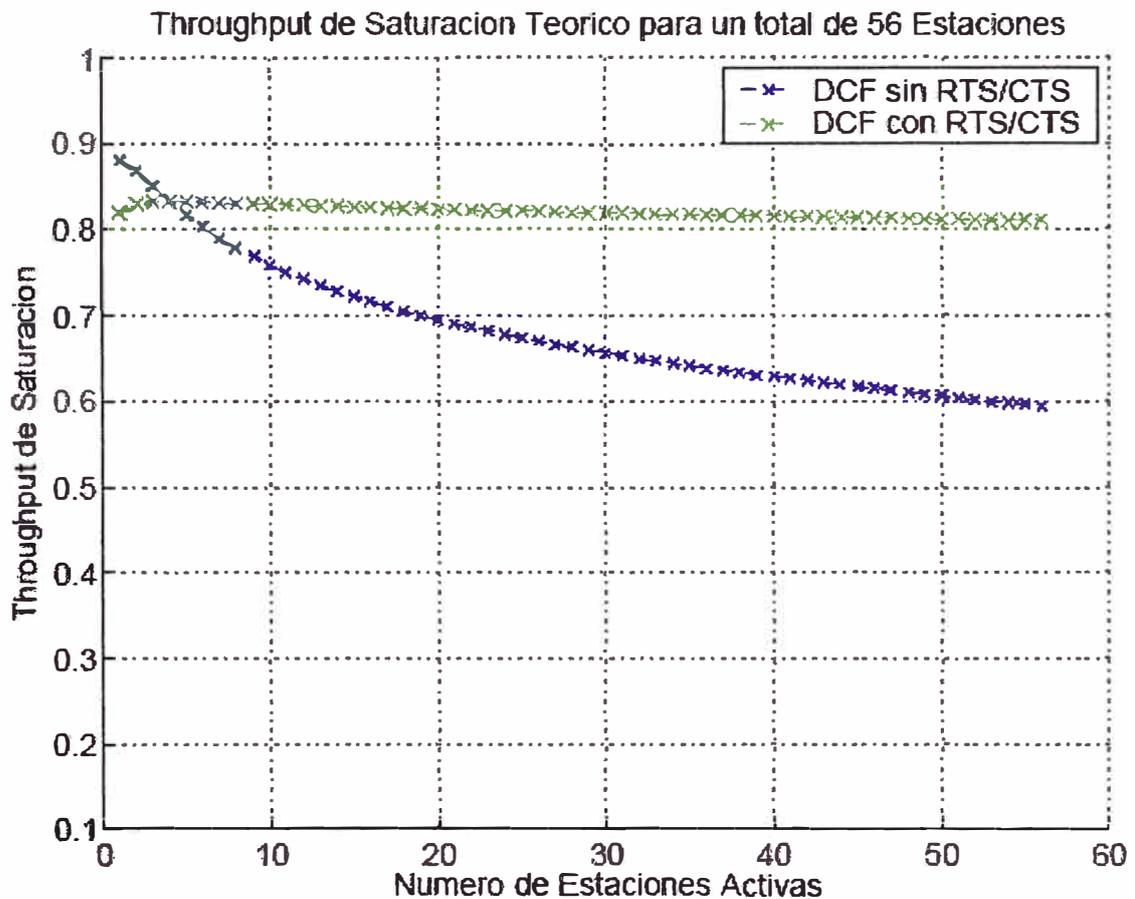


Figura 6.1 Reproducción de los resultados obtenidos por [4].

En la figura 6.2 se puede observar que si se aumenta la ventana inicial de contienda, cuando la cantidad de usuarios es elevada, se logra una considerable mejora, mientras que cuando existen pocos usuarios en la red, un aumento en W causaría una notoria disminución del Throughput. Esto último es esperable, pues si existen muy pocos usuarios en la red, no tiene mucho sentido elegir una ventana mínima de contienda muy grande, pues como existen pocos usuarios, la probabilidad de colisión disminuye.

