



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

COMPARACIÓN DE LA EFICIENCIA
VOLUMÉTRICA ENTRE REDES INALÁMBRICAS
WIFI Y WIMAX

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERA EN TELECOMUNICACIONES

P R E S E N T A:

OFELIA ADRIANA SOTO SÁNCHEZ

DIRECTOR DE TESIS: DR. VICTOR RANGEL LICEA



CIUDAD UNIVERSITARIA, MEXICO D.F.

2011



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

AGRADECIMIENTOS

A mi mamá, quién siempre ha estado a mi lado apoyándome en los buenos y malos momentos, alentándome a superarme a través del estudio y la dedicación; y dándome siempre ánimos para alcanzar todos y cada uno de los objetivos que me he propuesto.

A mis hermanas Erika y Julieta, quienes han sido en todo momento un ejemplo a seguir y a quienes admiro profundamente, pues son la mejor prueba de que las cosas valiosas de la vida se obtienen a base del esfuerzo y la constancia.

A mis amigos de la Facultad de Ingeniería Stepfany, Dimitri, Erika, Omar y Anita, con quienes compartí inolvidables momentos dentro y fuera del salón de clases y que siempre formarán parte de esta importante etapa de mi vida; a quienes aprecio no sólo por ser excelentes personas, también por ser un gran apoyo y por brindarme todo su cariño y amistad.

*A la **UNAM** y a la **Facultad de Ingeniería**, por la formación académica que de ellas he recibido y cuyo emblema siempre me identificará como Universitaria en cualquier lugar en que me encuentre. Al Dr. Víctor Rangel Licea, por el apoyo que me ha brindado en el último año de mi formación profesional, como profesor y asesor del presente trabajo.*

A la DGAPA-UNAM, por el apoyo recibido al formar parte del proyecto de investigación PAPIIT No. IN108910 "Diseño de Algoritmos de reservación de capa cruzada en redes móviles y mesh de banda ancha" y al proyecto CONACYT 105279 "Diseño de técnicas de reservación de capacidad en redes inalámbricas de banda ancha móviles".

Contenido

Capítulo 1. Introducción

1.1	PRESENTACIÓN	7
1.2	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	8
1.3	OBJETIVO	8
1.4	RESULTADOS ESPERADOS	9
1.5	ESTRUCTURA DE LA PRESENTE TESIS	9
1.6	METODOLOGÍA	10

Capítulo 2: Conceptos básicos

2.1	INTRODUCCIÓN.....	11
2.2	DISEÑO DE REDES	11
2.2.1	Jerarquía de protocolos	12
2.2.2	Protocolos y servicios.....	13
2.3	MODELO DE REFERENCIA OSI	13
2.3.1	Definición	13
2.3.2	Capas del modelo OSI.....	14
2.3.3	Encapsulamiento de datos.....	15
2.4	MODELO TCP/IP.....	17
2.4.1	Definición	17
2.4.2	Descripción de las capas y protocolos asociados.....	17
2.5	PROTOCOLO TCP	20
2.5.1	Formato de los segmentos TCP	20
2.5.2	Fragmentación en TCP	23
2.6	PROTOCOLO IP	23
2.6.1	Formato de los paquetes IP.....	23
2.7	REDES INALÁMBRICAS DE ÁREA LOCAL (WLAN)	25
2.7.1	Definición.....	25
2.7.2	Características.....	26
2.7.3	Arquitectura	26
2.7.4	Tipos de redes WLAN	28
2.8	REDES DE ÁREA METROPOLITANA WMAN Y ACCESO INALÁMBRICO DE BANDA ANCHA BWA.....	29
2.8.1	Definición.....	29
2.8.2	Arquitectura de redes BWA.....	30
2.8.3	Aplicaciones y tipos de acceso.....	31
2.9	CONCLUSIONES.....	32

Capítulo 3: Estándar IEEE 802.11 WiFi

3.1	INTRODUCCIÓN	33
3.2	RESUMEN HISTÓRICO DEL ESTÁNDAR.....	33
3.3	PILA DE PROTOCOLOS	34
3.4	LA CAPA DE CONTROL DE ACCESO AL MEDIO 802.11 (MAC)	36
3.4.1	Tipos de mensajes.....	37
3.4.2	Formato general de la trama	38
3.5	LA CAPA FÍSICA 802.11 (PHY).....	40
3.5.1	Capa física para el IEEE 802.11g	43
3.5.2	Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM).....	45
3.5.3	Componentes de la capa física 802.11g (PHY)	47
3.6	CONCLUSIONES	53

Capítulo 4. Estándar IEEE 802.16 WiMAX

4.1	INTRODUCCIÓN	55
4.2	ANTECEDENTES ACERCA DEL ESTÁNDAR	55
4.2.1	Evolución del estándar IEEE 802.16	56
4.3	WiMAX (WORLDWIDE INTEROPERABILITY FOR MICROWAVE ACCESS)	56
4.3.1	Características de WiMAX.....	57
4.3.2	Topologías WiMAX	58
4.3.3	Equipo WiMAX.....	58
4.3.4	Pila de protocolos.....	59
4.4	CAPA DE CONTROL DE ACCESO AL MEDIO MAC.....	61
4.4.1	Subcapa de convergencia (CS).....	61
4.4.2	Parte común de la subcapa MAC (MAC CPS)	63
4.4.3	Subcapa de seguridad	66
4.5	CAPA FÍSICA (PHYSICAL LAYER)	66
4.5.1	Modulación adaptable	67
4.5.2	Dominio de la frecuencia	68
4.5.3	Cadena de transmisión	69
4.5.4	Técnicas de acceso múltiple	71
4.6	CÁLCULO DE LA EFICIENCIA VOLUMÉTRICA	74
4.7	CONCLUSIONES	78

Capítulo 5: Comparativo WiFi vs WiMAX

5.1	INTRODUCCIÓN	79
5.2	NICHOS DE MERCADO WiMAX Y WiFi	79
5.3	ENLACES DE RADIO	80

5.3.1 Frecuencias de operación	80
5.3.2 Parámetros del canal físico	81
5.4 MÉTODOS DE TRANSMISIÓN DE INFORMACIÓN	81
5.4.1 Modulación	81
5.4.2 Forward Error Correction (FEC)	82
5.5 PARÁMETROS DE EFICIENCIA	82
5.5.1 Eficiencia espectral: WiFi vs WiMAX	82
5.6 CONCLUSIONES	83
 Capítulo 6: Comparación y Análisis de la eficiencia volumétrica en redes WiFi y WiMAX	
6.1 INTRODUCCIÓN	84
6.2 CONCEPTO DE EFICIENCIA VOLUMÉTRICA	84
6.3 CONSIDERACIONES GENERALES	86
6.4 RESULTADOS	87
6.4.1 Eficiencia volumétrica	87
6.4.2 Eficiencia volumétrica en estándar IEEE 802.11	89
6.4.3 Eficiencia volumétrica para el estándar IEEE 802.16	95
6.5 COMPARACIÓN DE LA EFICIENCIA VOLUMÉTRICA ENTRE ESTÁNDARES 802.11 Y 802.16	101
6.6 EFICIENCIA VOLUMÉTRICA Y UTILIZACIÓN DEL CANAL	104
6.7 CONCLUSIONES	115
 Capítulo 7. Análisis teórico de la cobertura de WiFi y WiMAX	
7.1 INTRODUCCIÓN	117
7.2 ANÁLISIS WIMAX	117
7.3 ANÁLISIS WiFi	122
7.4 CONCLUSIONES	129
 Capítulo 8. Conclusiones generales	
8.1 CONCLUSIONES GENERALES	130
8.2 TRABAJO FUTURO	131
APÉNDICE A. Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS)	132
APÉNDICE B: Modulación	135
Glosario	138
Referencias de imágenes	145
Referencias Bibliográficas	148

Lista de abreviaturas

<i>ACK: Acknowledgment</i>	<i>UCD: Uplink Channel Descriptor</i>
<i>AP: Access Point</i>	<i>WiFi: Wireless Fidelity</i>
<i>BPSK: Binary Phase Shift Keying</i>	<i>WiMAX: World Interoperability for Microwave Access</i>
<i>BWA: Broadband Wireless Access</i>	<i>WLAN: Wireless Local Area Network</i>
<i>CID: Connection IDentifier</i>	<i>WMAN: Wireless Metropolitan Area Network</i>
<i>CRC: Cyclic Redundancy Code</i>	
<i>CS: Convergence Sublayer</i>	
<i>CSMA/CA: Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance</i>	
<i>CTS: Clear To Send</i>	
<i>DCD: Downlink Channel Descriptor</i>	
<i>DHSS: Direct-Hopping Spread-Spectrum</i>	
<i>ETSI: European Telecommunications Standards Institute</i>	
<i>FCH: Frame Control Header</i>	
<i>FCS: Frame Check Sequence</i>	
<i>FCS: Frame Check Sequence</i>	
<i>FDM: Frequency Division Multiplexing</i>	
<i>FEC: Forward Error Correction</i>	
<i>FHSS: Frequency-Hopping Spread-Spectrum</i>	
<i>GMH: Generic MAC Header</i>	
<i>IEEE: Institute of Electrical Electronic Engineers</i>	
<i>IP: Internet Protocol</i>	
<i>ISM: Industrial, Scientific and Medical band</i>	
<i>ISO: International Organización of Standarization</i>	
<i>LLC: Logic Link Control</i>	
<i>LOS: Line Of Sight</i>	
<i>MAC CPS : MAC Common Part Sublayer</i>	
<i>MAC: Media Access Control</i>	
<i>MPDU: MAC Layer Protocol Data Unit</i>	
<i>MTU: Maximum Transport Unit</i>	
<i>OFDM: Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>	
<i>OFDM: Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>	
<i>OSI: Open System Interconnection</i>	
<i>PDU: Packet Data Unit</i>	
<i>PHY: Physical Layer</i>	
<i>PLCP: Physical Layer Convergence Procedure</i>	
<i>PLCP: Physical Layer Convergence Procedure</i>	
<i>PMD: Physical Medium Dependent</i>	
<i>PMD: Physical Medium Dependent</i>	
<i>PMP: Point to Multipoint</i>	
<i>PPDU: Physical layer Protocol Data Unit</i>	
<i>PSDU: Physical Service Data Unit</i>	
<i>QAM: Quadrature Amplitud Modulation</i>	
<i>QoS: Quality of Service</i>	
<i>QPSK: Quadrature Phase Shift Keying</i>	
<i>RS: Reed-Solomon</i>	
<i>RTS: Ready To Send</i>	
<i>SAP: Service Access Point</i>	
<i>SDU: Service Data Unit</i>	
<i>SFID MAC: MAC Service Flow Identifier</i>	
<i>SNR: Signal to Noise Ratio</i>	
<i>TCP: Transport Control Protocol</i>	
<i>TDM: Time Division Multiplexing</i>	

Capítulo 1. Introducción

1.1 PRESENTACIÓN

El rápido desarrollo de las tecnologías de la información y la idea de estar siempre comunicados han impulsado el avance de las redes inalámbricas, para las cuales se han desarrollado diversos estándares y múltiples tecnologías que hacen posible la transmisión de datos en medios no guiados.

En éste sentido, los estándares desarrollados por el *IEEE (Institute of Electrical Electronic Engineers)* han permitido implementar redes inalámbricas que varían en su nivel de cobertura; ejemplo de ello son las *redes de área local (WLAN¹)* exitosas comercialmente a través de la marca denominada **WiFi (Wireless Fidelity)** y que se define mediante el estándar **IEEE 802.11** [1] (a, b, g, n). Dicha tecnología ha hecho posible el acceso a la red en miles de *Access Points* públicos y privados haciéndola muy exitosa comercialmente pues su costo es bajo.

A la par, se han desarrollado otro tipo de redes de área más extensa englobadas en el término *WMAN (Wireless Metropolitan Area Network)* las cuales tienen aplicaciones similares, en este caso descritas a través del estándar IEEE 802.16 [2] mejor conocido comercialmente como **WiMAX (Worldwide Interoperability Multiple Access)**. Es una tecnología de acceso inalámbrico de banda ancha **BWA (Broadband Wireless Access)** que promete ser muy competitiva en su desarrollo a futuro, pues se contemplan características adicionales como movilidad y *calidad de servicio (QoS)*.

Con el rápido avance de las aplicaciones multimedia como son video y audio *streaming*, voz a través del protocolo IP y otras, que demandan un ancho de banda creciente, se vuelve necesario analizar la forma en la que los recursos de la red son administrados.

En este sentido, la realización de un análisis que permita evaluar su desempeño, entendido como la capacidad de la red para transmitir de forma efectiva los datos útiles que se envían a través de ella, resultaría muy útil pues permitiría comparar y contrastar ambas tecnologías. Si bien ambas son de carácter inalámbrico como ya se mencionó, su campo de aplicación es muy distinto; a pesar de ello, tienen coincidencias que las hacen similares en algunos aspectos e incluso complementarias en diversas aplicaciones.

¹ Referirse al punto 2.4 del presente trabajo, adicionalmente se pueden consultar dichos términos en el glosario.

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El modelo de referencia **OSI (Open System Interconnection)** establecido por la ISO (*International Organization of Standardization*) es un modelo teórico que mediante una arquitectura constituida por siete capas, permite modelar la arquitectura de una red y la interconexión entre sistemas de comunicaciones. Cada capa efectúa acciones específicas que hacen posible que los datos convertidos en cadenas de bits y transmitidos usando un medio de transmisión en particular en la capa física, puedan ser direccionados, transportados, enlazados, interpretados y convertidos en datos útiles para el usuario final.

Para llevar a cabo estas acciones es necesario agregar a la información útil datos de control, sincronización y demás parámetros que son vitales para el adecuado transporte de las señales. Dependiendo de la capa que atravesase en camino a su destino, la longitud de esta información y su significado tendrá valores diferentes lo cual permite a la información adaptarse al medio de transmisión, corregir errores, controlar el flujo de datos y enviar indicadores como temporizadores con el fin de que la carga útil llegue sin errores a su destino.

Toda la información adicionada a la carga útil consume los recursos de la red, es decir, ocupa una parte del ancho de banda disponible con lo cual, disminuye la capacidad de la red para transportar dicha información; incluso pudiera llegar a ser comparable con el tamaño de los datos útiles, lo que hace muy costosa y poco eficiente su implementación.

Para determinar el desempeño de estas tecnologías se pretende hacer un análisis comparativo que refleje el problema anterior; la evaluación se llevara a cabo a través de la medición de la **eficiencia volumétrica**.

Dicho término se refiere al porcentaje o fracción que representan los bytes consumidos por los encabezados y demás mensajes de control, sincronización, señalización y administración, en relación con la cantidad de datos útiles transmitidos (*payload*). Lo anterior se llevará a cabo tomando en cuenta parámetros como la modulación empleada para transmitirlos, técnicas de codificación convolucional y codificación de canal, así como el tamaño de la cadena de datos útiles a transmitir.

1.3 OBJETIVO

Con la realización de la presente tesis se pretende conocer la estructura de las tramas definidas en los estándares IEEE 802.11 (WiFi) [1] y IEEE 802.16 (WiMAX) [2], en lo que concierne a las capas física (PHY) y de control de acceso al medio (MAC). Posteriormente, calcular la **eficiencia volumétrica** en ambas tecnologías utilizando la pila de protocolos TCP/IP [3].

Los resultados anteriores se usarán para obtener datos del desempeño de dichas tecnologías variando la longitud de la carga útil de datos y tomando en cuenta diferentes tipos de modulación y codificación de acuerdo con dichos estándares. Por último se presentan un breve análisis de la cobertura teórica para ambos estándares.

1.4 RESULTADOS ESPERADOS

Una vez obtenidos los resultados que se describen en los objetivos se espera:

- Obtener datos que permitan un mejor conocimiento del desempeño de redes inalámbricas comercialmente exitosas como son WiFi y WiMAX.
- Caracterizar a dichas tecnologías por su eficiencia volumétrica, análisis de su desempeño y comparación y contraste de algunos de sus aspectos técnicos en relación con su implementación y diseño.
- Emitir conclusiones acerca de su rendimiento, lo cual permitirá obtener un conocimiento más profundo de dichas tecnologías.

1.5 ESTRUCTURA DE LA PRESENTE TESIS

El presente trabajo se ha dividido en 8 capítulos, los cuales presentan de forma global el estudio de la eficiencia volumétrica para las tecnologías WiFi y WiMAX y usando la pila de protocolos TCP/IP.

El segundo capítulo describe de forma general algunos de los conceptos básicos que se utilizaron en el desarrollo de la presente tesis, como son conceptos basados en definiciones de las redes WLAN y WMAN , modelo OSI y TCP/IP.

En el tercer capítulo se describe de forma general las características de la tecnología WiFi, haciendo énfasis en la estructura de las tramas en las dos capas definidas por el estándar: la capa física (PHY) y la capa de control de acceso al medio (MAC); no se describen todos los campos de forma exhaustiva pues esta fuera de los propósitos del presente trabajo. También se mencionan de forma general las características técnicas más importantes de en la implementación de esta tecnología.

El cuarto capítulo es análogo al capítulo dos aplicado a WiMAX, de igual forma se hace una descripción breve de los aspectos más importantes de esta tecnología, de la estructura de tramas en la capa MAC y física.

En el quinto capítulo se contrastaron ambas tecnologías, encontrando similitudes y diferencias en la forma de implementarlas, en las técnicas de modulación y codificación usadas, y se describe de forma general sus similitudes y diferencias en diferentes categorías.

En el Capítulo 6 se presentan los resultados del estudio de la eficiencia volumétrica de forma detallada, la interpretación de dichos resultados y comparaciones entre parámetros similares entre ambas tecnologías. En el Capítulo número 7 se hace un breve estudio de la cobertura teórica de ambos sistemas como una aplicación de los conocimientos previos. Por último, en el Capítulo 8 se presentarán las conclusiones finales del presente trabajo.

1.6 METODOLOGÍA

Para llevar a cabo el estudio de la eficiencia volumétrica, se analizaron los estándares 802.11g y 802.11e; con especial énfasis en la descripción de los encabezados agregados a la información útil, su tamaño y la función que desempeñan.

Se realizaron los cálculos correspondientes que permitieron conocer la relación entre los bytes de encabezados y la carga útil para determinar la eficiencia volumétrica considerando diversas longitudes de datos útiles, modulaciones y codificaciones. Una vez obtenidos los datos, se graficaron los resultados con ayuda de software de propósito matemático Matlab V.10 y se efectuó el análisis correspondiente de los mismos, para caracterizar el desempeño de los estándares mencionados.

Para el estudio de la cobertura, se analiza el comportamiento de las señales utilizando modelos de propagación dependientes de la distancia y tomando como base variables independientes como son la relación *señal a ruido (SNR)*, o la sensibilidad del receptor.

Capítulo 2.

Conceptos básicos

2.1 INTRODUCCIÓN

En el presente capítulo se plantean una serie de conceptos básicos que serán de importancia crucial para llevar a cabo el estudio de la eficiencia volumétrica. La definición de los modelos de referencia OSI (*Open System Interconnection*) y TCP/IP (*Transport Control Protocol/Internet Protocol*) mismos que plantean una descripción simplificada de redes al dividirlos en capas con funciones específicas permitirá entender la descripción que plantean los estándares de redes inalámbricas [1] y [2].

En base a estos modelos se define una arquitectura de protocolos que serán los que se tomen en cuenta para el estudio de la eficiencia volumétrica. Así mismo se describe de forma detallada la relación entre protocolos y servicios de tal forma que se comprenda el concepto de encapsulamiento de datos en PDU's (*Packet data Units*), las cuales actúan como bloques de información transparente para las capas adyacentes.

El encapsulamiento de datos es fundamental para entender el estudio de la eficiencia volumétrica, pues es mediante este proceso por el cual se agrega información de control en cada capa de acuerdo con el protocolo usado, lo cual da la pauta para el cálculo del rendimiento de la red.

Por último, se describen de forma simplificada las redes WLAN (*Wireless Area Network*) y las WMAN (*Metropolitan Area Networks*) y de la mano de éstas últimas se plantean de forma breve las redes BWA (*Broadband Wireless Access*); sus semejanzas y diferencias así como la arquitectura de cada una de ellas. La razón por la que es necesario presentar esta clasificación reside en el hecho de que las redes WiFi son el término comercial para las WLAN, y WiMAX lo es para las redes BWA con extensión a redes WMAN.

2.2 DISEÑO DE REDES

Al implementar una red, es necesario definir además de las características técnicas que esta tendrá, su arquitectura lógica, es decir, los modelos en los que se basará su diseño y los protocolos de comunicación que se usarán para implementarla.

Se presentan de forma general una descripción de dos modelos muy usados en la actualidad para conceptualizar y diseñar redes, así como el proceso por el cual la información del usuario se traslada a través de la red.

2.2.1 Jerarquía de protocolos

Una forma de simplificar el diseño de redes complejas es organizarlas como una serie de **capas o niveles**, cada uno de los cuales se apoya en el nivel inmediato inferior a él.

Cada sistema está organizado de forma particular y muchos de los existentes no tienen delimitadas de forma precisa las funciones que ejecutan en cada capa, o bien difieren en el número que de ellas definen. De forma general se puede decir que el propósito de cada capa es ofrecer una serie de servicios a las capas superiores de forma simplificada, es decir, sin mostrar los detalles de la forma en la que se llevan a cabo dichas acciones (por ejemplo detalles del estado interno o algoritmos). El proceso anterior se conoce como encapsulamiento de datos.

En la Figura 2.1 [5] se observa un ejemplo de red de cinco capas; en ella se puede ver que las capas se interconectan entre si las superiores con las inferiores y los hosts convergen de forma común en el medio físico por medio del que se envía la información. La forma en la que se comunican las capas del mismo nivel o *peers* se denomina **protocolo**, lo cual es una serie de convenciones establecidas para que la capa n se comunique con la capa n de otro host.

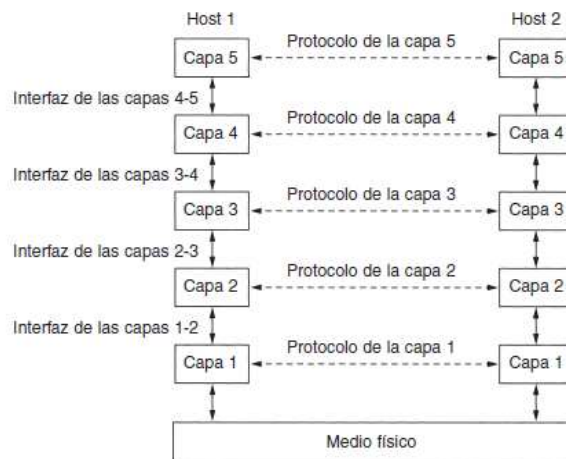


Figura 2.1. Ejemplo de red de cinco capas

La combinación de capas en las que se definirá una red y sus protocolos de comunicación asociados se conoce como **arquitectura de red**, la lista de protocolos se conoce como **pila de protocolos**.

Para que las *capas n* de ambos hosts se logren comunicar, la información debe pasar en el Host 1 a las capas inferiores, atravesar el medio físico que es el medio por el cual se efectúa la comunicación de forma real; y pasar de nuevo por las capas inferiores en el Host 2 hasta llegar a la capa n. El procedimiento se describirá de forma breve en las siguientes secciones.

2.2.2 Protocolos y servicios

Un servicio es un conjunto de operaciones que una capa proporciona a la capa que esta sobre ella, éste define qué operaciones pueden llevarse a cabo pero no cómo se implementan. Se dice que la capa inferior implementa el servicio y la superior lo recibe.

Dado que un **protocolo** es un conjunto de reglas las cuales definen el formato de los mensajes que se intercambiarán las entidades iguales en una capa, son estas entidades quienes determinan como se llevaran a cabo los servicios; los protocolos pueden cambiar siempre que los cambios sean transparentes a los usuarios, por tanto no son dependientes uno de otro. La Figura 2.2 [5] muestra de forma gráfica dicha relación.



Figura 2.2. Relación protocolo y servicio

2.3 MODELO DE REFERENCIA OSI

2.3.1 Definición

El modelo de Interconexión de sistemas abiertos (*OSI Open System Interconnection*) es un modelo creado en 1984 por la ISO (*International Standard Organization*) cuyo propósito es establecer un marco de referencia descriptivo/teórico que definiera la arquitectura básica en la que debe estar basado un sistema de comunicaciones, de tal forma que le sea posible interactuar los demás sistemas existentes. Lo anterior quiere decir que busca que los sistemas sean compatibles usando un conjunto de reglas aplicables a ellos y basados en una serie de protocolos.

Se integra por una serie de 7 capas, cada una de las cuales describe una serie de funciones que permitirá una interacción con las capas adyacentes y que permite simplificar y clasificar las funciones en particular que ejecutaran los dispositivos.

La Figura 2.3 ilustra de forma simple el modelo OSI y las relaciones de protocolos y servicios definidos. Se puede ver en medio de ambos Hosts un dispositivo de red de capa 3 como un ruteador que permite la interconexión de ambos.

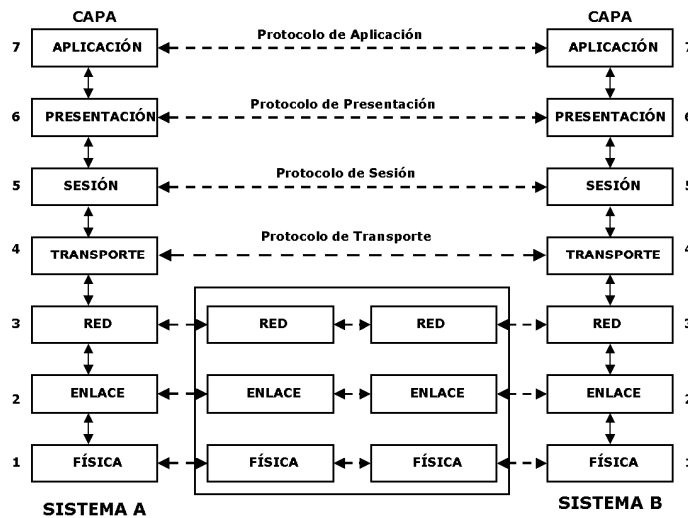


Figura. 2.3 Modelo OSI

2.3.2 Capas del modelo OSI

La Tabla 1 resume de forma breve las funciones de cada una de las capas presentes en el modelo OSI:

Tabla 1. Funciones de la capa del modelo OSI [5] pp. 20

Capa	Descripción	Funciones
1. Física	Es la que se encarga de las conexiones físicas de la computadora hacia la red, tanto en lo que se refiere al medio físico como a la forma en la que se transmite la información.	<ul style="list-style-type: none"> Definir el medio o medios físicos por los que va a viajar la comunicación. Definir las características materiales (componentes y conectores mecánicos) y eléctricas (niveles de voltaje) a utilizar. Transmitir el flujo de bits a través del medio. Definir la forma en la que se inicia o termina la conexión.
2. Enlace de datos	Esta capa se ocupa del direccionamiento físico ² , del acceso al medio, de la detección de errores, de la distribución ordenada de tramas y del control del flujo	<ul style="list-style-type: none"> Transforma una transmisión de datos binarios en una secuencia libre de errores. Divide los datos de entrada en tramas y los transmite en forma secuencial. Procesa las tramas de estado (confirmación) que envía el nodo destino.

² Se refiere al direccionamiento único en relación con el hardware de red y el fabricante, no cambia (dirección MAC) que es un identificador de 48 bits.

3. Red	En este nivel se realiza el direccionamiento lógico ³ y la determinación de la ruta de los datos hasta su receptor final.	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Determinar la forma en la que los paquetes se enrutarán a su destino mediante tablas estáticas o dinámicas. ▪ Llevar a cabo el control de congestión. ▪ Determinar la calidad de servicio QoS.
4. Transporte	Efectúa el transporte de los datos (que se encuentran dentro del paquete) de la máquina origen a la de destino; independiente al tipo de red física que se esté utilizando.	<ul style="list-style-type: none"> • Lleva a cabo fragmentación de los datos recibidos si es necesario y los encapsula en segmentos. ▪ Proporciona seguridad a la información. ▪ Efectúa el control de flujo e los datos y de recuperación de errores.
5. Sesión	Se encarga de establecer una sesión entre los usuarios de dos hosts distintos.	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Controla la comunicación entre las aplicaciones de los usuarios finales. ▪ Establece, gestiona y cierra las conexiones o sesiones entre las aplicaciones involucradas.
6. Presentación	Proporciona a las aplicaciones independencia en la representación de datos (en caso de existir) de <i>hosts</i> distintos.	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Se encarga de la sintaxis y semántica de la información transmitida⁴. ▪ Maneja las representaciones abstractas de datos (que se aplicaron para el transporte de información a nivel de bits) para su intercambio a un nivel más alto.
7. Aplicación	Se compone de los protocolos que permiten a los hosts comunicarse con el usuario, es decir, las aplicaciones de interfaz humana.	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Proporciona a los usuarios el acceso al entorno de modelos de referencia de forma transparente.

2.3.3 Encapsulamiento de datos

Para que los datos de capas iguales (capas n) en el transmisor y receptor de la información puedan ser interpretados, es necesario que éstos datos pasen a través de las capas inferiores en el transmisor, pasen por el medio físico y de forma inversa al transmisor, vayan de la capa más baja en el receptor hasta la capa n.

Para que este procedimiento se lleve a cabo, a la información en la capa n debe agregársele información de señalización como son las direcciones físicas y lógicas para identificar el origen y destino de dicha información, así como otro tipo de identificadores que permitan sincronizar y aportar información diversa acerca del contenido de los mensajes.

Cada capa agrega su propia información (encabezados y suma de control de errores FCS o *tail*) a los datos que llegan desde la capa superior, formando un PDU (*Packet Data*

³ Direccionamiento IP, identificador de 32 bits que permite enrutar la información a su destino. Consulte el glosario para referencia rápida.

⁴ Se refiere a la representación particular que tienen los datos provenientes de capas inferiores.

Unit) de capa n, es decir, la forma que toman estos datos una vez que han sido encapsulados [8].

Dicho conjunto de datos se transmitirá de forma íntegra a la capa inferior, es decir, su contenido será oculto a dicha capa y ésta considerará que la PDU capa n recibida son los datos útiles a transmitir y agregará su propia información, volverá a empaquetar en una nueva PDU capa n-1, y así sucesivamente a través de las diversas capas hasta llegar al medio físico.

En cada etapa se asigna entonces un nuevo nombre a cada PDU para reflejar el cambio que ha sufrido al atravesar cada una de las capas, de forma genérica se les denomina [8]:

1. Datos: el término general para las PDU en las capas de aplicación.
2. Segmento: PDU en la capa de transporte.
3. Paquete o Datagrama: PDU en la de Internet.
4. Trama: PDU de la capa de acceso a la red.
5. Bits: una PDU que se utiliza cuando se transmiten físicamente datos a través de un medio.

Se observa de forma gráfica en la e Figura 2.4:

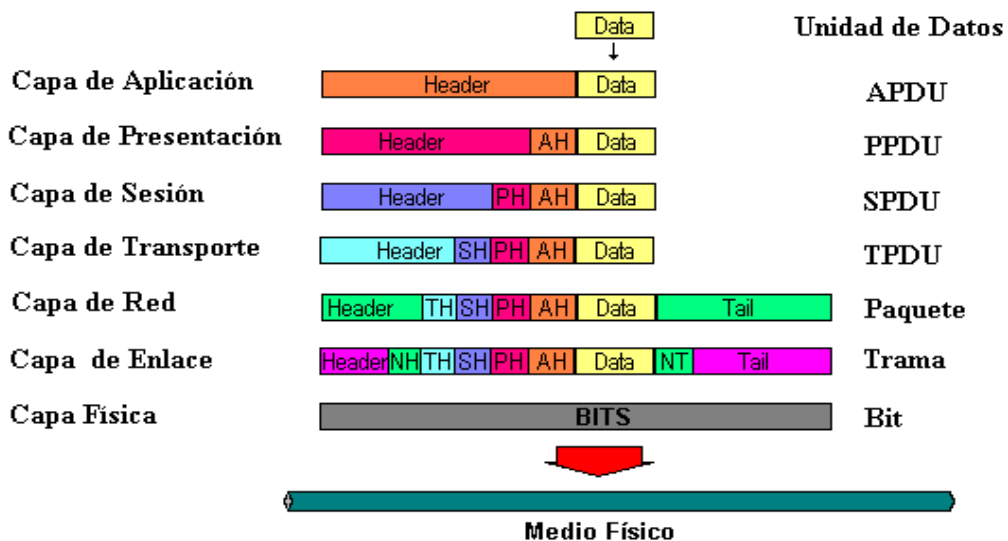


Figura 2.4. Encapsulamiento de datos en modelo OSI

En el receptor se efectúa el proceso inverso, es decir, para extraer la información que corresponde a cada capa es necesario quitar los encabezados y FCS que han sido agregados en las etapas previas para leer la información correspondiente. Este proceso se conoce como desencapsulamiento de la información.

2.4 MODELO TCP/IP

2.4.1 Definición

Es un modelo que se creó en la década de 1970, por DARPA la cual es una agencia del departamento gubernamental del Departamento de Defensa de los Estados Unidos y que evoluciono en ARPNET que fue la primera red de área amplia que precedió a Internet [5].

Este modelo describe un conjunto de guías para la implementación y diseño de protocolos de red para permitir la interconexión de dispositivos en una red. Provee una conectividad *end-to-end* especificando el formato de los datos y su forma de transmisión, direccionamiento y ruteo. Define protocolos con diverso propósito de acuerdo a los servicios que se pretenda implementar dentro de la red.

Se integra por cuatro capas y su forma de comunicarse es muy similar a la descrita para el modelo OSI pues también están jerarquizadas y cada una lleva a cabo diversas funciones específicas. La Figura 2.5 muestra una analogía entre el modelo TCP/IP y el modelo OSI:

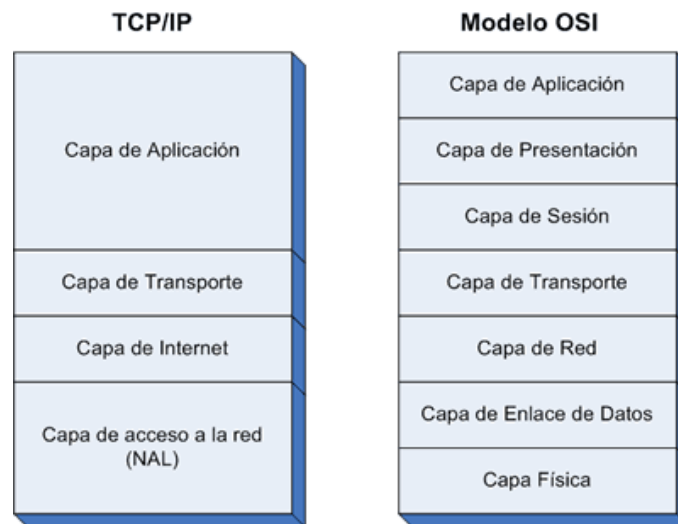


Figura 2.5. Comparación modelo TCP/IP y OSI

2.4.2 Descripción de las capas y protocolos asociados

La Figura 2.6 ilustra los protocolos que se asociaron originalmente al modelo TCP/IP en cada una de las capas que lo conforman:

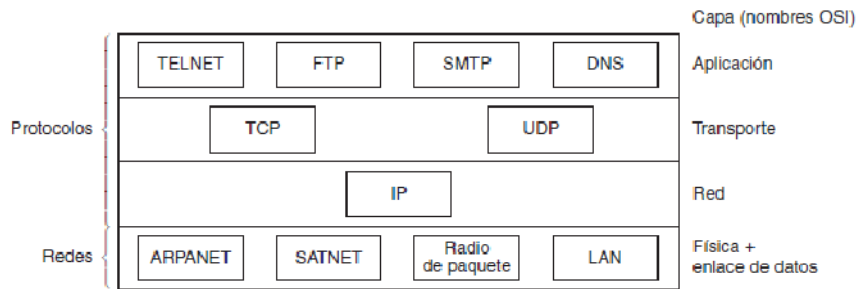


Figura 2.6. Protocolos en modelo TCP/IP

A continuación se describe de forma general la función de cada una de estas capas, de acuerdo con [5], [6] y [8] :

► **Capa de aplicación**

Esta capa engloba de forma teórica a las capas de aplicación, transporte y sesión definidas en el modelo OSI. No se describen las últimas dos en éste modelo pues se ha probado que son de poca utilidad para muchas de las aplicaciones. Contiene los protocolos de nivel más alto, es decir, aquellos que definen la interacción con el usuario final, entre ellos están: la terminal virtual (TELNET), transferencia de archivos (FTP) y correo electrónico (SMTP), DNS (*Domain Name Server*) para la resolución de nombres de host en sus direcciones de red; NNTP, para transportar los artículos de noticias de USENET; HTTP, para las páginas de *World Wide Web*, entre otros.

► **Capa de transporte**

Está diseñada para permitir que los hosts de origen y destino puedan comunicarse (conversar) en sus entidades iguales; define dos protocolos de extremo a extremo.

- **TCP⁵ (Transport Control Protocol):** es un protocolo confiable, orientado a conexión que garantiza que la información originada en un punto de la red se entregue sin errores en otro punto de la misma. Todas las conexiones que se efectúan a través de él deben ser full dúplex y punto a punto. Para ello, divide el flujo de bytes entrantes en segmentos pequeños denominados mensajes discretos (fragmentación), y los entrega a la capa de Internet. En el destino, el protocolo TCP re-ensambla los mensajes recibidos, además de proveer un control de flujo para evitar saturación en el receptor y cuellos de botella. Se define a detalle en la RFC 793, y se publican correcciones en la RFC 1122 [3].

⁵ Dado que este protocolo es importante para el presente trabajo se describirá de forma más detallada en la sección siguiente.

- **UDP (User Datagram Protocol):** protocolo no confiable y no orientado a conexión para aplicaciones para las que no se requiere estricto control de flujo y secuenciación, o para aquellas que la entrega a tiempo es prioritaria sobre la entrega precisa; como son aplicaciones en tiempo real (por ejemplo voz y video *streaming*) y otras aplicaciones como consultas cliente-servidor en una sola entrega. Se define en detalle en la RFC 768.

El presente trabajo se enfoca en considerar al **protocolo TCP** como el protocolo de capa de transporte usado para los estudios de la eficiencia volumétrica.

► **Capa de Internet**

Permite que los hosts inyecten paquetes en la red y que estos viajen de forma independiente hacia su destino, sin importar que lo hagan de forma desordenada, pues las capas superiores se encargan de ordenarlos, es decir, permiten la conmutación de paquetes. De acuerdo con [3], define como el protocolo oficial a:

- **IP (RFC-791 Internet Protocol)⁶:** que es el protocolo que permite el correcto enrutamiento de los paquetes a través de la red mediante las direcciones IP, Provee sólo las funciones necesarias para enviar un paquete desde un origen a un destino a través de la red, sin embargo, o no fue diseñado para rastrear ni administrar el flujo de paquetes. En el presente trabajo se tratara únicamente con la versión 4 de dicho protocolo (IPv4). Sus características son:
 - Sin conexión: No establece conexión antes de enviar los paquetes de datos.
 - Máximo esfuerzo (no confiable): No se usan encabezados para garantizar la entrega de paquetes.
 - Medios independientes: Operan independientemente del medio que lleva los datos.

► **Capa de acceso a la red**

Describe las funciones en conjunto de la capa física y de enlace de datos. De forma general se establece que el host debe conectarse a la red usando el mismo protocolo en ambos lados de la comunicación para poder enviarse mensajes IP en la capa de Internet.