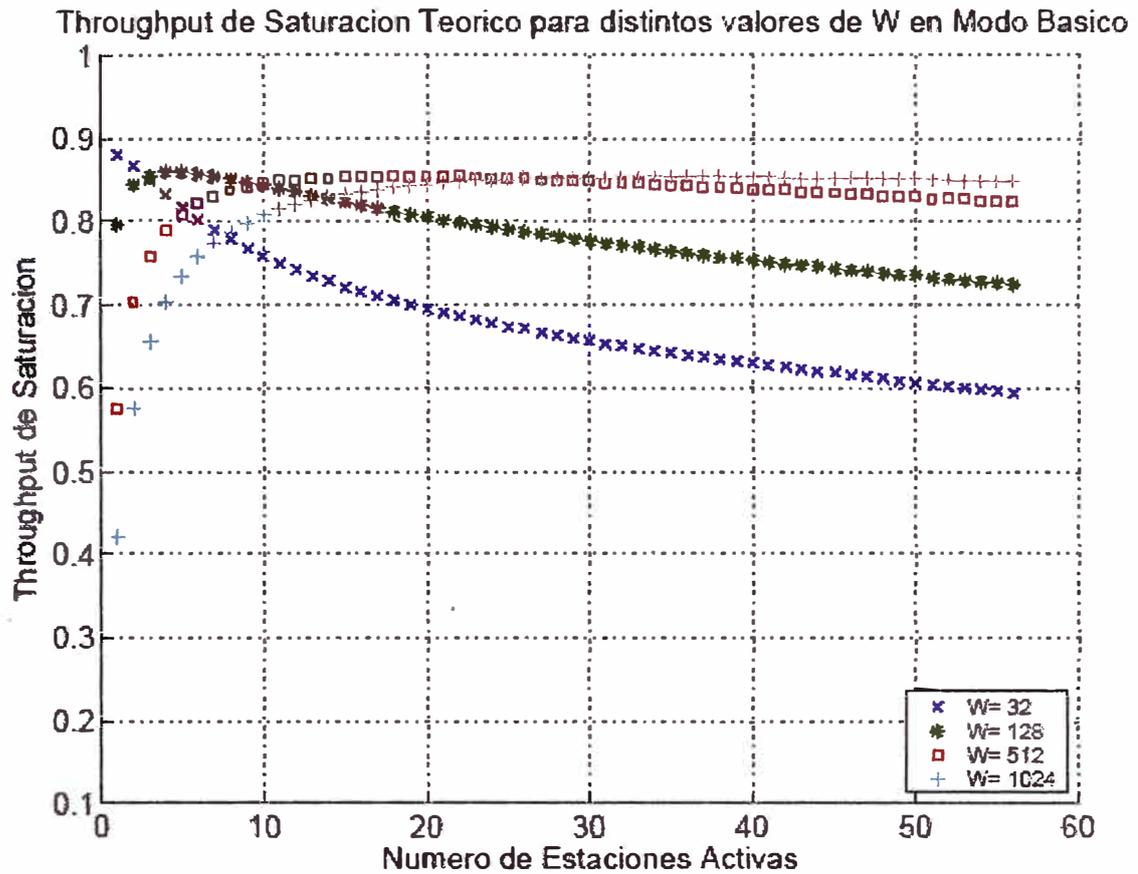


Figura 6.2 Throughput de saturación para distintos W en modo básico.

Para el caso del modo RTS/CTS, en la figura 6.3 es posible observar que no se logra una mejora considerable al aumentar el tamaño de la ventana de contienda inicial, aunque existan muchos usuarios en la red. Para el caso de pocos usuarios, al aumentar W disminuye el Throughput debido a la misma razón que en la figura 6.2.