No se especifica en este modelo de referencia la forma en que se procesa la información a éste nivel, pues depende del tipo de red a implementar el formato que tomarán los datos.

⁶ Se ampliara su descripción en una sección posterior.

Para el desarrollo del presente trabajo, esta capa está definida por los estándares [1] y [2], los cuales se expondrán de forma más amplia en los capítulos 3 y 4 respectivamente. Como ilustración del proceso de encapsulación y des encapsulación de los datos en este modelo, el cual es análogo al descrito para el modelo OSI, la Figura 2.7 [6] resulta muy útil para observar de forma gráfica el procedimiento.

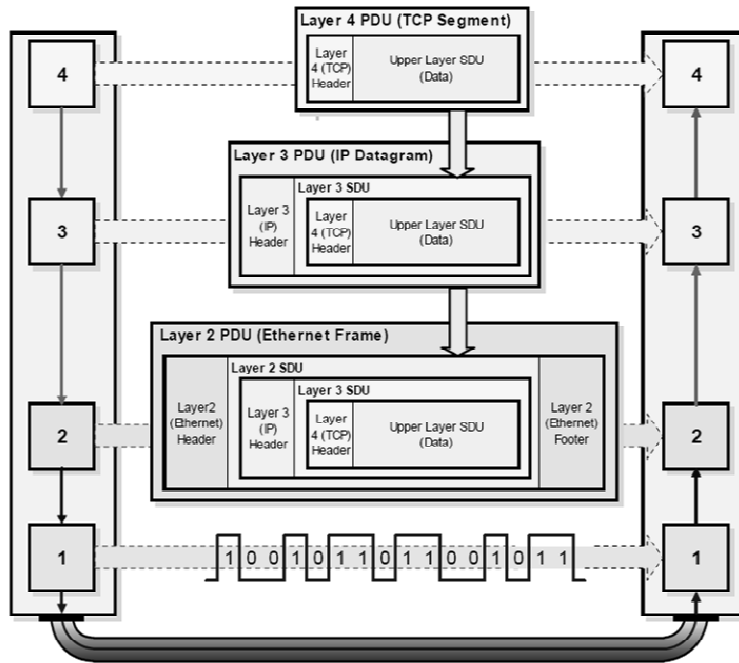


Figura 2.7. Encapsulación de datos en modelo TCP/IP.

2.5 PROTOCOLO TCP

Se describieron con anterioridad de forma general las características de éste protocolo. En esta sección se hace énfasis en describir el formato de los segmentos TCP haciendo énfasis en el tamaño de éstos y en la fragmentación que se presenta en esta capa. Ambos parámetros son los más útiles y fundamentales para llevar a cabo el estudio de la eficiencia volumétrica en este tema.

2.5.1 Formato de los segmentos TCP

La Figura 2.8, tomada de [5] ilustra la distribución de un segmento TCP:

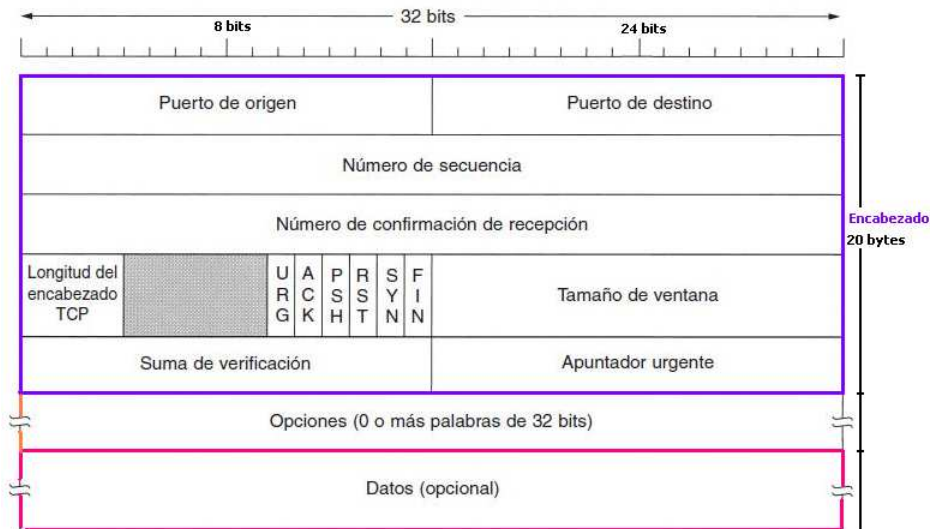


Figura 2.8. Segmento TCP

Sus campos de acuerdo con [5] son los siguientes:

- **Encabezado (20 a 60 bytes):** cada segmento comienza con éste campo; su formato tiene una tamaño fijo de 20 bytes (160 bits) pero puede estar seguido de opciones, que de estar presentes, pudieran ocupar hasta 60 bytes en total (20 bytes + 40 bytes = 160 bits + 320 bits = 480 bits).

A continuación se desglosaran de forma breve cada uno de los campos que componen el encabezado.

Puerto de origen y destino (2 bytes cada uno= 16 bits cada uno): su función es identificar los puntos locales terminales de la conexión. Pueden ser *puertos*⁷ bien conocidos o los que el host en cuestión asigne. En conjunto con la dirección IP (32 bits) forman un punto terminal único de 48 bits.

Número de secuencia (4 bytes =32 bits): se usa en caso de fragmentación para designar el orden e los fragmentos.

Número de confirmación de recepción (4 bytes =32 bits): especifica el siguiente byte esperado y no el último que se haya recibido de forma correcta.

⁷ Para mayor información consultar el glosario.

Longitud del encabezado (4bits): indica la cantidad de palabras de 32 bits contenidas en el encabezado TCP. Es necesaria pues el campo de opciones es de longitud variable. Indica también comienzo de los datos en el segmento.

Reservado (6 bits): campo reservado para uso futuro.

Indicadores de 1 bit cada uno (6 bits):

- **URG:** indica si se usa el **Apuntador Urgente (16 bits = 2 bytes)**, el cual sirve para indicar un desplazamiento en bytes a partir del número de secuencia si hay datos urgentes.
- **ACK:** indica si el número de confirmación de recepción es válido o no.
- **PSH:** indica la presencia de datos que deben transmitirse de inmediato.
- **RTS:** se usa para indica el restablecimiento de una conexión que haya fallado o rechazar el intento de iniciar una.
- **SYN:** denota *Connection Request* o *Connection Accept*, es decir, sirve para establecer el estado de la conexión en conjunto con ACK.
- **FIN:** se usa para liberar una conexión, especifica que el emisor no tiene más datos que transmitir.

Tamaño de ventana (2 bytes=16 bits): indica la cantidad de bytes que pueden enviarse, iniciando con el byte del que se ha confirmado recepción.

Suma de verificación (2 bytes=16 bits): sirve para verificar la integridad del encabezado, agrega confiabilidad.

Apuntador Urgente (2 bytes=16 bits): se describió brevemente en el indicador URG.

Opciones (variable máximo 40 bytes=320 bits en palabras de 32 bits): agrega características a las funcionalidades estándar del segmento, puede por ejemplo, indicar un número máximo de carga útil TCP que cada host está dispuesto a recibir, enviar opciones de sincronización, y otras.

Una vez que se han descrito los campos del encabezado, la cantidad que agrega a la información de usuario el protocolo TCP es un máximo de 60 bytes, sin embargo, la cantidad más usual es de 20 bytes, por lo cual se considerará para el presente trabajo que:

$$EncTCP = 20 \text{ [bytes]} \quad (1)$$

2.5.2 Fragmentación en TCP

Es importante considerar el hecho de que el tamaño de los segmentos que se intercambian a través de la red los decide el software TCP, de acuerdo con [5], es por ello que puede agrupar fragmentos de un segmento para crear uno solo o bien, dividir uno que sobrepase el tamaño máximo en varios segmentos más pequeños.

Hay dos límites que restringen éste tamaño (encabezado TCP+ carga útil):

1. El tamaño de la carga útil del protocolo de capa de red, pues el segmento TCP debe ser encapsulado en este campo. Como se considerará al protocolo IP como el protocolo de capa de red, este tamaño es de 65 515 bytes.
2. El tamaño de la **Máxima Unidad de Transferencia (MTU)**, que es propio de cada red y en el que debe caber cada segmento TCP. En la práctica se usa una MTU de 1500 bytes.

En el presente trabajo se tomara en cuenta la fragmentación llevada a cabo por el protocolo TCP considerando los parámetros mencionados para la **fragmentación por MTU**

2.6 PROTOCOLO IP

Análogo al protocolo TCP, se ha presentado ya una descripción general del propósito y características del protocolo IP, que opera en la capa de red. A continuación se describirá de forma breve la estructura de un datagrama IP.

2.6.1 Formato de los paquetes IP

Un paquete IP está integrado por un encabezado y una sección de datos útiles (también conocido como *payload*). El encabezado, al igual que en el protocolo TCP tiene una longitud fija de 20 bytes más el campo opciones.

De acuerdo con [5], la estructura de un paquete IP está establecida como se muestra en la Figura 2.9.

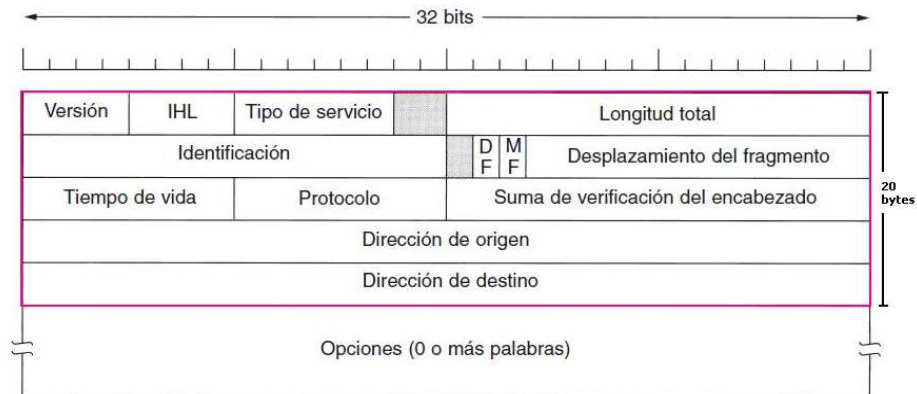


Figura 2.9. Encabezado IP

A continuación, se hará una breve descripción de los campos que integran el encabezado, de acuerdo con [5] y [6]:

Versión (4 bits): indica el número de la versión del protocolo IP que se esté usando; por ejemplo IP versión 4 o versión 6.

Longitud de la cabecera de Internet (IHL, Internet Header Length) (4 bits): longitud de la cabecera medida en palabras de 32 bits. Su valor mínimo es cinco (20 bytes) y el máximo 15 (60 bytes).

Tipo de servicio (1 byte= 8bits): indica parámetros de seguridad prioridad, retardo y rendimiento; es decir, distingue clases de servicio relacionados al QoS.

Identificación (2 bytes= 16 bits): es un número que sirve para identificar a los fragmentos de un mismo datagrama. Junto a la dirección origen y destino caracterizan de forma única a cada uno de ellos, por tanto todos los fragmentos del mismo datagrama tiene el mismo identificador.

Indicadores (3bits= 1 bit cada uno):

- **Primero:** es un campo no definido.
- **DF (Do not Fragment o no fragmentar):** es una indicación para los ruteadores que le indica que no deben fragmentar el paquete pues el destino no los re-ensambla.
- **MF (Más Fragmentos o More Fragments):** está establecido en todos los paquetes excepto el último, para indicar que aun hay (todos los fragmentos antes del último) o que ya no hay más fragmentos.

Desplazamiento del fragmento (13 bits): indica el lugar del datagrama actual en el que se debe colocar el fragmento en cuestión. Todos los fragmentos deben tener un múltiplo de 8 bytes, y como son 13 bits puede haber un máximo de 8192 fragmentos en un paquete.

Tiempo de vida (1 byte= 8 bits): especifica en segundos el tiempo que puede permanecer un paquete en la red antes de ser descartado.

Suma de comprobación de cabecera (2 bytes =16 bits): verifica la integridad del encabezado. Es cero cuando el paquete llega sin errores.

Dirección origen y destino (4 bytes=32 bits cada una): contienen la dirección IP del host de origen o destino respectivamente. Indican la red a la que pertenecen y el identificador del host.

Si se realiza la suma de los valores en bytes de los campos ya mencionados, se podrá verificar que la longitud mínima para éste encabezado es de 20 bytes.

Opciones (máximo 40 bytes): indica opciones para seguridad, enrutamiento libre o estricto, registra ruta y mide tiempos.

De igual forma que con TCP, para el presente trabajo se considerara que la longitud del encabezado IP es:

$$EncIP = 20 [bytes] \quad (2)$$

2.7 REDES INALÁMBRICAS DE ÁREA LOCAL (WLAN)

2.7.1 Definición

Una red inalámbrica de área local WLAN (*Wireless Local Area Network*) es un sistema de comunicación que se utiliza para comunicar dispositivos que se encuentren dentro de un entorno físico relativamente pequeño y limitado, como son hogares, oficinas, escuelas, pisos dentro de un edificio, entre otros con la ventaja de que no existe cableado entre dichos dispositivos.

La Figura 2.10 muestra una configuración común para las WLAN, en esta se aprecia que la red tiene diversos dispositivos comunicados con estaciones centralizadas llamadas Access Points (AP's) los cuales se comunican con él de forma inalámbrica (su área de cobertura se señala con un ovalo) y una parte de la red se comunica con redes cableadas. A continuación se describirán de forma más detallada su arquitectura.

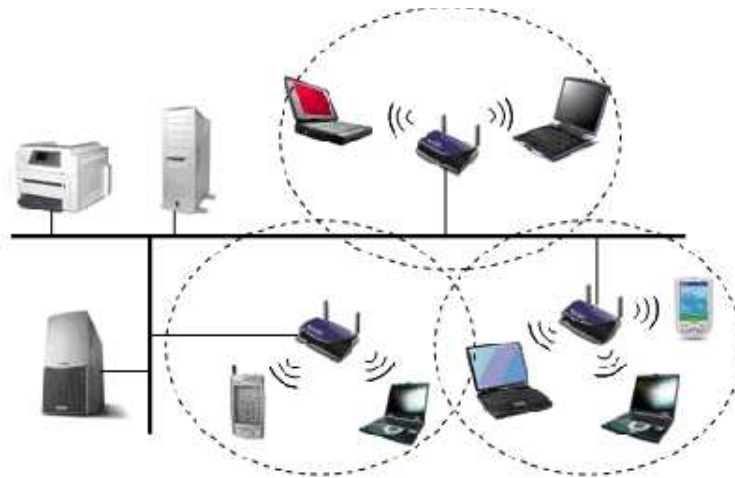


Figura 2.10. Ejemplo de una red WLAN

2.7.2 Características

- **Movilidad:** permite transmitir información en tiempo real en cualquier lugar de la organización o empresa a cualquier usuario. Esto supone mayor productividad y posibilidades de servicio.
- **Facilidad de instalación:** al no usar cables, se evitan obras cablear a través de muros y techos, mejorando así el aspecto y la habitabilidad de los locales, y reduciendo el tiempo de instalación. También permite el acceso instantáneo a usuarios temporales de la red.
- **Flexibilidad:** puede llegar donde el cable no puede, superando mayor número de obstáculos, de esta forma es útil en zonas donde el cableado no es posible o es muy costoso: parques naturales, reservas o zonas escarpadas.

2.7.3 Arquitectura

Una red WLAN está constituida por diversos elementos que hacen posible la interconexión de los dispositivos inalámbricos, los cuales son:

- **Estaciones:** todos los componentes que pueden ser conectados a un medio inalámbrico están referidos a una estación, la cual está equipada con tarjetas de interfaz de red inalámbrica (WNICs); las estaciones pueden ser de dos categorías:
- **Puntos de acceso (APs Access Points):** son ruteadores que transmiten y reciben el tráfico mediante enlaces de radiofrecuencia para establecer la comunicación. Tienen un alcance finito, del orden de 150 m en lugares u zonas abiertas.



Figura 2.11 Imagen de un AP

Clientes: son los dispositivos inalámbricos que se conectan al punto de acceso, pueden ser móviles como un teléfono celular o laptop, incluso estaciones de trabajo. Están equipados con una interfaz de red inalámbrica, como son: tarjetas PCMCIA⁸ que no permiten acceder a conexión de alta velocidad y las tarjetas USB, el tipo de tarjeta más común que existe y más sencillo de conectar a una PC.

Conjunto de servicio básico (Basic Service Set BSS): conjunto de estaciones que pueden intercomunicarse, cada una de ellas tiene un identificador que es la dirección MAC del punto de acceso. Hay dos tipos:

- Independientes: no contienen puntos de acceso, es decir, no pueden conectarse con otro dispositivo fuera de su rango de acceso.
- De infraestructura: pueden comunicarse con otra estación fuera de su propio conjunto de servicio básico través de puntos de acceso.

Conjunto de servicio extendido (Extended Service Set ESS): es un conjunto de dos o más conjuntos de servicio básicos (BSS), cuyos puntos de acceso están conectados a un sistema de distribución; tiene un identificador de 32 bits denominado SSID.

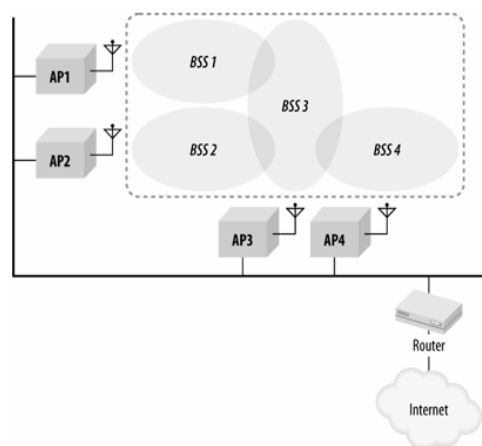


Figura 2.12. Conjunto de BSS interconectados.

⁸ PCMCIA: *Personal Computer Memory Card International Association*

Sistema de distribución: conecta puntos de acceso de Conjuntos de servicio entendido. El concepto de un DS (*Distribution System*) puede ser usado para incrementar la cobertura de la red cambiando entre diversas celdas.

2.7.4 Tipos de redes WLAN

Punto a punto (Peer-to-Peer) o "Ad Hoc": es una red inalámbrica en la que las estaciones se comunican únicamente entre ellas de forma directa (sin intervención de una estación de puntos de acceso) mediante el Conjunto Básico de Servicio Independiente (IBSS). Usan el espacio de cobertura para descubrirse e iniciar comunicaciones

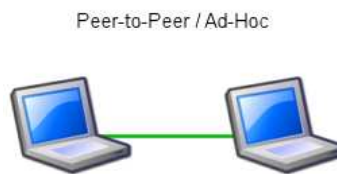


Figura. 2.13 Red Ad-Hoc

Puente: puede usarse para conectar redes de diferente tipo; actúa como un punto de acceso para ambos dispositivos, por ejemplo, al conectar una red inalámbrica Ethernet con una alambica, el puente es un punto de acceso para la red WLAN.

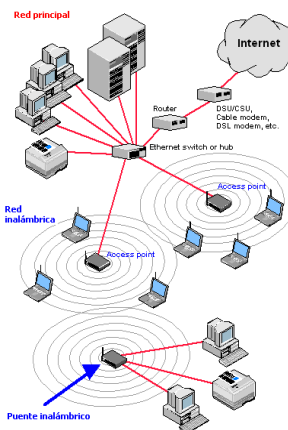


Figura 2.14. Red inalámbrica interconectada a redes cableadas

Sistema de distribución inalámbrico (Wireless Distribution System): sistema que permite la interconexión de puntos de acceso, permite a la red inalámbrica ampliar la zona de cobertura sin la necesidad de un enlace cableado al *Backbone* (red troncal) para interconectarse, es decir, preserva las direcciones MAC de los clientes a través de diversos puntos de acceso, las conexiones entre clientes se realizan usando direcciones MAC en lugar de direcciones IP. Se deben configurar los diversos puntos de acceso a un mismo canal de radio.