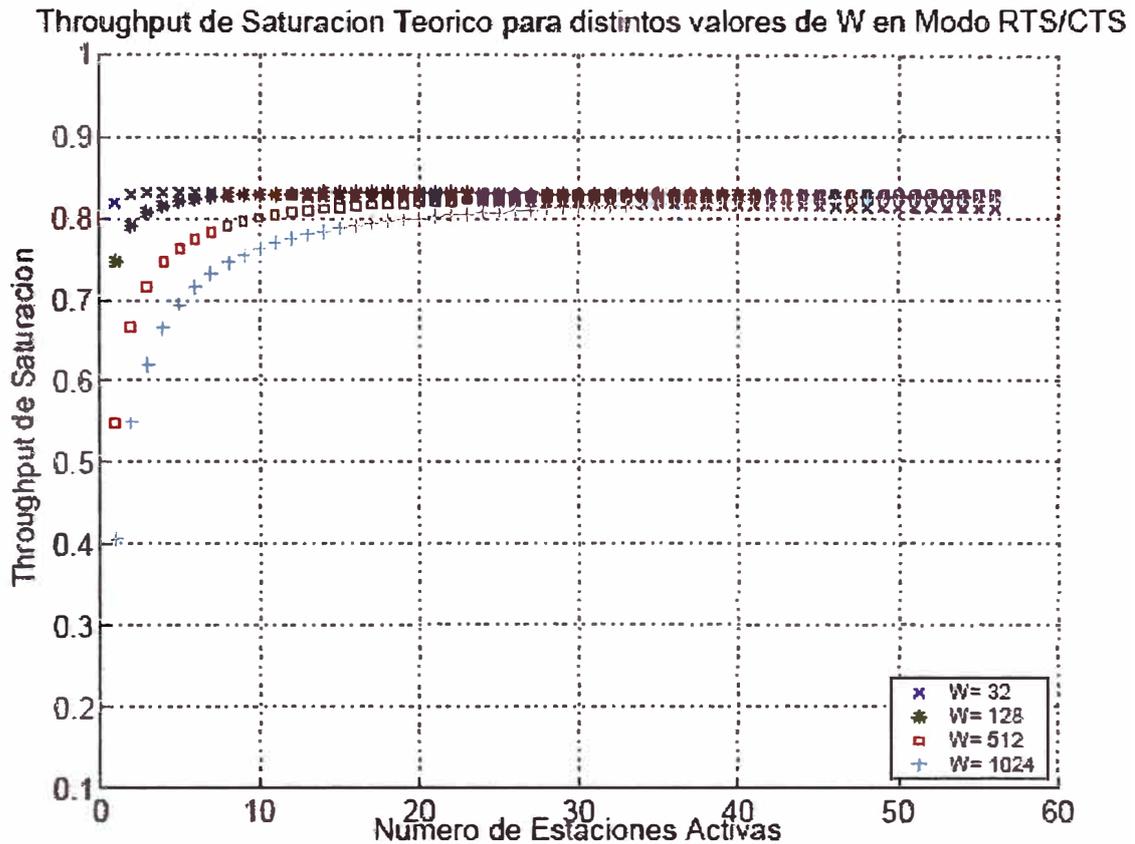
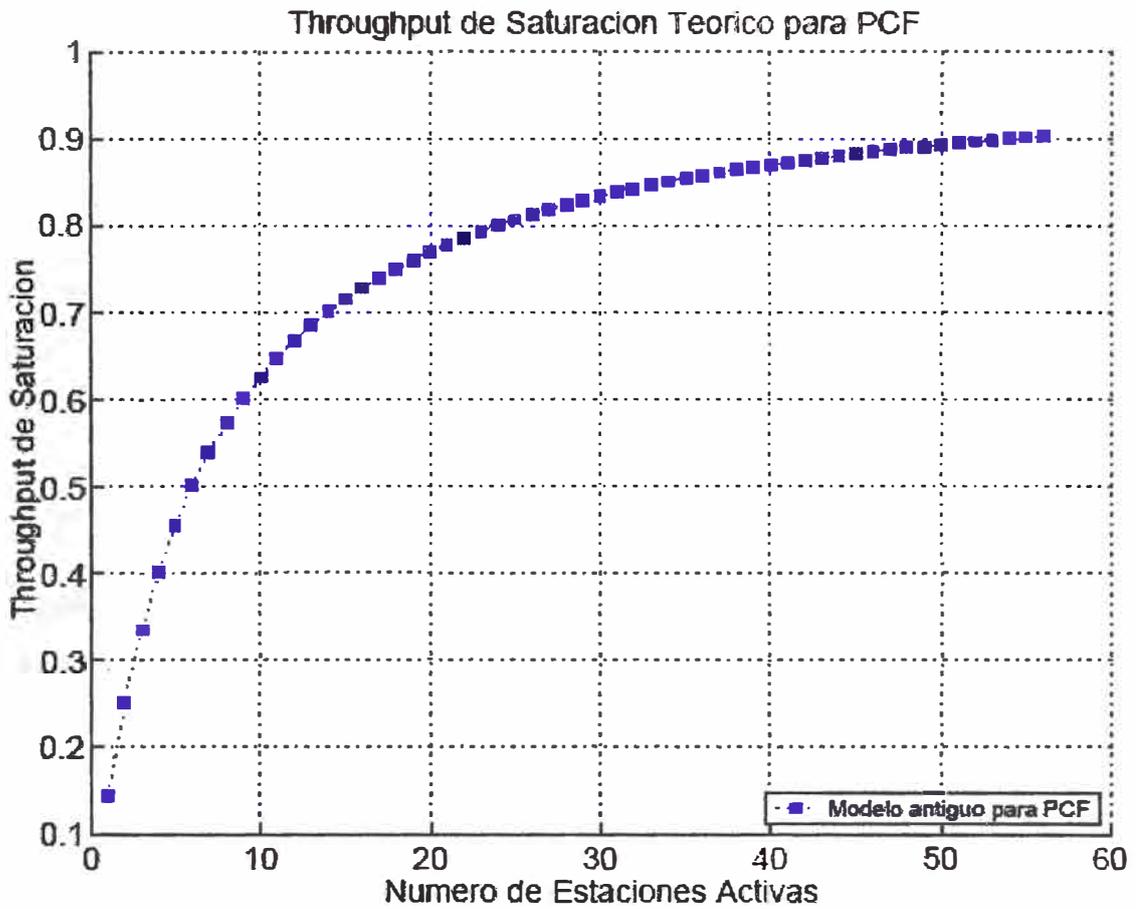


Figura 6.3 Throughput de saturación para distintos W en modo RTS/CTS.

6.2 IEEE 802.11 PCF .

Para las simulaciones de PCF se utilizaron los mismos parámetros definidos en la tabla 6.1, agregando que el END (CF-End ó CF-End+CF-ACK) es de un largo de 160 bits, mientras que el Beacon es de 240 bits.

El primer resultado obtenido fue la reproducción de las curvas obtenidas por [4], en la que se muestra como cambia el Throughput agregado a medida que aumenta la cantidad de estaciones. El resultado se muestra en la figura 6.4 en la que es posible apreciar que a medida que la cantidad de estaciones activas aumenta, el Throughput agregado crece tendiendo a estacionarse cerca de 0.9, lo cual habla muy bien del desempeño en sistemas con alta carga. Si embargo, hay que destacar también que cuando existen pocos usuarios, el Throughput decae a valores cercanos al 10%, esto debido al sistema circular tipo round robin utilizado.



En la figura 6.5 se muestra la comparación entre el modelo antiguo y el modelo propuesto, comprobándose que existe cierta diferencia, haciendo que el modelo anterior sobredimensionara la eficiencia de PCF.

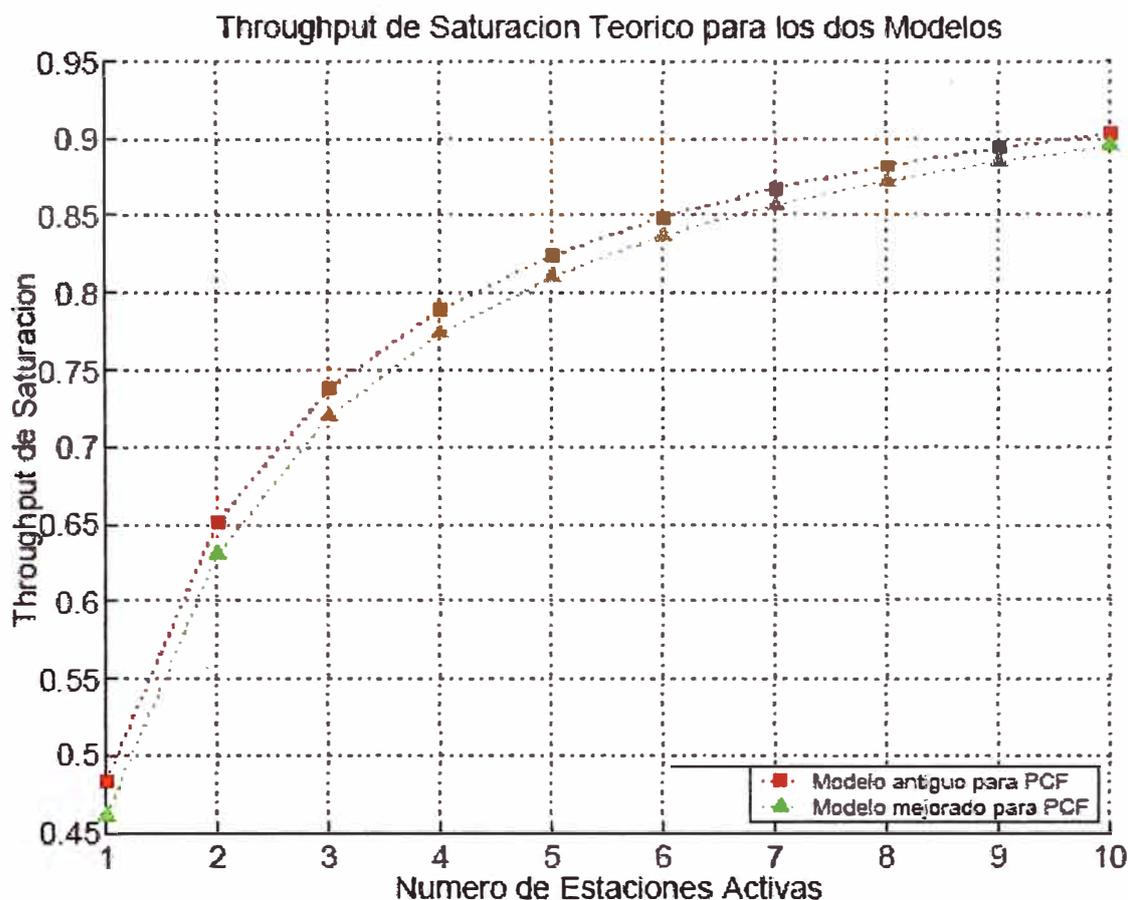


Figura 6.5 Throughput de saturación comparativo entre los dos modelos.

6.3 IEEE 802.16.

La figura 6.6 muestra el resultado obtenido para un frame de 1, 2 y 4 ms de duración utilizando los parámetros definidos en la tabla 6.2. En esta figura se pueden apreciar discontinuidades en las curvas, lo cual es debido al aumento del largo del DL-Subframe a medida que la cantidad de estaciones aumenta. Se aprecia también que el Throughput de saturación aumenta cuando también aumenta el tamaño del frame.

Tabla 6.2 Resumen de los parámetros utilizados para la simulación del estándar IEEE 802.16

Parámetro	Valor
Modo de Funcionamiento	TDD
Payload de los Mensajes	1,000 bytes
PRE	21 símbolos
Modulación/Codificación	QPSK 1/2 y 64-QAM 3/4

BW del Canal	20 MHz
Tasa de Transmisión	MBaud
Physical Slots	4000 PS/frame
Símbolos en Slot	4 símbolos/PS
Duración del Frame	1 ms
Contention Interval[6]	10 PS
TTG, RTG [5]	45 PS