2.8 REDES DE ÁREA METROPOLITANA WMAN Y ACCESO INALÁMBRICO DE BANDA ANCHA BWA

2.8.1 Definición

Una **red inalámbrica de área metropolitana WMAN** es una red de datos que ofrece una cobertura en un área geográfica amplia de algunos kilómetros, como puede ser un campus amplio en una universidad o incluso una ciudad.

Se basan en el estándar desarrollado por la IEEE 802.16 el cual se inició en 1979, y en Febrero de 1980 se creó el comité o grupo de trabajo para definir el estándar de las redes MAN. Sus protocolos y servicios se enfocan en las dos capas más bajas del modelo OSI⁹ (enlace de datos y física). Algunos ejemplos son las redes de telefonía celular.

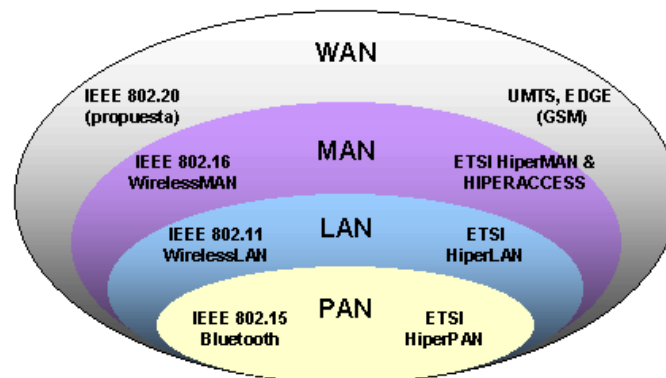


Figura 2.15. Estándares de redes inalámbricas según su cobertura geográfica

BWA (Broadband Wireless Access)

Las **redes BWA** tiene un rango de alcance mucho mayor que las redes WLAN (en el orden de los 50 km), además de ofrecer tasas de transmisión mucho mayores y son más económicas que otras tecnologías como la fibra óptica.

Han emergido de forma muy rápida pues el consumo cada vez mayor de las aplicaciones multimedia han generado una demanda extra en el ancho de banda que llega a los usuarios finales; es por esta razón que se hace necesario adicionalmente, implementar técnicas de calidad de servicio (QoS) las cuales permiten ofrecer a los usuarios diferentes tipos de servicios de acuerdo con el tipo de tráfico que manejen.

⁹ Se describirá en la sección 2.3 del presente trabajo.

2.8.2 Arquitectura de redes BWA

Un sistema fijo BWA incluye al menos una **estación base (BS)** y una o más **estaciones suscriptoras (SS)**. La **estación base** es un nodo central y las estaciones suscriptoras son nodos remotos colocados a diferentes distancias de la estación base.

- **Estación base (BS):** se encarga de controlar y manejar la conexión. Envía datos a través del canal de bajada o Downlink el cual ha sido asignado a varios suscriptores. Una estación base puede cubrir varios celdas (sectores) con la ayuda de patenas sectoriales. En una configuración PMP (*Point to Multipoint* o *Punto a Multipunto*) el canal Downlink es multipunto. Cada estación base es configurada con una dirección MAC de 48 bits, en la cual los primeros 24 bits identifican al operador.
- **Estación suscriptora (SS):** es una terminal que se comunica con la BS. Envía datos a través del canal de subida Uplink el cual es punto a punto en una configuración PMP o punto multipunto en una configuración Mesh. Todos los suscriptores en la misma área y canal de frecuencia reciben la misma información de Downlink (*Broadcasting*). Una dirección MAC de 48 bits identifica de forma única a un suscriptor.

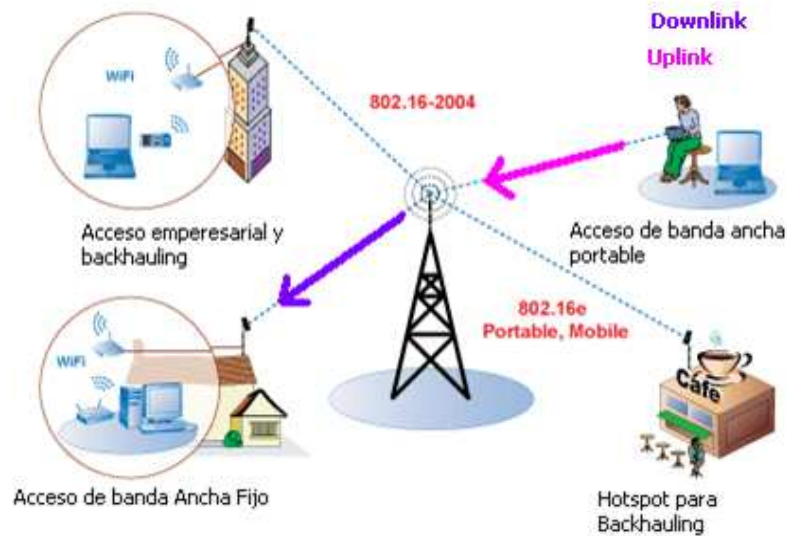


Figura 2.16. Arquitectura BWA

En el canal de subida, el tiempo es dividido en ranuras denominadas *mini-slots*, los cuales proporcionan acceso múltiple por división de tiempo (TDMA)¹⁰; mientras que el canal de bajada se utiliza un esquema de multiplexión por división de tiempo.

¹⁰ Se describirá con mayor detalle en el Capítulo 4.

Cada SS puede enviar voz y datos utilizando interfaces comunes, como teléfono, Ethernet, video, VoD (*Video on Demand*) y otros servicios con diferentes requerimientos en cuanto a calidad de servicio.

2.8.3 Aplicaciones y tipos de acceso

Esta tecnología está representada por el estándar IEEE 802.16, algunas de sus aplicaciones son el **acceso fijo** con una alta tasa de datos, la cual puede ser utilizada para el acceso a Internet, TV y otras aplicaciones que requieran dicho volumen de datos como Video en demanda; sin embargo, no en todos los casos resulta útil aplicarlo pues tecnologías como DSL que están fuertemente implantadas hacen que sea económicamente poco viable.

Otra aplicación es la denominada **WiFi Backhauling** (red de retorno), es decir, la interconexión con las redes WiFi. Dicha conexión consiste en enlazar los puntos de acceso (AP) al *Backbone* de Internet a través de estaciones base (BS) en línea de vista con otras estaciones base; sin embargo no la hay con las estaciones suscriptoras, es por ello que éstas deben contar con un Equipo de Permisos de Consumidor CPE (*Consumer Permisses Equipment*) que es un canal de radio que lleva a cabo el enlace entre la estación base y el equipo terminal. Después del CPE el usuario instala su equipo terminal conectado a un AP WiFi. Entonces la BWA lleva a cabo el retorno de la información hacia la red WiFi.

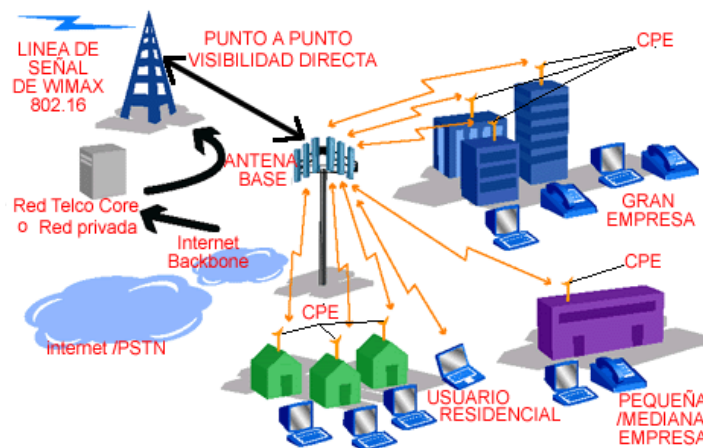


Figura 2.17. Aplicación WiFi Backhauling

Las aplicaciones **nómadas o wireless** permitirían conservar activas las conexiones o sesiones ya establecidas cuando el se mueva dentro del área de cobertura de una BS. Esto es muy útil, sin embargo, la BS y SS no tendrían línea de vista en muchas ocasiones debido al movimiento de la SS.

Por último, está el caso en el que existe **movilidad**, en este escenario, la estación suscriptor se mueve tanto que puede salir del área de cobertura de una BS y cambiarse a

otra BS para que continúe recibiendo el servicio (*Handover*), conservando activas las conexiones realizadas en la primera BS.

Incluye también el hecho de que, en igual forma, la sesión continua activa cuando la estación suscriptora se mueva con una velocidad considerable, mayor a los 350 Km/h, en otros casos, donde la velocidad está limitada al orden de los 120 Km/h, se habla de portabilidad más que de movilidad.

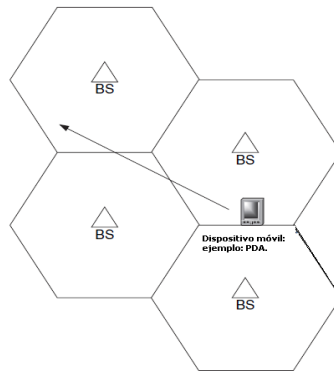


Figura 2.18. El dispositivo móvil cambia de una BS a otra sin reiniciar la sesión

2.9 CONCLUSIONES

En el presente Capítulo se retomaron conceptos básicos de redes como son el protocolo, su jerarquía, la relación entre esto y los servicios. Se describieron de forma puntual algunos protocolos de capa de aplicación y de transporte, aso como el protocolo de red IP, lo cual resultara útil para secciones posteriores. Además se estableció a TCP como el protocolo de capa de aplicación a utilizar por su amplio uso y por ser orientado a conexión.

De igual forma se presentaron las definiciones de redes de área local WLAN y redes de banda ancha inalámbrica BWA, las cuales tiene ámbitos de aplicación totalmente distinto, aso como arquitecturas análogas, pero a su vez muy distintas que les permiten tener tal diversidad de características.

Capítulo 3.

Estándar IEEE 802.11 WiFi

3.1 INTRODUCCIÓN

Como se mencionó previamente, uno de los ejes principales en el desarrollo del presente trabajo es el análisis que se hace de la tecnología WLAN, representada principalmente por la marca WiFi, la cual es dominante en el ámbito comercial y está ampliamente extendida en su uso e implementación en miles de hogares y sitios públicos alrededor del mundo.

En el presente Capítulo se hace una revisión detallada de los aspectos más importantes del estándar IEEE 802.11 y que serán de relevancia para las secciones posteriores. Primeramente se hace un breve recorrido por la historia del desarrollo del estándar; posteriormente se especifica la pila de protocolos a usarse.

Se dedican dos secciones a la descripción de las capas de acceso al medio (MAC) y física (PHY) contenidas en el estándar, incluyendo aspectos relevantes como tipos de modulación, técnicas de acceso al medio, técnicas de codificación.

3.2 RESUMEN HISTÓRICO DEL ESTÁNDAR

El grupo de *estándares 802.11*, al que por facilidad se hará referencia en este trabajo como el estándar 802.11 es un miembro a su vez de la familia de estándares del *IEEE 802*, que es una serie de especificaciones para las Redes de *Área Local (LAN)*.

De acuerdo con [5], sus especificaciones se enfocan en las dos capas más bajas del *modelo OSI*, pues incorporan componentes de la capa física y de control de acceso al medio. Dentro de la *capa MAC* están definidas una serie de reglas para determinar la forma en que los dispositivos obtienen acceso al medio y envían datos, pero los detalles de transmisión y recepción corresponden a la *capa física (PHY)*.

El *estándar 802.11* se apoya en la especificación de la capa de acceso al medio común a las tecnologías LAN, es decir, al control de *enlace lógico (LLC)*; incluyendo además la capa MAC y dos capas físicas. La versión original el estándar 802.11 tenía el propósito de proveer tasas de transmisión de 1 a 2 Mbps operando en la banda no licenciada *ISM (Industrial, Scientific and Medical band)* de 2.45 GHz, la cual requería de uso de técnicas de espectro disperso, por lo cual se definieron dos modalidades: salto en frecuencia (*Frequency-Hopping Spread-Spectrum FHSS*) y Esparcimiento en secuencia directa (*Direct-Sequence Spread-Spectrum DSSS*), los cuales resultaban incompatibles [10].

Conforme los usuarios requerían mayores tasas de transmisión, se formaron dos grupos que investigaban diferentes esquemas: DSSS para el 802.11b que proponía 11 Mbps en el canal de 20 MHz y *Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM)* para el 802.11a que especificaba una capa física alterna, brindando tasas de hasta 54 Mbps en la banda de 5 GHz, la cual está menos saturada.

Posteriormente, se han formado otros grupos que realizan correcciones y mejoras al estándar original, la siguiente tabla muestra de forma sintetizada algunas características de dichos estándares los cuales se han denominado usando letras del alfabeto par identificarlos.

Tabla 2. Variantes del IEEE 802.11 [10] pp. 18

Estándar	Alcances [10]	Ancho de banda [Mbps] [12]	Técnica de difusión [12]
802.11	Define estándar para WLAN para capa PHY y MAC	2	FHSS, DSSS, IR
802.11a	Define una capa física de alta velocidad en la banda de 515-5.825 GHz.	6,12,24 opcional 54	OFDM con 24 subportadoras
802.11b	Define una capa física de alta velocidad en la banda de 2.4 GHz.	11	HR/DS, HR/DSSS
802.11e	Mejora del estándar original para implementar QoS (aplica a 802.11a/b/g)		
802.11g	Define una tasa de datos más alta en la capa física de 2.4 GHz.	22-54	ERP
802.11h	Define funciones MAC para permitir a equipos 802.11a cumplir con los requerimientos europeos.	6,12,24 opcional 54	OFDM
802.11i	Mejora de la capa MAC para proveer seguridad en 802.11a/b/g.		

3.3 PILA DE PROTOCOLOS

El estándar 802.11 define las dos capas más bajas del modelo de referencia OSI, sin embargo, tiene ciertas diferencias en cuanto a su estructura. De acuerdo con [5], en lo que concierne a la capa física, las funciones descritas en el modelo OSI son muy compatibles con las descritas en el estándar 802.11, sin embargo, la capa de enlace de datos se divide en varias capas para todos los estándares que conforman el grupo del *IEEE 802*.

Para poder implementar sistemas en los que se permitiera la corrección de errores y control de flujo al mismo tiempo, el IEEE definió un protocolo que pueda operar sobre toda la pila de protocolos 802. A dicho protocolo se le dio el nombre de LLC (*Control Lógico*

de Enlace) o IEEE 802.2, el cual constituye la parte superior de la capa de enlace de datos y la subcapa MAC (*Media Access Control*) la parte inferior como se muestra en la Figura 3.1:

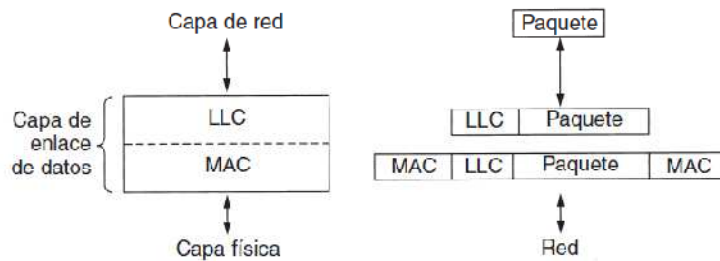


Figura 3.1. Distribución de las subcapas LLC y MAC

A su vez, la capa física se divide en dos subcapas (como se mencionó anteriormente), la *PLCP (Physical Layer Convergence Procedure)* y *PMD (Physical Medium Dependent)*. Ambas capas y sus funciones se describirán más adelante.

La pila de protocolos completa se ilustra en la Figura 3.2.

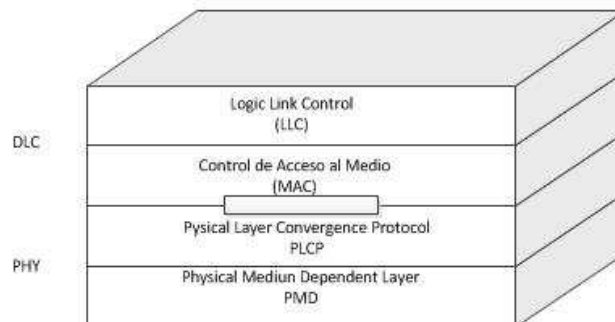


Figura 3.2. Pila de protocolos 802.11

Es necesario establecer una notación específica para entender la relación existente entre ambas subcapas. La carga útil recibida desde capas superiores es encapsulada agregando los encabezados y tráiler en las capas MAC y PHY antes de transmitirse por el canal inalámbrico. Los datos a transmitirse inicialmente reciben el nombre de *Unidades de Datos de Servicio (SDU Service Data Unit)* pues aun no han sido encapsuladas por ningún protocolo.

Una vez que estas pasan de la capa MAC (llamadas *MSDU*) a la subcapa LLC aumentan en tamaño pues se les agregan 30 bytes de encabezado MAC y 4 bytes de *FCS (Frame Check Sequence)*, los cuales en conjunto forman la Unidad de Datos de Protocolo MAC (MPDU).

A su vez, al ser ésta unidad pasada a capa física, se le conoce como Unidad de Datos de Servicio de Capa Física (*PSDU Physical Service Data Unit*); al pasar la subcapa PLCP la cual agrega preámbulo, encabezado y tráiler se genera la *PPDU (Physical Layer Protocol Data Unit)*. La relación entre ellas se ilustra en la Figura 3.3.

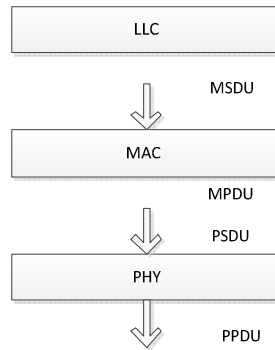


Figura 3.3. Relación entre subcapas

3.4 LA CAPA DE CONTROL DE ACCESO AL MEDIO 802.11 (MAC)

Constituye la parte más baja de la capa de enlace de datos, y es la clave de las especificaciones hechas para el estándar 802.11 pues trabaja sobre cualquiera de las capas físicas definidas en el 802.11 y proporciona el control de la transmisión de los datos en el aire.

Proporciona también el centro de las operaciones para las tramas a transmitirse y les permite interactuar con la red dorsal (*Backbone*) de redes cableadas. Además de proveer un mecanismo para asignar el medio físico a las diversas estaciones en la red. Las colisiones son muy frecuentes, es por ello que reducen de forma significativa las tasas de trasmisión si no se tiene un adecuado control de ellas.

Al igual que en Ethernet se usa el protocolo CSMA (*Carrier Sense Multiple Access*) que consiste en detectar el canal, cuando esta inactivo comienza a transmitir emitiendo su trama completa y sin escuchar el canal en el proceso por lo cual podría ser destruida debido a la interferencia.

Para evitar dichas colisiones y corrupción de datos el 802.11 usa un sistema de prevención de colisiones ***Collision Avoidance (CA)***, en unión con CSMA, el cual consiste en censar el canal repetidas veces para detectar cuando esté libre de otras transmisiones.

Físicamente se usa el CCA (*Clear Channel Assessment*), que es un mensaje que indica dicho estado y el método de censado virtual del canal. Una vez que se encuentre libre se envían mensajes de aviso a través del con el fin de evitar las colisiones, pues estas redes

son *Half-Duplex*. En caso de colisiones hay tiempos de espera aleatorios que aumentan de acuerdo con el algoritmo *Exponential Backoff*.

Ejemplo [5]: cuatro estaciones (A-D) se encuentran en una misma área. Las estaciones B y C están en el rango de detección de A, lo mismo que lo son B y C para la estación D. A desea transmitir a B así que envía un mensaje *RTS (Request to Send)* a B; como el canal está libre B manda una confirmación usando *CTS (Clear to Send)*. La estación A envía los datos y B prepara el *ACK* para confirmar la recepción.