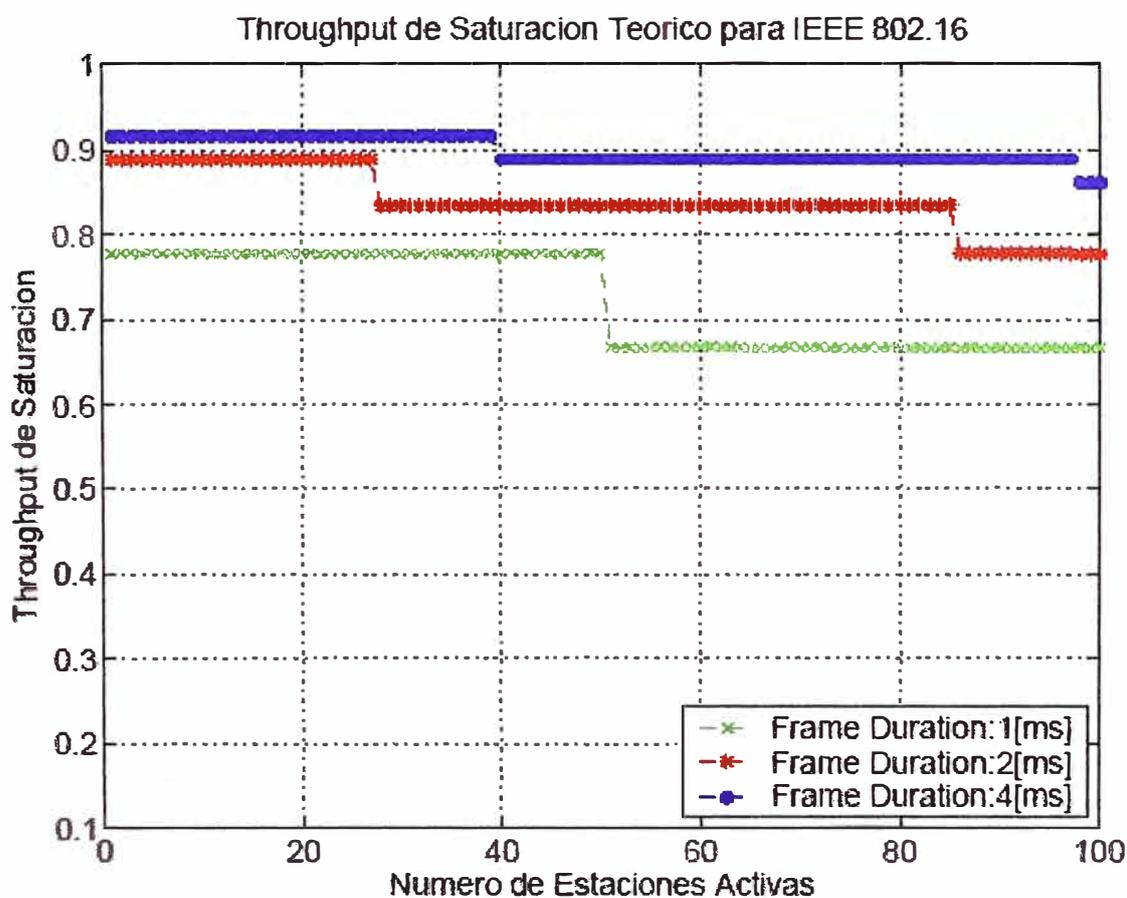


Figura 6.6 Throughput de saturación para el estándar IEEE 802.16.

Luego fue modificado el tamaño a 100, 500, 1000, 1500 byte con un frame de 2 ms obteniéndose los resultados mostrados en la figura 6.7. En esta grafica es posible apreciar que a medida que el tamaño del paquete disminuye, el Throughput de saturación también lo hace, esto debido que el overhead MAC y PHY para cada paquete se hace comparativamente más importante.

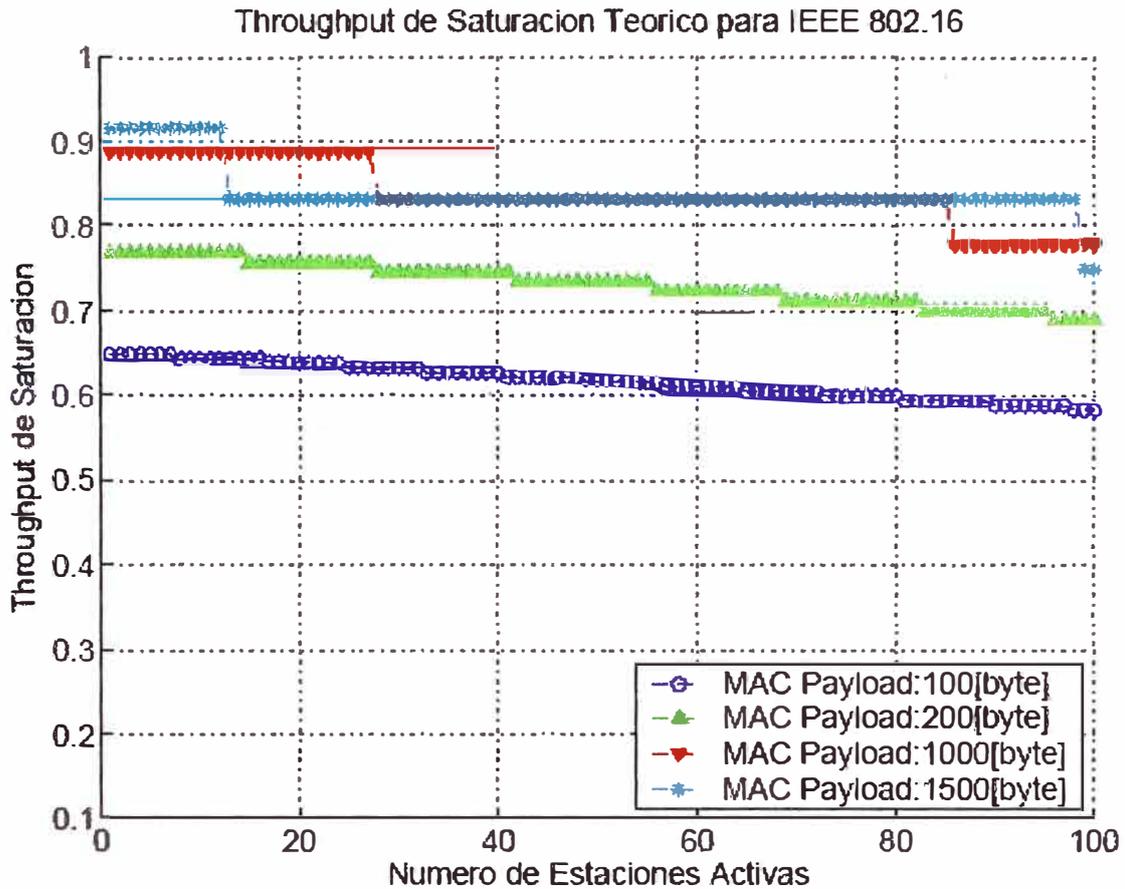


Figura 6.7 Throughput de saturación al variar $E[L]$.