La estación C puede procesar mensajes *RTS*, sin embargo al detectar la actividad de A y B no puede transmitir para evitar las colisiones, así que hace un cálculo para estimar el tiempo que tardarán A y B para terminar el envío y mandar el *ACK*. El resultado se coloca en forma de un *NAV (Network Allocation Vector)*, que es un temporizador interno que permite saber cuánto duran los periodos de silencio. La estación D efectúa el mismo procedimiento pues puede escuchar el mensaje *CTS* de B.

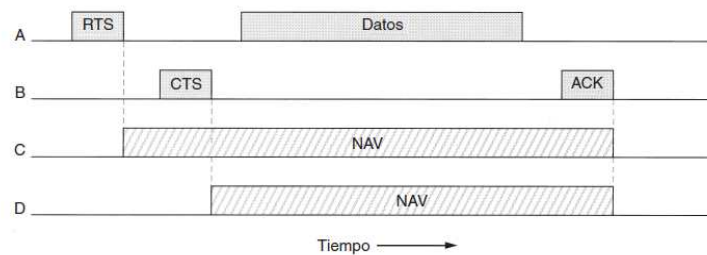


Figura 3.4. Ejemplo de detección virtual del canal para 802.11

3.4.1 Tipos de mensajes

Se definen tres tipos de mensajes [12]:

- **Datos:** se encargan del transporte de los datos de forma adecuada provenientes de capas superiores.
- **Control:** se utilizan para controlar la comunicación que se establece entre las estaciones, es decir, se encarga de que estas intercambien mensajes adecuadamente. Algunas de ellas son las tramas CTS, RTS y ACK.
- **Administración (management):** permiten soportar los servicios que define la subcapa MAC, los cuales son: distribución, integración, asociación, re-asociación, des-asociación, autenticación, privacidad y entrega MSDU. Seis de ellos son usados para soportar la entrega de paquetes entre las estaciones (STA's). Tres de ellos se enfocan a la seguridad y confidencialidad.

Para el presente estudio sólo se tomaran en cuenta los mensajes de datos, pues son los que llevan la carga útil producida por el usuario en capas superiores y mediante los cuales se podrá determinar de forma más precisa la eficiencia volumétrica.

3.4.2 Formato general de la trama

El formato genérico para la trama MAC está compuesto de un grupo de campos en un orden fijo, de acuerdo al tipo de trama el formato puede variar haciendo desaparecer algunos campos, sin embargo, con el objeto de tener un estudio de la eficiencia volumétrica más preciso se tomara en cuenta éste formato genérico.

Se puede dividir en dos subgrupos:

- **Encabezado:** contiene cuatro campos: control de trama (*frame control*), duración (*duration*), direcciones (*address1-address4*) y control de secuencia (*Sequence Control*).
- **Cuerpo de la trama:** está constituido por los datos útiles, en ese caso la MSDU proveniente de la subcapa LLC.
- **FCS (*Frame Check Sequence*):** se agrega a la trama para añadir robustez, es decir, para que se pueda verificar que no esté corrupta la información que se recibe al llegar al destino.

Su formato se muestra a continuación:

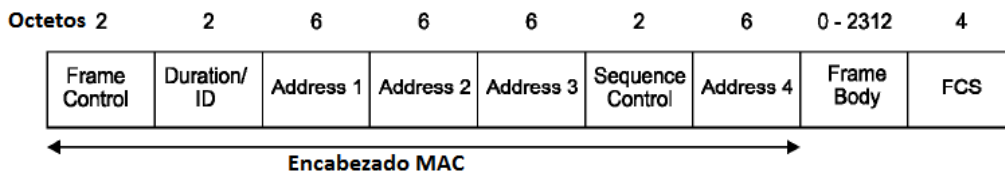


Figura 3.5. Formato de trama MAC

- **Frame control (2 bytes = 16 bits):** los subcampos que contiene son:

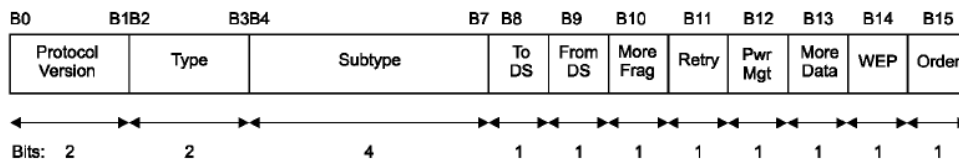


Figura 3.6. Campo de Control de trama (*Frame Format Field*)

Protocol version: indica la versión del 802.11 MAC que contiene el resto de la trama. Únicamente se ha desarrollado una versión identificada con 0.

Type/Subtype: identifican el tipo de trama, es decir, la clase de trama de la que se trate. Debido al uso de CTS y RTS se han creado diversos tipos de tramas de control. Los identificadores son: 00 *Management frames*, 01: *control frames*, 10: *data frames*, 11: reservado. Los subtipos son 16 (4 bits) y pueden ser consultados en [1] sección 7.1.3.1.

To DS y from DS: indica si la trama va hacia o viene del sistema de distribución entre celdas.

MF (More Fragments): indica si el paquete proviene de capas superiores ha sido fragmentado poniéndose con valor 1. En la práctica, la mayoría de los paquetes se transmiten usando la MTU Ethernet, por lo que no es muy frecuente usarlo.

Retransmitir (Retry): para evitar las tramas que se han retransmitido estén duplicadas, se coloca en 1 este bit.

Manejo de energía (Power Management): activa el modo de ahorro de energía cuando se usan dispositivos portátiles, es decir, indica que pueden ser apagadas partes de la interfaz de red cuando se hayan transmitido los paquetes. Los AP nunca activan esta modalidad.

Más datos (More data): indica si una estación tiene tramas almacenadas en el buffer para un destino específico.

WEP: indica si la trama se ha codificado usando el algoritmo WEP (*Wireless Equivalent Privacy*).

Orden (Order): se coloca en 1 cuando el envío ordenado de paquetes sea crucial.

- **Duration (2 bytes = 16 bits):** indica cuánto tiempo ocuparán en el canal la trama y su confirmación de recepción.
- **Address 1-4 (6 bytes cada una):** pueden contener hasta cuatro direcciones, las cuales están numeradas de acuerdo con el propósito que tenga la trama o su tipo. La regla es que Address 1 es usada para el receptor Address 2 para el transmisor, Address 3 para filtrado del receptor, Address 4 sirve para identificar a qué parte de la red está asociado el receptor.
- **Sequence (2 bytes = 16 bits):** se usa para desfragmentar y evitar tramas repetidas. Se compone de dos campos: 4 bits para el campo de número de fragmento y 12 para número de secuencia. Todas las tramas que provienen de capas superiores tienen un número de secuencia, dependiendo de la estación que la haya transmitido, antes de

pasar a MAC. Va de 0 a 4096 incrementándose en 1 por cada paquete maneje MAC. Si hubo fragmentación, los fragmentos de un mismo paquete tiene el mismo número de secuencia y lo que los diferencia es el número de fragmento, que de igual manera comienza en 0 e incrementa en 1 por cada fragmento.

- **Cuerpo del mensaje Payload (0-2312 bytes):** es la carga de datos útiles encapsulado desde capas superiores como se establece en el estándar original, la máxima cantidad de datos que se pueden transmitir es de 2304 bytes de datos de capas superiores; en la implementación se pueden soportar mayor número de datos, para acomodar encabezados adicionales de seguridad y QoS.
- **Secuencia de verificación de errores FCS (4 bytes = 32 bits):** es una verificación de la integridad de la trama que se lleva a cabo mediante *un código de redundancia cíclica (CRC)*. La verificación se realiza operando matemáticamente la trama con un polinomio en este caso un polinomio de grado 32.

El polinomio es:

$$x^{32} + x^{30} + x^{29} + x^{28} + x^{26} + x^{20} + x^{19} + x^{17} + x^{16} + x^{15} + x^{11} + x^{10} + x^7 + x^6 + x^4 + x^2 + x + 1$$

Las MSDU que llegan de la subcapa de control de enlace lógico se encapsulan en el formato de trama mencionado anteriormente y se convierten en una MPDU (MAC Protocol Data Unit). A cada MSDU se le agregan en total 30 bytes de encabezados y 4 bytes como FCS, por lo tanto, la infamación que agrega la subcapa MAC a la información útil es:

$$Encabezado_{MAC} = 30 \text{ [bytes]}$$

$$Tail_{MAC} = 4 \text{ [bytes]}$$

$$adicional_{MAC_{WiFi}} = 34 \text{ [bytes]} \quad (3)$$

3.5 LA CAPA FÍSICA 802.11 (PHY)

El estándar 802.11 publicado en 2007 especifica además tres técnicas de transmisión permitidas para la capa física, dos de ellas basadas en la banda de frecuencias ISM 2.4 GHz y técnicas de espectro disperso¹¹, y la tercera basada en radiación infrarroja difusa [5].

Las tres proveen un ancho de banda de hasta 2 Mbps. Se conocen como:

¹¹ Se puede encontrar una descripción más amplia de las técnicas Spread Spectrum (SS) en el apéndice A.

Frequency-hopping spread-spectrum (FHSS): utiliza 79 canales, cada uno con un ancho de banda de 1 MHz, con el extremo más bajo en la banda de 2.4 GHz. Para generar la secuencia aleatoria de frecuencias se usa un generador de números pseudoaleatorios. Siempre que el transmisor y receptor utilicen la misma “semilla” para generar dicha secuencia y permanezcan sincronizados, saltaran de forma simultánea a la misma frecuencia. El tiempo invertido en cada frecuencia (permanencia) es un parámetro ajustable., lo que proporciona seguridad, robustez al ruido y eficiente uso del espectro.

La Figura 3.7 ilustra gráficamente el proceso de generación de la señal y una imagen de la misma vista en el analizador de espectros.

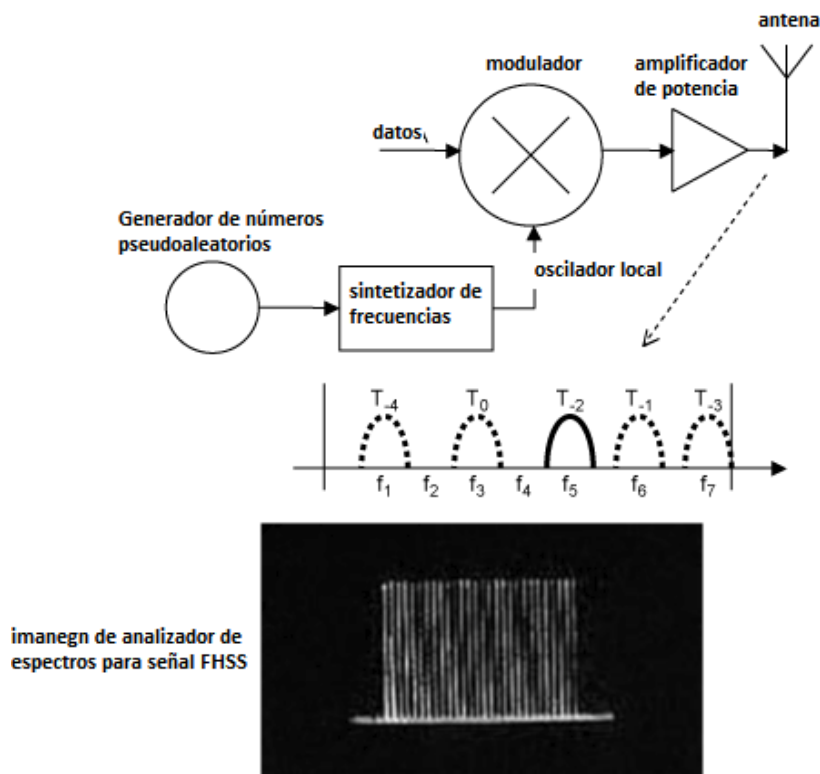


Figura 3.7. Señal FSSS

Direct-sequence spread-spectrum (DSSS) [13]: también restringido a 1-2 Mbps. Se encarga de ensanchar la potencia de la señal en una banda de frecuencias ancha multiplicando una portadora de RF y un secuencia pseudoaleatoria similar al ruido PN (cuyos símbolos se denominan Chips y son de menor duración que el bit de información y se generan a partir de la secuencia de *Barker*).

En primer lugar el código PN (*Pseudo Noise*) se modula en la señal de información a través de una de varias técnicas de modulación digital (por ejemplo, BPSK, QPSK¹²). Entonces, un mezclador doblemente balanceado se utiliza para multiplicar la portadora de RF y la señal PN información. Este proceso hace que la señal de RF para ser sustituida por una señal de gran ancho de banda espectral con el equivalente de una señal de ruido.

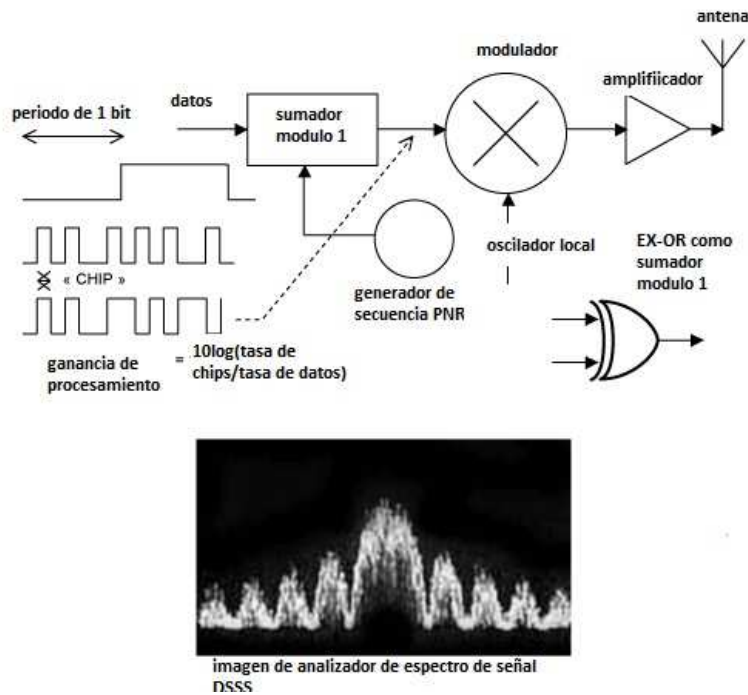


Figura 3.8. Señal DSSS

Infrared light (IR): utiliza transmisión difusa (*no LOS*) a 0.85 o 0.95 μm . Se utiliza esquema de codificación en el que grupos de 4 bit se codifican con una palabra codificada de 16 bits que contiene 15 ceros y un 1 usando *código Gray*, con lo que un error a la entrada produce sólo un error a la salida. Los infrarrojos no penetran paredes, por lo que las habitaciones son como celdas independientes celdas. No es popular debido al bajo ancho de banda y a que es afectado por fenómenos físicos como la luz solar.

El uso de equipo en las bandas ISM generalmente no requiere licencia pues son bandas de uso libre. Sin embargo, el problema de interferencia crece debido a la gran cantidad de dispositivos operando en dicha banda; es por ello que la potencia de transmisión debe ser limitada, es decir, la radiación emitida debe ser baja para evitar que dos sistemas en la misma banda se enmascaren.

¹² Se podrá encontrar más información acerca de modulaciones digitales en el Apéndice B.

Como se mencionó anteriormente, la necesidad de contar con anchos de banda mayores y reducir la interferencia, se definieron posteriormente ciertas variantes del estándar que operan en diferentes frecuencias y variedad de anchos de banda. Estas especificaciones se realizaron basándose en tecnologías de microondas y con técnicas de *Spread Spectrum*.

Se denominan de acuerdo con la variante del estándar bajo el cual se definió:

- 802.11a: Orthogonal Frequency Division Multiplexing (**OFDM**) **PHY** (hasta 54 Mbps).
- 802.11b: High-Rate Direct Sequence (**HR/DS or HR/DSSS**) **PHY** (11 Mbps).
- 802.11g: Extended Rate **PHY (ERP)**.
- Para la variante futura 802.11n, se le denomina coloquialmente **MIMO PHY**.

La Figura 3.4 muestra de forma gráfica la información anterior:

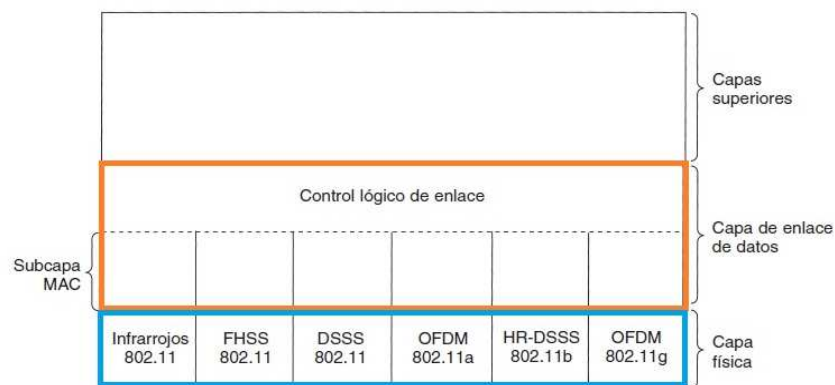


Figura 3.8. Técnicas de transmisión en capa PHY

3.5.1 Capa física para el IEEE 802.11g

Ésta variación del estándar surgió como una mejor para las versiones ya existentes, pues incrementa la tasa de transmisión respecto del estándar 802.11b; dado que éste último no era compatible con la versión 802.11a, surge la variante 802.11g la cual ofrece una tasa de transmisión comparable con la versión 802.11a al mismo tiempo que permite la operación en la banda de 2.4 GHz.

Esta especificación no presenta cambios significativos respecto de las anteriores, y su principal característica es proveer compatibilidad con los sistemas previos. Se establecieron varias especificaciones para esta versión, se incorpora una cláusula para Extended Rate PHY (ERP), con lo cual surgen diversas variedades de ERP [12]:

- **ERP-DSSS and ERP-CCK:** compatibles con las especificaciones originales de DSSS, y con las mejoras de 802.11b (5.5 Mbps and 11 Mbps).
- **ERP-OFDM:** es el más extendido, esencialmente es la versión 802.11a operando en la banda 2.4 GHz con cambios menores para proveer compatibilidad. Velocidades de 6, 12, and 24 Mbps son requeridas.
- **ERP-PBCC:** extensión del estándar 802.11b, es opcional. De uso muy reducido.
- **DSSS-OFDM:** sistema híbrido que codifica paquetes usando DSSS para los encabezados y OFDM para los datos. Se publicó para permitir compatibilidad, sin embargo, no es muy usado.

Las estaciones 802.11g deben ser capaces de procesar la información proveniente de los estándares previos, 802.11 soporta el preámbulo corto, lo que ayuda a mantener el throughput en un nivel aceptable. Los dispositivos 802.11 también implementan ERP-OFDM basado en gran parte en el 802.11a; en realidad es casi idéntico en su formato excepto por pequeños cambios que permiten el incremento de la tasa de transmisión.

Sus principales parámetros son:

Tabla 3. Parámetros del 802.11g [1] pp.72

Información de tasa de datos	6,12,18,24,36,48 y 54 Mbps (6,12 y 24 Mbps obligatorios)
Modulación	BPSK OFDM QPSK OFDM 16-QAM OFDM 64-QAM OFDM
Código de corrección de errores	Código convolucional K=7 (64 estados)
Tasa de codificación	1/2, 2/3, 3/4
Número de subportadoras totales	64
Número de portadoras no nulas	52
Número de subportadoras de datos	48
Número de portadoras piloto	4
Duración de símbolo OFDM	4 μ s
Espacio entre portadoras	312.5 kHz
Ancho de banda de la señal	16.6 MHz
Ancho de banda del canal	20 MHz

El presente trabajo se enfocará en analizar los formatos de las tramas para la modalidad ERP-OFDM, pues es el que mejor compatibilidad muestra con el estándar WiMAX fijo, y que se tratará en el desarrollo posterior.