6.4 Evaluación Comparativa de Throughput.

Finalmente, se presenta el resultado de una simulación que compara los métodos de acceso al medio para un número de estaciones que crece hasta 100. El tamaño del frame para el estándar IEEE 802.16 fue elegido de 2 ms y el payload para todos los casos fue 8000 bits. Para el estándar IEEE 802.11 se eligió $W = 32$ y $n = 5$. El resultado obtenido se muestra en la figura 6.8.

De la figura 6.8 se puede apreciar que a nivel de acceso al medio, el protocolo que presenta mejor desempeño es el IEEE 802.16, el cual con un frame de 4[ms] puede manejar cerca de 100 terminales y utilizando cerca del 90% del canal para la transmisión de datos.

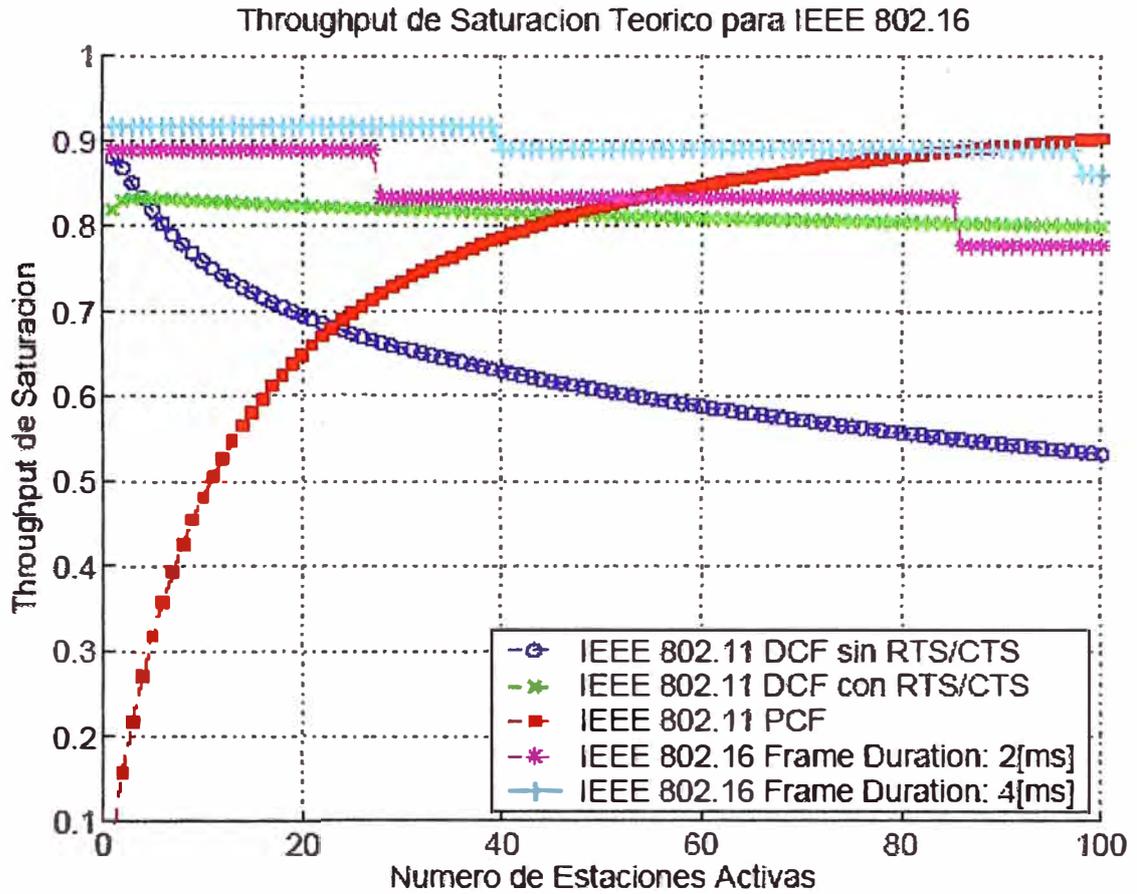


Figura 6.8 Comparación entre los estándares IEEE 802.11 e IEEE 802.16.

CAPÍTULO VII

ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE WI-FI/WIMAX

7.1 Introducción

La diferencia fundamental entre Wimax y Wi-Fi radica en que están diseñados para aplicaciones totalmente diferentes. El Wi-Fi es una tecnología de red local diseñada para agregar movilidad a redes LAN cableadas privadas. El Wimax fue diseñado para entregar servicio de acceso de banda ancha (BWA) al Área Metropolitana. La idea detrás del BWA es de proveer servicios de acceso de Internet inalámbrico a localidades físicas para competir con los servicios de cable modem y xDSL. Entonces mientras el Wi-Fi soporta rangos de transmisión de hasta unos pocos cientos de metros, los sistemas Wimax pueden soportar usuarios a rangos de hasta 48 kilómetros.

7.2 Tecnología de Radio Wimax/Wi-Fi

Además de la diferencia obvia en el rango de transmisión hay un número de mejoras en la tecnología de enlace de radio que distinguen al Wimax del Wi-Fi. El estándar de LAN inalámbrica IEEE 802.11 describe cuatro interfaces de enlace de radio que operan en la banda de radio no licenciada de 2.4 GHz o 5 GHz; las cuatro resumidas en la tabla 7.1. Los estándares Wimax incluyen un rango mucho mayor de implementaciones potenciales para satisfacer los requerimientos de carriers alrededor del mundo.

La versión original del estándar 802.16 emitida en Diciembre de 2001 direcciona sistemas operativos en la banda de frecuencias entre 10-66 GHz. Estos sistemas de alta frecuencia requieren línea de vista (LOS) a la estación base lo cual incrementa el costo y los límites de las estaciones de clientes. Además en los sistemas línea de vista las antenas de usuario deben ser alineadas cuando una nueva celda es agregada a la red.

La versión del estándar 802.16 correspondiente a Enero del 2003 describe sistemas que operan en la banda de frecuencia que va de 2 GHz a 11 GHz. Esta banda de frecuencia

inferior soporta enlaces sin línea de vista (NLOS), tal cual se describió en el capítulo II, eliminando la necesidad de alinear la unidad de cliente con la BS.

Tabla 7.1 Interfases de Radio WLAN IEEE 802.11

Estándar	Velocidad de Datos Máxima	Velocidades de Retorno	Canales Provistos	Banda de Frecuencias	Tecnología de Radio
802.11	2 Mbps	1 Mbps	3	2.4 GHz	FHSS o DSSS
802.11b	11mbps	5.5 Mbps 2 Mbps 1 Mbps	3	2.4 GHz	DSSS
802.11a	54 Mbps	48 Mbps 36 Mbps 24 Mbps 18 Mbps 12 Mbps 9 Mbps 6 Mbps	12	5 GHz	OFDM
802.11g	54 Mbps	Igual que 802.11a	3	2.4 GHz	OFDM

Mientras que todas las implementaciones Wi-Fi usan bandas de frecuencia no licenciadas, WiMAX puede operar en el espectro licenciado o no licenciado. Dentro del rango de 2-11 GHz correspondiente a 802.11a, 4 bandas en USA son particularmente atractivas:

- Licenciada 2.5 Ghz MMDS
- Licenciada 3.5 GHz
- No Licenciada 3.5 GHz
- No Licenciada 5 GHz U-NII

A modo de resumen comparativo, la tabla 49 muestra las características de los enlaces de radio de IEEE 802.16.

Tabla 7.2 Resumen de Enlaces de Radio 802.16

	802.16	802.16a	802.16e
Espectro	10 – 66 GHz	2 – 11 GHz	< 6 GHz
Configuración	LOS	NLOS	NLOS
Velocidad de Datos	34 a 134 Mbps (Canal de 28 Mhz)	≤ 70 o 100 Mbps (Canal de 20 Mhz)	Hasta 15 Mbps
Modulación	QPSK, 16-QAM, 64-QAM	256 Subportadoras OFDM usando QPSK, 16-QAM, 64-QAM, 256-QAM	Igual que 802.16a
Movilidad	Fijo	Fijo	≤ 113 Km/h
Ancho Banda Canal	20, 25, 28 MHz	Seleccionable 1.25 a 20 MHz	5 MHz (Planificado)
Radio Celda Típico	1.6 a 4.8 Km	4.8 a 8 Km	1.6 a 4.8 Km

La tabla 7.3 muestra una comparación general de los atributos de ambas tecnologías, respecto de las características avanzadas.

Tabla 7.3 Comparación de Tecnología WiMAX y Wi-Fi

	WiMAX 802.16a	Wi-Fi 802.11b	Wi-Fi 802.11a/g
Aplicación Primaria	Acceso Inalámbrico de Banda Ancha	LAN Inalámbrico	LAN Inalámbrico
Banda de Frecuencia	Licenciada/ No Licenciada 2 – 11 GHz	2.4 GHz ISM	2.4 GHz ISM (g) 5 GHz U-NII (a)
Ancho Banda Canal	Ajustable 1.25 M a 20 Mhz	25 Mhz	20 MHz
Half/Full Duplex	Full	Half	Half
Tecnología de Radio	OFDM (256-canales)	DSSS	OFDM (64-canales)
Eficiencia BW	≤ 5 bps/Hz	≤ 0.44 bps/Hz	≤ 2.7 bps/Hz
Modulación	BPSK, QPSK, 16-, 64-, 256-QAM	QPSK	BPSK, QPSK, 16-, 64 QAM
FEC	Código Convolucional Reed Solomon	No	Código Convolucional
Encriptado	Obligatoria- 3DES Opcional- AES	Opcional- RC4 (AES en 802.11i)	Opcional- RC4 (AES en 802.11i)
Protocolo de Acceso	Requerido/Garantizado	CSMA/CA	CSMA/CA
• Mejor Esfuerzo	Si	Si	
• Prioridad Datos	Si	802.11e WME	802.11e WME
• Retardo Consistente	Si	802.11e WSM	802.11e WSM
Movilidad	WiMax Móvil (802.11e)	En Desarrollo	En Desarrollo

Mesh	Si	Propietario Fabricante	Propietario Fabricante
-------------	-----------	-----------------------------------	-----------------------------------

CONCLUSIONES

1. Conclusiones Generales.

El costo y complejidad asociado con la infraestructura telefónica y cableado tradicional ha resultado en un vacío significativo de cobertura de banda ancha en todas las geografías internacionales. Tempranos intentos de usar tecnología inalámbrica para llenar estos vacíos de cobertura han involucrado a un número de soluciones propietarias para acceso de banda ancha inalámbrica que han fragmentado el mercado sin proveer economías de escala significantes.

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 y alcanzar millones de nuevos clientes residenciales y de negocios en todo el mundo.