Como se manifiesta en la tabla 3, entre portadoras existe un espacio de 312.5 KHz, lo cuál se obtiene de la siguiente forma:

$$\Delta f = \frac{20 \text{ MHz}}{64 \text{ portadoras}} = 312.5 \text{ [KHz]} \quad (4)$$

Por lo que el tiempo de un símbolo es:

$$T_s = \frac{1}{\Delta f} = \frac{1}{312.5 \text{ KHz}} \approx 3.2 \mu\text{s} \quad (5)$$

Y agregando 0.8 μs de tiempo de guarda, el tiempo de un símbolo es:

$$T_s = 4[\mu\text{s}] \quad (6)$$

Por tanto la señal OFDM contando las portadoras de datos (48) y las cinco portadoras nulas (piloto más DC), dan un ancho de banda de:

$$BW_{señal} = (48 + 5) \cdot 312.5[\text{KHz}] = 16.6 \text{ [MHz]} \quad (7)$$

3.5.2 Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM)

La *multiplexión por división de frecuencias ortogonales* conocida como OFDM es una técnica de comunicaciones que divide un canal de comunicación en un número de bandas de frecuencia igualmente espaciadas.

Una subportadora (también conocida como tono) lleva una porción de los datos de usuario y es transmitida en cada una de dichas bandas; dichas bandas resultan ser ortogonales entre si, es decir, independiente de las otras cuyo espaciado proporciona ortogonalidad, de tal forma que el espectro puede ser usado en su totalidad pues las portadoras no se interfieren entre si y no es necesario el uso de bandas de guarda entre ellas como lo hace *FDM*.

La Figura 3.9 muestra el espectro *OFDM*, señal es una subportadora con una cierta frecuencia. Nótese que las frecuencias son ortogonales pues para cada máximo de las señales, las demás valen cero, con lo cual se evita la interferencia entre ellas.

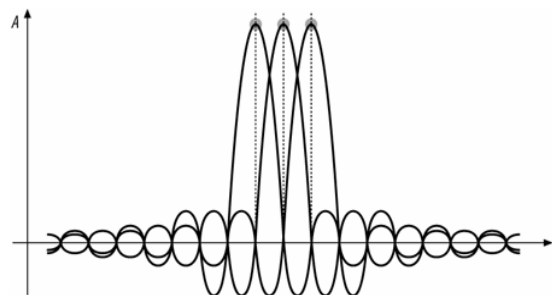


Figura 3.9. Espectro OFDM

Por tanto, algunos de los beneficios de OFDM son:

- Alta eficiencia espectral
- Resistencia a la interferencia de otras señales de RF.
- Baja distorsión por multitrayectoria.

Es por estas razones que es una técnica muy usada en comunicaciones inalámbricas, pues proporciona mayor robustez al sistema en contra del ruido y la degradación de la señal por multitrayectoria.

Puede ser vista como una combinación entre *modulación*¹³ y *técnica de acceso al medio*, pues segmenta el espectro de tal forma que múltiples usuarios tengan acceso a él.

Dicha técnica permite que la información contendía en cada tono sea modulada usando modulación en fase, amplitud o ambas; por lo que *PSK (Phase Shift Keying)* o *QAM (Quadrature Amplitud Modulation)* son usadas frecuentemente.

Un sistema OFDM toma una cadena de datos (*stream*) y la divide en un número N de *streams* paralelos, los cuales son mapeados en tonos, cada uno con una frecuencia distinta y después son combinados mediante *la transformada inversa de Fourier (IFFT)* convirtiéndolos en una única forma de onda en el dominio el tiempo lista para enviarse a través del canal inalámbrico [14].

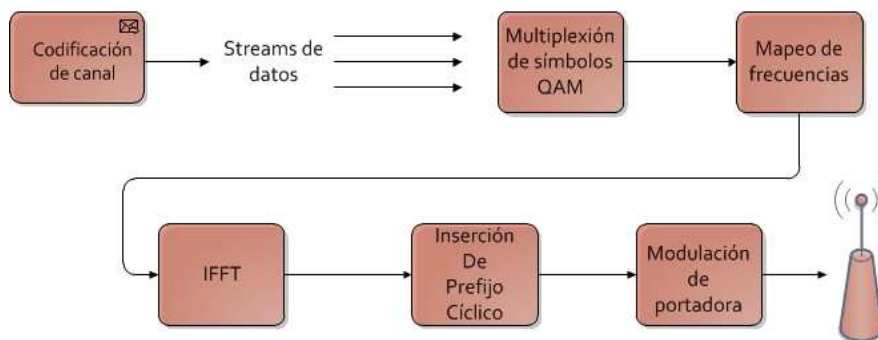


Figura 3.10. Cadena de transmisión de OFDM

OFDM puede ser considerado también como una *técnica múltiple de acceso al medio*, porque un tono o varios de ellos pueden ser asignados a diferentes usuarios, por lo tanto un grupo de ellos **comparten el mismo ancho de banda**, con lo cual se conoce a la

¹³ Para mayor referencia acerca de modulaciones refiérase al Apéndice B.

técnica como OFDMA (*Orthogonal Frequency Multiple Access*), dicho número puede ser fijo o variable dependiendo de la cantidad de información que el usuario transmita.

En presencia de multitrayectorias, es necesario introducir un **prefijo cíclico** en la señal OFDM para asegurar que las frecuencias sigan siendo ortogonales y que no haya interferencia; además de seguir admitiendo múltiples usuarios. El prefijo es una copia de la última porción de un símbolo de datos agregado al inicio del símbolo como un tiempo de guarda. Dado que el efecto multitrayectoria y las interferencias ocasionan que la señal llegue retrasada al receptor, este tiempo de guarda permite que los tonos puedan realinearse conservando ortogonalidad, su duración depende de los efectos producidos por el canal.

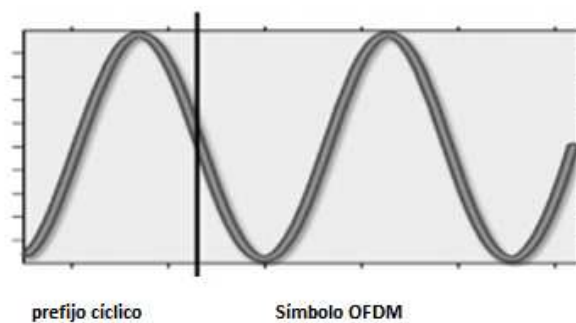


Figura 3.11. Señal OFDM con prefijo cíclico

3.5.3 Componentes de la capa física 802.11g (PHY)

La capa física del estándar 802.11 se describe como la combinación de dos subcapas, cuyas funciones se describen en dos protocolos [1]:

1. La capa física de función de convergencia **PLCP (Physical Layer Convergence Procedure)**, la cual adapta las funciones del sistema PMD a los servicios de la capa física.
2. El sistema **PMD (Physical Medium Dependent)** cuyas funciones definen las características, métodos de transmisión y recepción de los datos a través del medio inalámbrico entre dos o más estaciones (*STA's*). Cada PMD pudiese requerir la definición de una única PLCP.

3.5.3.1 Subcapa OFDM PLCP (Physical Layer Convergence Procedure)

En esta sección se presenta el procedimiento por el cual una PSDU se convierte en una PPDU o viceversa. Durante la transmisión, la PSDU debe adicionar a su estructura un preámbulo y un encabezado; y de forma inversa, en el receptor deberán ser retirados para obtener de nuevo la PSDU.

El formato del frame ERP-OFDM es en su estructura muy similar al que presenta la versión 802.11a [12], pues usa un protocolo de unidades de datos lógicas idéntico. La única diferencia consiste en un intervalo de guarda de 6 μs (en donde se detecta el canal libre) al final de la trama en los que se efectúan operaciones de compatibilidad y para terminar de decodificar los datos recibidos.

3.5.3.2 Formato de la trama PLCP

La Figura 3.12 [1] muestra el formato de la trama PLCP incluyendo el preámbulo, encabezado y la PSDU y los bits de cola (*tail*) así como los bits de *padding* (*relleno*). Por comodidad no se traducirán los nombres de los campos.

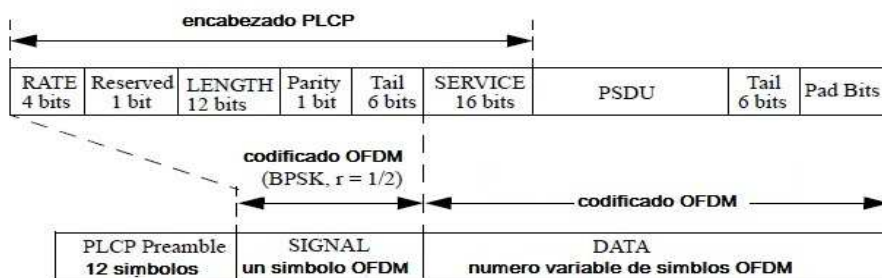


Figura 3.12. Formato de trama PPDU

- PLCP preamble (12 símbolos OFDM):** Su principal función es la sincronización de diferentes temporizadores entre el transmisor y receptor. Se compone de 10 repeticiones de secuencia corta de entrenamiento. Es usado para proporcionar AGC, selección diversa, adquisición de tiempo y de frecuencia, para seleccionar la antena adecuada. Contiene también dos repeticiones largas. Tiene una duración de 16 μs . Una secuencia corta consta de 12 subportadoras y una secuencia larga consta de 53 subportadoras incluyendo la de DC (nula).

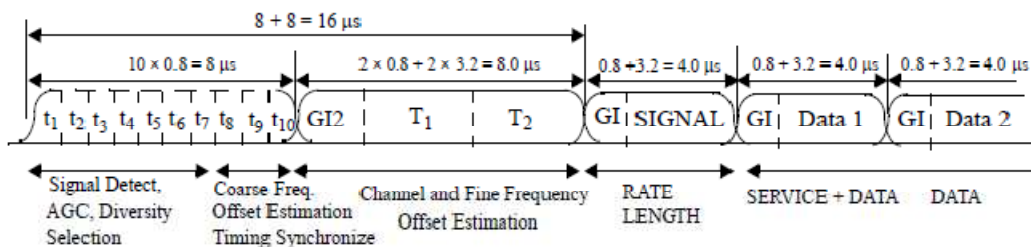
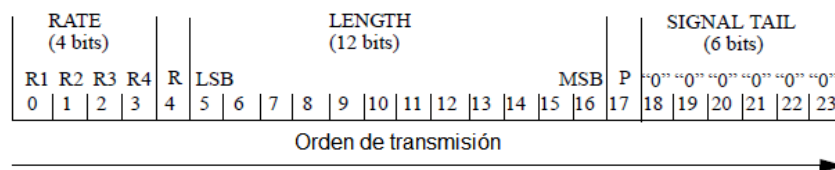


Figura 3.13. Preámbulo PLCP

- **Header (encabezado):** es transmitido a través del campo *Signal*, incorpora el campo *Servicie* del campo de datos de la trama PLCP

Signal (24 bits): compuesta por los subcampos *Rate*, *Reserved*, *Lenght*, *Parity* y *Tail*. Está codificada usando el esquema más sencillo de modulación BPSK y un código convolucional de 1/2, los cuales están mapeados dentro de un símbolo OFDM. Para facilitar la detección de los campos *Rate* y *Lenght* 6 bits de relleno (*Tail*) son insertados en el encabezado PLCP. La Figura 3.15 muestra los campos y sus bits numerados:



LSB: bit menos significativo
 MSB: bit más significativo

3.15 Campo *Signal*

Rate (4 bits): esta codificada la tasa de datos en cuatro bits de acuerdo con los valores de la Tabla 3. Los detalles de la codificación y modulación usada en cada una de ellas se describirá en *OFDM PMD*.

Tabla 4 Valores de campo Rate [1]

Rate [Mbps]	R1 a R4
6	1101
9	1111
12	0101
18	0111
24	1001
36	1011
48	0001
54	0011

Lenght (12 bits): codifica la cantidad de bytes que contiene la trama MAC (PSDU). Transmite del bit menos significativo al más significativo. Se procesa mediante un código convolucional para protegerlo de errores.

Parity (1 bit) y Reserved(1 bit): el bit 4 está reservado para uso futuro y se pone en cero. El bit de paridad es un bit par de paridad para los primeros 6 bits y evitar corrupción en los datos.

Tail (6 bits): son seis bits en cero que terminan el código convolucional, por tanto, deben ser procesados por dicho código.

- **Data:** contiene el campo Service (16 bits), la PSDU, la cola o Tail. Y los padding bits (relleno). Todos se codifican de acuerdo con los valores mostrados en la Tabla 4.

Service (16 bits): se denotan del 0-15; los bits 0-6 se transmiten primero y se usan para sincronizar la decodificación en el receptor. Los bits 7-15 son reservados para uso futuro.

Tail (6 bits): todos son cero y se usan para regresar el código convolucional al estado cero, lo cual mejora la probabilidad de error del FEC.

Pad bits (variable): dado que el número de bits en el campo DATA debe ser un múltiplo de N_{CBPS} , la información sin codificar debe ser extendida hasta lograr ser un múltiplo de N_{DBPS} , dicho procedimiento se lleva a cabo con estos bits de relleno.

3.5.3.3 Subcapa OFDM PMD (Physical Medium Dependent)

La capa física usa una gran variedad de modulaciones que le permiten un rango de anchos de banda que va de los 6 Mbps a los 54 Mbps. En todos los casos, la capa física usa una tasa de símbolos de 250 000 símbolos/s en 48 subcanales, donde el número de bits de datos por símbolo varía [12].

Un símbolo OFDM ocupa las 48 portadoras. Tal como se apreció en la Tabla 4, las diversas combinaciones existentes de tasa de codificación convolucional y modulaciones permiten alcanzar ciertos anchos de banda.

Transmisión y recepción

El diagrama de bloques que describe el transmisor y receptor OFDM se ilustra a continuación [12], algunos de sus elementos se han mencionado en secciones anteriores y otros de ellos no resultan relevantes para el presente trabajo:

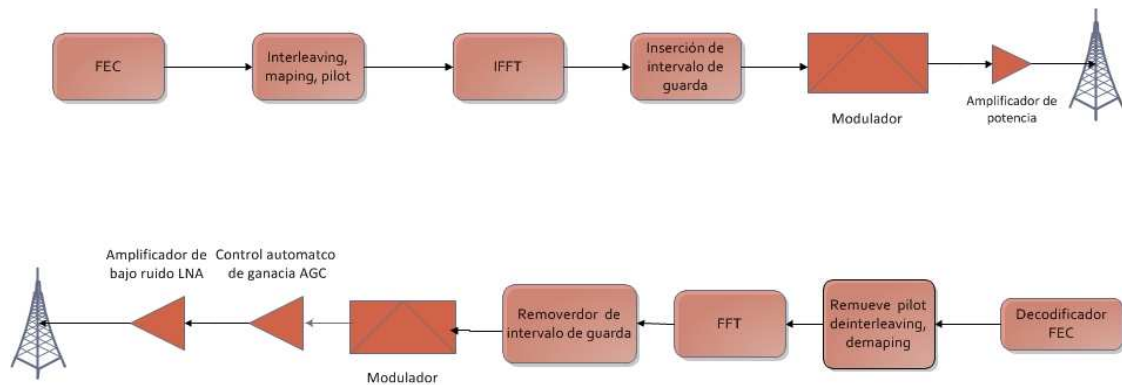


Figura 3.14. Transceptor 802.11a

FEC (Forward Error Correction): se usa un codificador convolucional en cada canal, con tasa de codificación $1/2$, $2/3$, $3/4$, dependiendo de la tasa de datos que se desee. Dichos códigos permiten detectar en el receptor bits corruptos y reparar la transmisión siempre que la proporción de datos perdidos sea una fracción pequeña. Para llevar a cabo esta función, se agregan a la cadena de datos bits de redundancia. Para ello utiliza una máquina de estados que depende la información que va recibiendo, la cual va codificando usando cierto número de símbolos.

Se pueden usar dos clases de FEC: los códigos de bloque que trabajan tomando bloques de entrada de tamaño fijo y códigos convolucionales, para aplicaciones donde la información se almacena, procesa o transmite en trozos los cuales son ideales para las redes inalámbricas. Se usan los polinomios generadores estandarizados $g_0=1338$ y $g_1=1778$.

En los códigos convolucionales, la tasa de codificación (R) determina la cantidad de bits redundantes que se agregaron a la información. Se expresa como la relación entre el número de bits de datos transmitidos y el número total de bits codificados a la salida del codificador.

Un código convolucional con $R=1/2$ puede transmitir un bit de datos por cada dos bits de código (es decir, se duplica la información a la salida del codificador). Otros códigos pueden tener menos información redundante, por ejemplo $R=3/4$, donde sólo el 25% de los bits son redundantes (3 bits de datos, 4 bits totales).

El diagrama de bloques para el codificador convolucional con $R=1/2$ se muestra en la Figura 3.13, donde los bloques T_b representan retardos de un bit de ciclo de reloj, además de los sumadores modulo 2.

Las salidas A y A son intercaladas por lo que la salida es {A1B1A2B2...}.

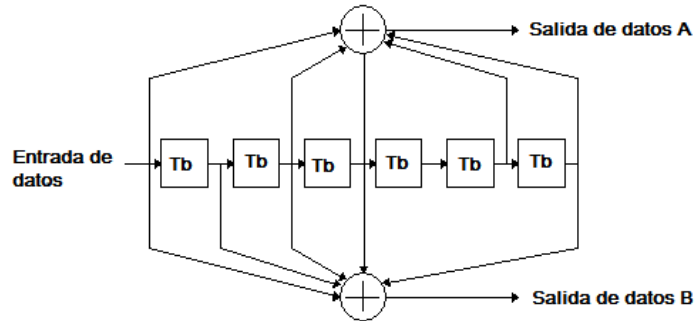


Figura 3.15 Diagrama de bloques para FEC

La selección de un tipo de codificación es una cuestión de ingeniería pues a medida que disminuye la tasa de código, más bits de código están disponibles para corregir los errores, y el código se vuelve más robusto; sin embargo, el precio de la robustez disminuye el rendimiento al tener que procesar mayor cantidad de datos.

Inteleaving y mapping: consiste en asignar la cadena de bits codificados a una subportadora que llevará dicha información al canal aéreo. En vez de usar técnicas comunes en las que se asigna la información en el orden que llega a las subportadoras sucesivas, se asigna la información usando reglas de interpolación (*mapping*) que asegura que información consecutiva se asigna a subportadoras lejanas entre si, y que los bits de la secuencia correspondan a diferentes puntos de la constelación (*interleaving*).

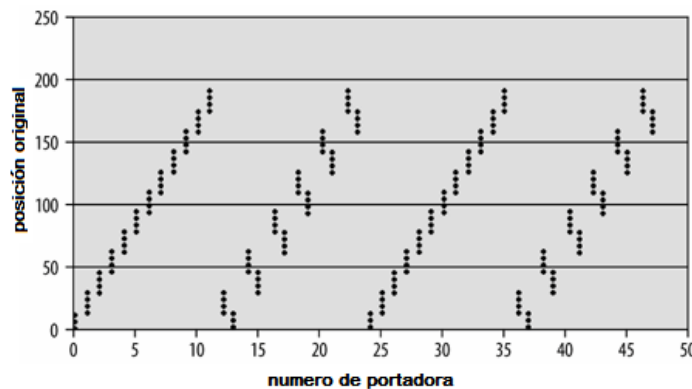


Figura 3.16. *Interleaving* (intercalamiento) con 16-QAM

Codificación y modulación

Así mismo, los parámetros de modulación están relacionados con dicha tasa de transmisión de acuerdo a la siguiente tabla:

Tabla 4. Parámetros dependientes del campo Rate (tasa de datos) [1]

Tasa de datos [Mbps]	Modulación	Tasa de codificación (R)	Bits codificados por subportadora (N_{BPSK})	Bits codificados por símbolo OFDM (N_{CBPS})	Bits de datos por símbolo OFDM (N_{DBPS})
6	BPSK	1/2	1	48	24
9	BPSK	3/4	1	48	36
12	QPSK	1/2	2	96	48
18	QPSK	3/4	2	96	72
24	16-QAM	1/2	4	192	96
36	16-QAM	3/4	4	192	144
48	64-QAM	2/3	6	288	192
54	64-QAM	3/4	6	288	216

Los valores se obtienen de la siguiente forma.

Ejemplo:

Para la tasa de datos 18 Mbps:

Utiliza modulación **QPSK = 4-PSK**, por tanto $4=2^2$ entonces, por cada símbolo codificado habrá 2 bits, es decir, dos bits por subportadora.

Cada símbolo OFDM tiene $N_{DBPS} = 72 \text{ bits}$, aplicándoles una tasa de codificación $R=3/4$:

$$N_{CBPS} = N_{DBPS} \left[\frac{1}{R} \right] = 72 \text{ bits} \left[\frac{4}{3} \right] = 96 \text{ bits}$$

De esta forma es posible observar que a distintas tasa de codificación corresponden diferente número de bits a la salida del sistema, las tasas de codificación bajas como 1/2 son menos eficientes pues los datos útiles ocupan menor cantidad de recursos de la red.

3.6 CONCLUSIONES

Este capítulo permitió conocer más a fondo la tecnología WiFi, la cual se ha convertido en un éxito comercial para redes de área local WLAN. Su bajo costo y el hecho de operar en bandas no licenciadas son los aspectos que le ha permitido tener una gran popularidad en el mercado. Adicionalmente presentan topologías sencillas y más fáciles de operar que otras tecnologías inalámbricas, lo cual la hace una tecnología muy atractiva.

En cuanto a la estructura de la tramas presentes tanto en capa física como en capa MAC, es posible ver que la los bytes que se adicionan a la carga útil en la capa MAC son 34, así mismo, es posible ver que este estándar permite a fragmentación de tramas cuando estas sean más grandes que la correspondiente MTU. Este número podría parecer grande pero en su mayoría esta ocupado por los campos de direcciones que son identificadores MAC de 48 bits.

En cuanto a la capa física, la codificación juega un papel muy importante pues dependiendo de la tasa de codificación convolucional usada, serán la cantidad de bits de redundancia que se agreguen a la información. De acuerdo con los campos de la capa PHY, la subcapa PLCP agrega cierta cantidad de información a la PSDU para convertirla en una PPDU, y dependiendo de la tasa de datos que utilice (Tabla 4):

Los datos en el preámbulo no se codifican, pues son datos bien conocidos:

$$preámbuloPHY = 12 \text{ simbolos}(N_{DBPS}) [bits] \quad (8)$$

Los bits aportados por el campo *Signal* que no están codificados:

$$signalPHY = 24[bits] \quad (9)$$

Los bits del campo *Service* y *Tail*, así como *padding*:

$$N_{symbNC} = ceiling \left[dataPHY = \frac{16 \text{ bits} + 6 \text{ bits} + \text{tamañoPSDU}}{N_{DBPS}} \right] \quad (10)$$

La función *ceiling* representa una función matemática que redondea el resultado de la división al entero inmediato superior, lo cual permitiría hacer un cómputo de los símbolos no codificados ya contando bits de *padding*.

Y para obtener los bits totales en el campo de datos (Data) ya codificados:

$$N_{dataC_WiFi} = N_{symNC} * N_{CBPS} \quad (11)$$

Capítulo 4.

Estándar IEEE 802.16 (WiMAX)

4.1 INTRODUCCIÓN

En el presente Capítulo se hará una descripción de los aspectos contenidos en el estándar 802.16-2004 aplicados a la tecnología WiMAX. En primer lugar se hace una descripción de la forma en la que surge el estándar 802.16, sus primeras versiones y las variantes que ha tenido a lo largo del tiempo relatando las mejoras que se han hecho en cada una de las versiones. Posteriormente se describen las características principales de la tecnología WiMAX y una descripción de las topologías que maneja.

La descripción de la pila de protocolos es el tema central de presente capítulo, se describe de forma general cómo es que se integran las capas MAC y PHY, como se relacionan y posteriormente una descripción más detallada de la capa MAC, la cual incluye sus tres subcapas de las cuales se da un panorama general en cuanto a las funciones y se describen los formatos de la trama de subcapa común MAC. La subcapa de seguridad no se describe a fondo por no ser un tema esencial en el desarrollo del presente trabajo.

La capa física PHY se describe al final del capítulo, en ella se muestra la estructura en diagrama de bloques del transmisor, y se describen de forma breve sus componentes centrándose en la codificación FEC que están integrada por los codificadores *Reed-Solomon* y *Codificador convolucional*. Adicionalmente se describen los formatos de tramas para el acceso múltiple TDD.

4.2 ANTECEDENTES ACERCA DEL ESTÁNDAR

Las tecnologías basadas en redes BWA (*Broadband Wireless Access*) resultan muy atractivas debido a que ofrecen diversas ventajas en comparación con las redes WLAN, como son altas tasas de transmisión, cobertura extensa, la posibilidad de implementar movilidad y *calidad de servicio (QoS)*.

Los antecedentes de estas tecnologías se encuentran en los sistemas LMDS (*Local Multipoint Distribution System*). Su propósito era proporcionar un servicio de comunicación inalámbrica para voz, internet, video bajo demanda, etc. con amplia cobertura.

Posteriormente el IEEE formó un comité para desarrollar el estándar que se denominó **IEEE 802.16**, iniciando trabajos en julio de 1999 y siendo aprobado en abril de 2002. Su nombre oficial "**Air Interface For Fixed Broadband Wireless Access Systems**", que se relacionó directamente a la clasificación de redes MAN (*Metropolitan Area Networks*). Dicho estándar define el acceso fijo inalámbrico para redes WMAN en su variante *IEEE*

802.16-2004 y el IEEE 806.16e, que es una mejora al estándar previo que incorpora movilidad [4].

Dicho estándar establece las características de las capas física (*PHYSICAL Layer*) y MAC (*Media Access Control*) para la tecnología denominada comercialmente como WiMAX. Ambas son parte de las dos capas más bajas (física y enlace de datos) definidas por el modelo OSI.

4.2.1 Evolución del estándar IEEE 802.16

El estándar 802.16-2004 es el resultado de una revisión hecha a los estándares 802.16-2001, 802.16a-2003 y 802.16c-2002; aunque antes de que ésta se publicara una revisión previa denominada 802.16d iniciada en Septiembre de 2003 se llevó a cabo con el objetivo de permitir la compatibilidad del estándar de HiperMAN BWA aprobado por la *ETSI (European Telecommunications Standards Institute)*. Finalmente se publicó la versión 802.16-2004 como resultado de dichos avances.

Sin embargo, en lo sucesivo aparecieron documentos adicionales que describían diversas partes de la tecnología, con modificaciones al estándar original 802.16-2004, por ejemplo, la necesidad de incorporar funciones que permitieran movilidad. Como resultado se publicó el estándar 802.16e, también conocido como 802.16-2005.

La siguiente tabla resume los documentos más importantes publicados para este estándar:

Tabla 5. Principales documentos 802.16 [1]

Fecha y nombre del documento	Descripción
Diciembre 2001: 802.16	10-66 GHz, LOS, 2-5 km; anchos de banda del canal: 20,25,28 MHz.
Enero 2003: 802.16a	2-11 GHz, NLOS
802.16-2004	Revisión y consolidación de los anteriores reemplazándolos, 5-50 km.
7 Diciembre 2005: 802.16e	Movilidad: OFDMA
Otras mejoras: 802.16f, 802.16g, 80.216f, etc.	Aspectos de <i>Handover</i> , información de administración.

4.3 WiMAX (*WORLDWIDE INTEROPERABILITY FOR MICROWAVE ACCESS*)

Como ya se mencionó, WiMAX se desarrolla en base a las especificaciones del grupo de estándares 802.16 los cuales proporcionan las especificaciones técnicas; sin embargo, resulta necesario crear un organismo que verifique aspectos como la interoperabilidad. Es por esta razón que se crea el foro WiMAX (*WiMAX forum*) en junio de 2001.

Se integra por fabricantes de equipo, operadores de redes, académicos y otros actores en el campo de las telecomunicaciones. Su objetivo es facilitar el desarrollo de las redes inalámbricas de banda ancha basadas en el estándar IEEE 802.16 asegurándose de mantener la compatibilidad e interoperabilidad del equipo de banda ancha inalámbrica [4].

4.3.1 Características de WiMAX

WiMAX es una tecnología que poco a poco se ha ido desarrollando y se ha posicionado en algunos países como una opción viable para servicios móviles, algunas de sus características más sobresalientes son:

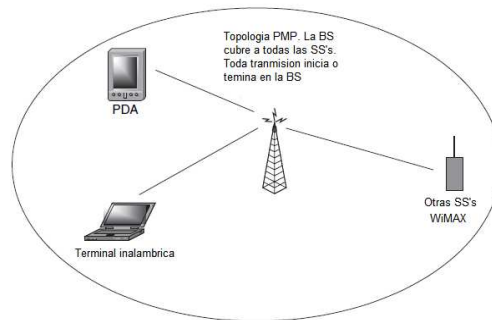
- Opera tanto en bandas licenciadas (2.3GHz y 3.5 GHz) para transmisiones a larga distancia y en bandas no licenciadas entre 5.8 GHz, 8 GHz y 10 GHz, dependiendo las asignaciones del espectro que se tengan en cada región o país.
- Se basa en OFDM¹⁴, puede cubrir distancias muy amplias que abracan campus enteros incluso ciudades pues el rango está en el orden de 50 km, incluso en condiciones de NLOS. Tiene eficiencia espectral de 5 bps/Hz y tasa de transmisión de hasta 128 Mbps.
- Soporta varios tipos de multiplexion, como lo es TDD (*Time Division Duplexing*) y FDD (*Frequency Division Duplexing*).
- Es escalable y puede acoplarse con otras tecnologías como lo es WiFi
- Soporta modulación adaptable. Ofrece niveles de servicio SLA (*Service Level Agreement*) que es un acuerdo en el que los operadores se comprometen a prestar un servicio bajo determinadas condiciones mínimas y ofreciendo *calidad de servicio* (QoS).
- Soporta aplicaciones como video y voz en un mismo canal, admite tecnologías como VoIP, videoconferencias y otras tecnologías de comunicación entre personas, oficinas y dispositivos.
- Utiliza antenas inteligentes que mejoran la eficiencia espectral y que a través de la modulación adaptable se adaptan a las condiciones de la SNR en un determinado instante.
- Es más económica que las redes cableadas como son las basadas en fibra óptica, por lo que ha comenzado a popularizarse en diversas ciudades y países.
- Soporta medidas de encriptación mediante los algoritmos *Triple DES* (128 bits) y *RSA* (1024bits) y autenticación de usuarios.

¹⁴ Se describió en la sección 3.4.2

4.3.2 Topologías WiMAX

El estándar IEEE 802.16 define dos posibles topologías de red:

PMP (Point-to-Multipoint): el tráfico solo entre la BS y los SS's, es una topología centralizada, en donde la BS es el centro del sistema. La Figura 4.3 muestra esta topología:



4.1 Red PMP WiMAX

Mesh (malla): en esta topología, el tráfico puede ser ruteado hacia otra SS, mientras que las BS pueden hacerlo solo entre SS's. Sus elementos se denominan nodos. Cada estación puede crear su propia comunicación, con cualquier otra estación en la red, es decir, no se restringe solo a establecer comunicación con la SS. Su ventaja es que el alcance de la BS puede ser más grande dependiendo del número de saltos a la SS más lejana. Cada nodo recibe un identificador de 16 bits o *Node ID*. La Figura 4.4 muestra la topología mesh.

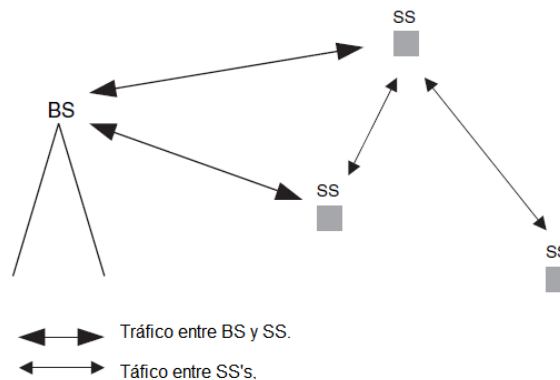


Figura 4.2. Topología mesh

4.3.3 Equipo WiMAX

Radios WiMAX [17]: es la parte central para la red WiMAX; contiene tanto el transmisor como el receptor y genera oscilaciones en la frecuencia conocida como la frecuencia portadora (frecuencia de operación). La mayoría de las veces el radio está separado de la antena; los CPE de los SS están integrados por radio y antena, la cuál se coloca al aire

libre para proteger al radio de las condiciones ambientales como humedad o calor, lo que podrían reducir su vida útil. Al colocar fuera la antena se aumenta su eficiencia y desempeño en la conexión inalámbrica. Se muestran a continuación dos tipos de CPE WiMAX:



Figura 4.3. CPE indoor y outdoor

Antenas

Omnidireccionales: radian en todas direcciones, es decir, cubren un radio de 360° y son utilizadas para enlaces punto multipunto; Adecuadas para situaciones en las que los SS están muy cerca de la BS (aproximadamente en radio de 100m).

Antenas Sectoriales: estas antenas enfocan su haz en una sola dirección, con lo cual se ahorra potencia y se aumenta el radio de cobertura. Se usan varias de ellas para obtener una cobertura de 360° dependiendo del ancho de haz de cada una de ellas.

Antena de panel: pueden incluir el radio dentro de ellas y son alimentados mediante Power over Ethernet (PoE). Son ventajosas pues no necesitan una ubicación externa para el radio.

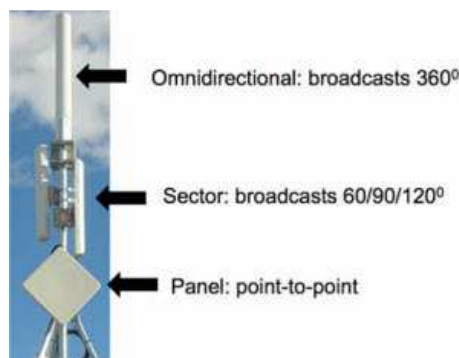


Figura 4.4. Antenas WiMAX

4.3.4 Pila de protocolos

El estándar de redes IEEE 802.16 BWA especifica la **interfaz aérea de un sistema BWA** soportando servicio multimedia. La capa de Control de Acceso al Medio (MAC) soporta una estructura PMP primitiva con una topología *mesh* opcional. Está estructurada para soportar diferentes capas físicas (PHY), especificadas en el mismo estándar. Solo dos de ellas se usan en WiMAX.

La Figura 4.1 ilustra de forma general la ubicación de dichas capas y su distribución: la subcapa de convergencia de transmisión

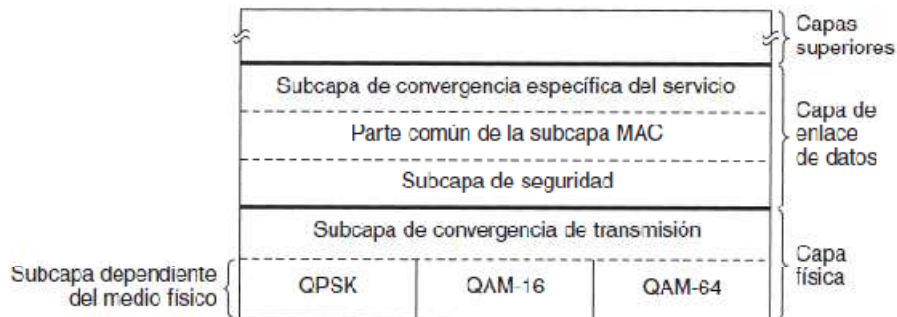


Figura 4.5. Pila de protocolos del estándar 802.16

La arquitectura de capas definida en WiMAX 802.16 se muestra en la Figura 4.6. Las especificaciones de dicho estándar están comprendidas en la descripción de las dos capas más bajas del modelo OSI; la subcapa MAC ocupa la mayor parte de la capa de enlace de datos, junto con la capa LLC. A su vez, se observa que la capa MAC está dividida en tres subcapas: la subcapa de convergencia CS (*Convergence Sublayer*), la subcapa común CPS (*Common Part Sublayer*) y la subcapa de seguridad.

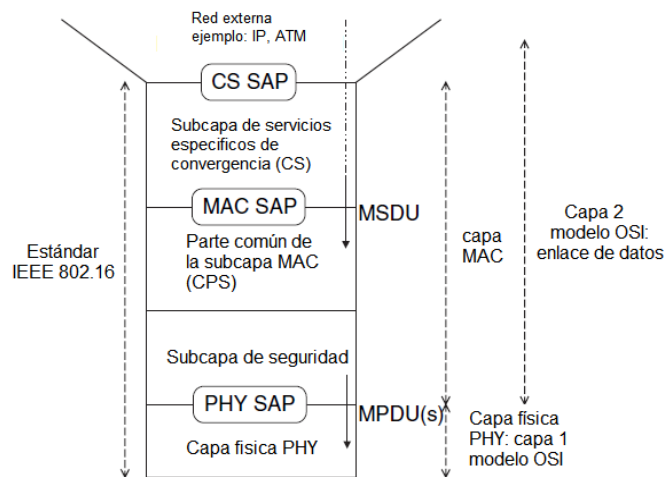


Figura 4.6. Arquitectura de capas

El diálogo que establece las capas o entidades se lleva a cabo de la siguiente forma: cuando la capa MAC de un equipo envía una PDU (*Packet Data Unit*) conocida en esta capa como MPDU a otro equipo, dicha MPDU es recibida como una PSDU (*Physical Layer Service Data Unit*) por la capa física PHY. Entre cada subcapa existe un **Service Access**

Point (SAP) los cuales permiten acceder a los servicios proporcionados por cada una de las capas diferenciándolos de los servicios que proporciona la red.

A continuación, se describirán con mayor detalle ambas capas del estándar.

4.4 CAPA DE CONTROL DE ACCESO AL MEDIO MAC

Como se observó en la Figura 4.4, la capa MAC está compuesta por tres subcapas, la subcapa de convergencia CS, la capa común MAC y la subcapa de seguridad. Esta última no se describirá con mucho detalle pues sus aportes no son relevantes para el presente trabajo.

4.4.1 Subcapa de convergencia (CS)

Esta capa usa los servicios que la capa MAC CPS (*Capa MAC común*) a través del Punto de acceso de servicio MAC (SAP). Sus funciones son:

- Aceptar las PDU entrantes provenientes de capas superiores, las cuales pueden provenir de ATM o paquetes IP; generalmente son **paquetes IPv4**.
- Clasificar y mapear la MSDU que llega a ella en un apropiado identificador de conexión CID (*Connection Identifier*), el cual es una función básica para la aplicación del mecanismo QoS del estándar 802.16.
- Procesar, en caso de que sea necesario, las PDU's de capas superiores con base en su clasificación.
- Supresión de encabezados, lo cual consiste en suprimir partes repetitivas de los encabezados antes de enviarlos y restaurarlos en el receptor.
- Entregar las CS PDU's en el MAC SAP adecuado y recibir las PDU's en el sentido opuesto.

Dicha capa provee todo el mapeo (transformación) de los datos provenientes de la red externa en las MAC SDU que se recibirán en la parte común de la capa MAC. Estas incluyen clasificar los las SDU's externas y asociarlas con el correspondiente SFID MAC (*MAC Service Flow Identifier*) y el identificador de conexión CID.

Una **conexión** se lleva a cabo en el nivel MAC entre una BS y una SS, o de forma inversa. Es unidireccional y tiene el propósito de transmitir tráfico de *Service Flow* (flujo de servicio) para un único tipo de servicio (voz, datos, video...), *es decir*, permite la comunicación entre MACs equivalentes en la BS y SS. Se identifica mediante 16 bits codificados denominados Identificador de conexión (*CID*). También pueden ser considerados CID's los identificadores de conexiones comunes como IP.