El Forum Wimax (www.wimaxforum.org) es un grupo de la industria focalizado en la creación de perfiles de sistemas y programas de conformidad para ayudar a asegurar la interoperabilidad entre dispositivos de diferentes fabricantes. Existen numerosos fabricantes de la talla de Intel, Alvarion, Proxim, Hughes, etc., que participan activamente en este esfuerzo de la industria para ayudar a reducir riesgos de inversión a operadores y proveedores de servicio mientras posibilitan a ellos tomar ventaja en forma del tremendo mercado potencial de los accesos de banda ancha inalámbrico.

2. Conclusiones del Análisis de la Evaluación de Rendimiento.

En este informe se ha presentado un análisis detallado del control de acceso al medio para los estándares IEEE 802.11 e IEEE 802.16. Para el caso del IEEE 802.11 el análisis se centró en la Point Coordination Function, mientras que para el IEEE 802.16 el análisis fue

hecho en forma general. En este informe se analizó con profundidad la PCF para el estándar IEEE 802.11 así como también se presentó una explicación del acceso al medio para el estándar IEEE 802.16.

Se mostró que si bien el estándar IEEE 802.16 posee una serie de mejoras en comparación con estándares más antiguos, esto trae consigo un control de acceso al medio notablemente más complejo.

Se analizó el funcionamiento de DCF reproduciéndose los resultados obtenidos por otros investigadores [3] [4]. Para PCF junto a la reproducción de los resultados, se mejoró el modelo haciéndolo más preciso. Para el caso del estándar IEEE 802.16 se propuso un nuevo modelo que representa el funcionamiento del acceso al medio para este protocolo.

Se pudo apreciar la importancia que poseen el tamaño del paquete a ser enviado y el tamaño del frame para el caso del estándar IEEE 802.16, observándose que variaciones en estos parámetros afectaban considerablemente el desempeño a nivel de acceso al medio.

Finalmente se comparó el desempeño de los tres métodos de acceso en función del Throughput de saturación obtenido en la estación base, encontrándose que el acceso al medio del estándar IEEE 802.16 se comporta de mejor forma cuando la cantidad de estaciones aumenta.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications, ISO/IEC 8802-11: 1999(E), ANSI/IEEE Std. 802.11 1999 edition, (Aug. 1999).
- [2] IEEE Standard for Local and metropolitan area networks. Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems, IEEE Std 802.16-2001TM, 8 April 2002.
- [3] Giuseppe Bianchi, "Performance Analysis of the IEEE 802.11 Distributed Coordination Function", IEEE JOURNAL ON SELECTED AREAS IN COMMUNICATIONS, VOL. 18, NO. 3, MARCH 2000
- [4] J. Dong, M. Ergen, P. Varaiya and A. Puri, "Improving the Aggregate Throughput of Access Points in IEEE 802.11 Wireless LANs", 28th Annual IEEE International Conference on Local Computer Networks
- [5] G. Nair, J. Chou, T. Madejski, K. Peryez, D. Putzolu and J. Sydir, "IEEE 802.16 Medium Access Control and Service Provisioning", Intel Technology Journal, Vol.08, August 2004.
- [6] Christian Hoymann, Markus Püttner and Ingo Forkel, "Initial Performance Evaluation and Analysis of the global OFDM Metropolitan Area Network Standard IEEE 802.16a/ETSI HiperMAN", RTWH Aachen University
- [7] GuoSong Chu, Deng Wang, Shunliang Mei, "A QoS Architecture for the MAC Protocol of IEEE 802.16 BWA System", IEEE 2002 International Conference on Communications, Circuits and Systems and West Sino Expositions.
- [8] Eklund, Marks, Stanwood, "IEEE Standard 802.16: A Technical Overview of the WirelessMANTM Air Interface for Broadband Wireless Access", IEEE Communications Magazine, June 2002.
- [9] White Paper, "IEEE 802.16 Standard and WiMAX Igniting Broadband Wireless Access", Worldwide Interoperability for Microwave Access Forum.

- [10] Jim Geier, “A Future Option for Wireless MANs”, Tutorial -www.wi-fiplanet.com
- [11] Kitti Wongthavarawat, Aura Ganz, “IEEE 802.16 based last mile broadband wireless military networks with quality of service support”, MILCOM 2003-IEEE Military Communications Conference, no. 1, Oct 2003.
- [12] Michael F. Finneran , “WiMax versus Wifi: A Comparison of Technologies, Markets, and Business Plans”, dBrn Associates Inc., Junio 2004
- [13] Kevin F. R. Suitor, “Business White Paper Broadband Wireless Access”, Redline Communications, Revision 2: June 2004
- [14] Haitao Wu, Yong Peng, Keping Long, Shiduan Cheng, Jian Ma “Performance of Reliable Transport Protocol over IEEE 802.11 Wireless LAN: Analysis and Enhancement*”, IEEE INFOCOM 2002.
- [15] Itzik Kitroser (IEEE P802.16-REVd Chief Technical Editor), Air Interface for Fixed. Broadband Wireless Access Systems (Draft Revision). Año 2004.
- [16] INTEL Corporation, White Paper: Broadband Wireless Access – Año 2003.
- [17] Eugene Crozier, White Paper: WiMAX NLOS Features, WiMax Forum – Año 2004.
- [18] Michael F. Finneran, WiMax versus Wi-Fi, dBrn Associates Inc., Año 2004