El **flujo de servicio o Service Flow (SF)** es un servicio de transporte MAC que provee de transporte unidireccional de paquetes en *Up/Downlink*. Se identifica con 32 bits denominados *SFID (Service Flow Identifier)*, y se caracteriza por tener un conjunto de parámetros de QoS para los paquetes (*PDU's*) que se intercambian en la conexión. Dichos parámetros contienen especificaciones acerca de cómo los SS pueden solicitar reservaciones de ancho de banda y del comportamiento esperado de la reservación en el canal *Uplink* de la BS.

Hay tres tipos de SFID:

- **Admitted SF:** los recursos primero son admitidos y una vez que la negociación entre puntos finales ha terminado, se activan los recursos.
- **Active SF:** este tipo ya tiene asignados recursos desde la BS para su conjunto de servicios activos de QoS.
- **Provisioned Service Flow :** en este tipo los dos parámetros anteriores son nulos. Es un estado inicial.

*Solamente se puede mapear un CID en un SFID cuando la conexión ha **admitido o tiene activo** un determinado SFID, es decir, un SFID coincide con cero (*Provisioned SF*) o con un CID (*Admitted or Active SF*); un CID coincide con un SFID el cual define parámetros de QoS asociados con la conexión.*

La Figura 4.7 ilustra la relación SGFID y CID.

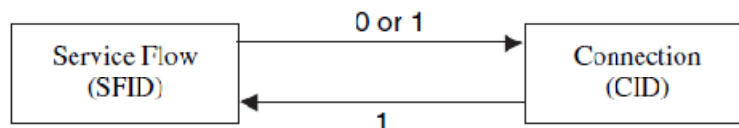


Figura 4.7. Correspondencia CID y SFID

Los mecanismos para llevar a cabo el mapeo entre CID y SFID existen tanto en el *Uplink* (en este caso están en la SS) como en el *Downlink* (están en la BS). Los criterios de coincidencias se denominan clasificadores. Si el paquete coincide con de los clasificadores, se entrega a al SAP para asignarse a una conexión, y por consecuencia, a un CID. Las características de SF de la conexión determinará el QoS a aplicar para ese paquete.

Como conclusión, la subcapa MAC *Convergence Sublayer (CS)* clasifica cada aplicación, es decir, una clase de QoS le es asignada. Este proceso es importante debido a que cada BS da servicio a un número relativamente grande de SS los cuales transmiten diferentes aplicaciones. Dicha clasificación permite una correcta adaptación de los enlaces pues otorga la posibilidad de destinar los recursos necesarios para cada una de ellas; como consecuencia, QoS es más fácil de implementar.

4.4.2 Parte común de la subcapa MAC (MAC CPS)

La subcapa denominada Parte común MAC (MAC CPS) reside en el medio de la capa MAC. Representa la parte medular del protocolo MAC y efectúa las siguientes funciones:

- Asignación de ancho de banda (*BW Allocation*): permite que se tenga una alta eficiencia en el uso de las aplicaciones multimedia.
- Establecimiento de la conexión.
- Mantener la conexión entre dos sitios.

La subcapa CPS recibe mensajes de datos desde varios CS's a través del *MAC SAP*, clasificado para conexiones *MAC* locales. La calidad de servicio *QoS* se toma en cuenta para la transmisión y la asignación (programación) de los datos a través de la capa física. Incluye muchos procedimientos específicos para distintos tipos como construcción de trama, ancho de banda con acceso múltiple, peticiones y respuestas de asignación de ancho de banda, *QoS*, entre otros.

4.4.2.1 Direcciones MAC

Cada *SS* cuenta con una dirección MAC estándar de 48 bits. Define a los *SS* para cualquier proveedor o tipo de equipo. Se usa en el proceso inicial de descubrimiento, en el que se llevan a cabo las conexiones para una *SS*. Es también usado como una parte de proceso de autenticación. Una *BS* cuenta con un *BS Identifier (BSID)* de 48 bits el cual es diferente a la dirección MAC de la base. Incluye un indicador de 24 bits del operador y puede usarse en el *DCD (Downlink Channel Descriptor)*.

4.4.2.2 Formato de trama

Se le conoce como trama MAC a la MAC PDU. Tiene el formato general mostrado en la Figura 4.9; inicia con un encabezado de longitud fija, prosigue con el cuerpo del mensaje (parte en la que se encapsula la *PDU CS*) y puede contener un *CRC (Cyclic Redundancy Check¹⁵)* o suma de verificación de redundancia cíclica.

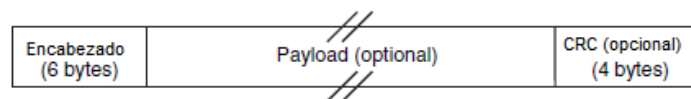


Figura 4.9. Forma genérica de la trama MAC 802.16

¹⁵ Se describió de forma breve en el capítulo anterior.

El *payload* o carga útil puede variar en longitud, de tal forma que el campo longitud también es un número variable; lo anterior permite a la capa *MAC* encapsular varios tipos de tráfico de capas superiores haciendo su formato transparente a esta subcapa en la capa *MAC*.

Formato del encabezado

Se definen dos formatos en el estándar, el campo *Type* en el encabezado *MAC* es que determina cual de los siguientes se usará:

- **Generic MAC Header (GMH):** es decir, encabezado genérico de la capa *MAC*; indica que la trama contiene mensajes de administración o bien mensajes de la capa *CS* (información de usuario o datos de administración de capas superiores). Sólo se usa en el *Downlink*.
- **Encabezado MAC sin payload:** hay dos tipos, el Tipo 1 y 2. El encabezado no está seguido de *MPDU* o *CRC* y fue introducido en la mejora 802.16e del estándar. Ejemplo de este tipo de mensaje son los que se utilizan como peticiones de reservación de ancho de banda.

En el presente trabajo se hará enfoque en las tramas que presenten el GMH, por lo tanto se considerará que la información agregada a la trama en esta subcapa considera *Header* y la suma de verificación *CRC*.

El formato de las tramas que contienen en el GMH se presenta a continuación en la Figura 4.10:

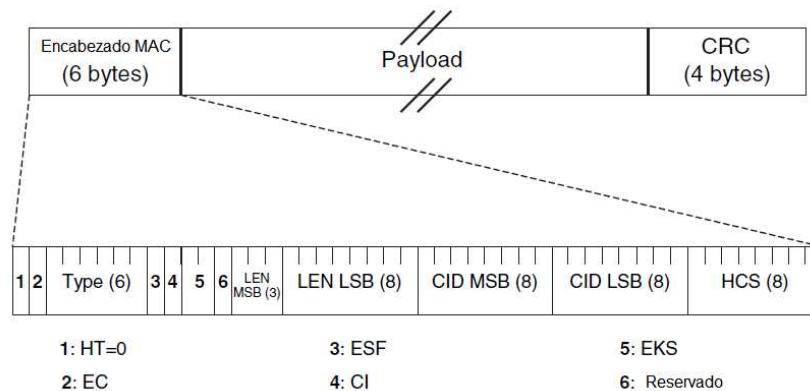


Figura 4.10. Estructura de la trama y formato de encabezado *MAC*

Se presenta a continuación una muy breve descripción de los campos presentes en el encabezado, por comodidad no se hará la traducción de los nombres de dichos campos:

HT (Header Type) (1 bit): indica el tipo de encabezado, como se mencionó existen el tipo genérico MGH y el que no tiene *payload* y CRC.

EC (Encryption Control)(1bit): indica si el *payload* ha sido encriptado.

Type (6 bits): indica la presencia de sub-encabezados, y tipos especiales de *payload*.

ESF (Extended Subheader Field) (1 bit): indica si este tipo de encabezado está presente después del GMH, en *Up/Downlink*.

CI (CRC Indicator) (1 bit): indica la presencia o ausencia del CRC.

EKS (Encryption Key Sequence) (5 bits): es el índice de la clave de encriptación de tráfico y vector de inicialización usado en la encriptación del *payload*.

LEN (Length) (11 bits): longitud en bytes de la MAC PDU incluyendo *Mac Header* y CRC.

CID (Connection ID) (16 bits): contiene el identificador de conexión mencionado en la sección anterior.

HCS (Header Check Sequence) (8 bits): secuencia usada para detectar errores en el encabezado.

Como conclusión, el encabezado y la suma de verificación CRC en la capa MAC común agregan información adicional a la MSDU proveniente de capas superiores; tomando en cuenta únicamente las tramas de información se tiene que:

$$adicional_{MAC} = 10 \text{ [bytes]} \quad (12)$$

Funciones de la subcapa MAC

En algunos sistemas de redes inalámbricas, se lleva a cabo la **fragmentación** de una MAC SDU en varias MAC PDU; o bien de forma inversa, empaquetar muchas MSDU's en varias MPDU's. La función de concatenación es el hecho de transmitir muchas PDU's en una única oportunidad de transmisión. Es posible en *el Up y Downlink*. Dado que cada MPDU se identifica con un único CID, la entidad MAC receptora puede presentar las MSDU's en la correcta MAC SAP; como consecuencia es posible enviar MPDU's con diferentes CID's en la misma conexión física.

4.4.3 Subcapa de seguridad

Ésta subcapa provee de autenticación, intercambio de claves secretas, encriptación y control de integridad a lo largo de la red BWA. Sus funciones son:

- **Encriptación de datos:** mediante algoritmo como WEP, y calidad DES3 de 168 bits [16] y AES. Usa el protocolo *CCMP (Chaining Message Authentication Code Protocol)* para llevar a cabo este proceso.
- **Autenticación:** se usan protocolos como el *PKM (Private Key Management)* usado para proveer la distribución segura de claves entre la SS y la BS y para garantizar acceso condicional a la red.

4.5 CAPA FÍSICA (PHYSICAL LAYER)

Dado que WiMAX es un sistema BWA, los datos se transmiten a altas velocidades en la interfaz aérea a través de ondas electromagnéticas en la frecuencia de operación.

La capa física (*Physical Layer*) establece la conexión física entre dos sitios, y frecuentemente en ambas direcciones (*Uplink y Downlink*). También decide que tipo de modulación se utilizara para transmitir las secuencias de bits, la potencia de trasmisión, y otras características físicas.

Como ya se mencionó, WiMAX puede operar dentro de la banda de 2 a 66 GHz, la cual puede dividirse en dos partes:

- El primer rango comprendido entre 2 y 11 GHz, que esta destinado para transmisiones NLOS (*Non Line of Sight*). Esta especificación se hizo en el estándar 802.16a, y es el único que aun está presente.
- El segundo rango comprendido entre 11 y 66 GHz, que esta destinado a transmisiones LOS. No es usado para WiMAX.

En el estándar 802.16 se han definido cinco interfaces físicas:

Tabla 7. Interfaces físicas (PHY) en el estándar 802.16 [4]

Denominación	Banda de frecuencia [GHz]	Sección en el estándar 802.16	Técnica de duplexión
Wireless MAN-SC PHY (conocida como SC)	10-66 GHz, LOS	8.1	TDD y FDD
Wireless MAN-SCa PHY (conocida como SCa)	Después de 11GHz, NLOS	8.2	TDD y FDD
WirelessMAN-OFDM (conocido como OFDM)	Después de los 11 GHz, licenciado.	8.3	TDD y FDD
WirelessMAN-OFDMA	Después de los 11 GHz, licenciado.	8.4	TDD y FDD
WirelessHUMAN	Después de los 11 GHz, no licenciado.	8.5 (junto con 8.2, 8.3 u 8.4)	TDD

Existe la especificación para frecuencias en el rango de 10 a 66 GHz mediante Wireless MAN-SC PHY y por debajo de 11 GHz, hay tres interfaces físicas:

- **WirelessMAN-OFDM** conocido como transmisión OFDM.
- **WirelessMAN-OFDMA** usando *OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access)* y *OFDM*, con la cual se reescribió la variante 802.16e.
- **WirelessMAN-SC**: que usa modulaciones en portadora simple *SC (Single Carrier)*.

WiMAX considera solamente OFDM y OFDMA como capas físicas, y para el presente trabajo se hará énfasis en la capa **OFDM (WirelessMAN-OFDM)**. Se muestra en la Figura 4.11.

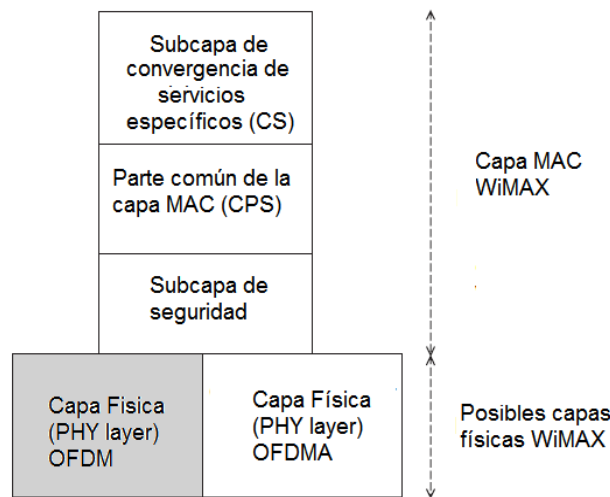


Figura 4.11. Posibles capas físicas para WiMAX

4.5.1 Modulación adaptable

WiMAX implementa una ventaja importante, muy similar a la aplicada en tecnologías celulares como son GSM/EDGE, UMTS y en WLAN's con WiFi: el uso de más de un tipo de modulación, lo cuál se conoce como modulación adaptable.

Consiste en usar diversos tipos de modulación dependiendo de la calidad del enlace entre la BS y el SS; cuando la calidad del enlace es buena (alta *SNR*) se usa un tipo de modulación de alto nivel como lo es 16-QAM o 64-QAM; en cambio, cuando la calidad del enlace es mala, se usan modulaciones más robustas como BPSK. También puede variar la tasa de codificación. La Figura 4.12 ilustra de forma esquemática el concepto:

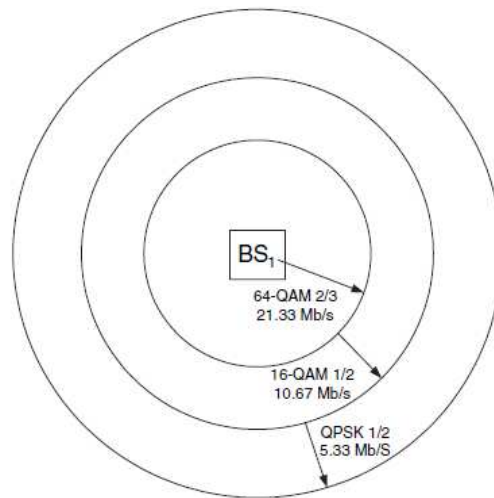


Figura 4.12. La calidad del enlace determina el nivel de modulación a usar

4.5.2 Dominio de la frecuencia

OFDM es una técnica que permite transmitir un determinado número de portadoras ortogonales entre sí en el mismo canal temporal. El número de portadoras (denominadas N) constituyen una señal OFDM en la que cada símbolo es transmitido en una de las N portadoras. Para WiMAX en la capa física OFDM, el estándar IEEE 802.16 establece que se usan 256 portadoras.

Sin embargo, no todas las portadoras llevan datos, existen cuatro tipos: 192 portadoras de datos útiles, 8 portadoras piloto (para estimación de canal y sincronización), 55 portadoras nulas (*Null*) que son bandas de guarda, y la portadora de DC (*Direct Current*) que esta colocada en la frecuencia central de RF de la estación transmisora, es nula y no modulada. En total se tienen 256 portadoras. La Figura 4.13 muestra un esquema de la clasificación anterior.

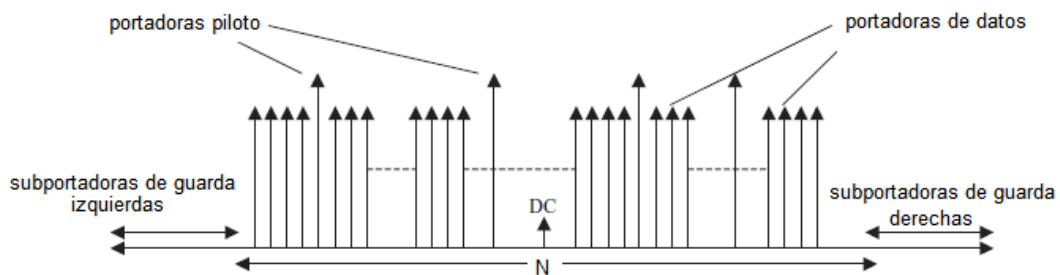


Figura 4.13. Tipos de subportadoras OFDM

4.5.3 Cadena de transmisión

El diagrama de bloques que ilustra el transmisor y receptor OFDM para WiMAX se ilustra en la Figura 4.14:

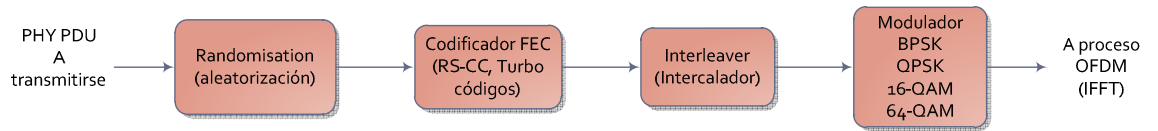


Figura 4.14. Cadena de transmisión OFDM

Los tres últimos procesos se han descrito con anterioridad, excepto el tema de modulación; para mayor información consúltese el Apéndice B. Modulación. El bloque denominado **Randomisation (aleatorización de datos)** introduce protección a la información evitando largas secuencias de ceros o unos consecutivos. Para ello busca uniformar la densidad de potencia transmitida generando secuencias de datos que tengan un balance de unos y ceros. Se lleva a cabo en cada secuencia de datos UL y DL; si la cadena no es suficientemente grande para ocupar el espacio, se rellena con unos (*padding*) al final del bloque de transmisión.

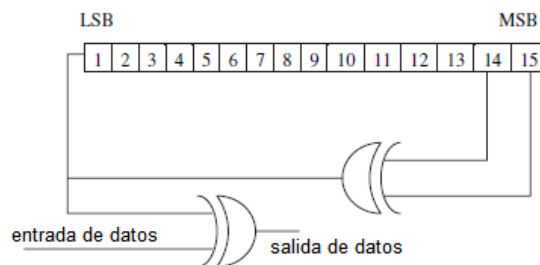


Figura 4.15 Generador de secuencias pseudoaleatorias para WiMAX OFDM

Códigos Reed-Solomon (RS) y Códigos convolucionales (CC)

En WiMAX el bloque denominado FEC (*Forward Error Correction*) está compuesto de dos tipos de codificadores, los códigos convolucionales CC de los cuales ya se hizo una descripción en el Capítulo anterior y los códigos **Reed-Solomon (RS)**. La Figura 4.12 ilustra el proceso en diagrama de bloques:

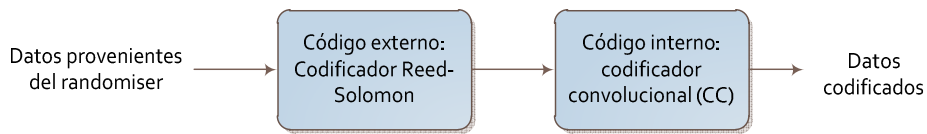


Figura 4.16. Codificador FEC para OFDM-PHY

Éstos últimos (RS) son códigos que permiten corregir errores mediante la adición de bits de redundancia a la secuencia digital. Se lleva a cabo mediante el sobremuestreo de un polinomio que ha sido construido a partir de la secuencia original, es decir, se evalúa el polinomio con una gran cantidad de valores, los cuales son almacenados. Al ser evaluado el polinomio en más valores de los necesarios, el receptor puede reconstruir el original en presencia de numerosos errores.

Los parámetros que especifican a un código RS son:

$$RS(N, K, T)$$

$$N = 2^t - 1 \quad (13)$$

Dónde

N= número total de bits codificados

K: bits de información

T= número máximo de bits que puede corregir

t=número de bits por símbolo

El código RS toma un número K de bits de la secuencia y agrega $N - K$ bits de redundancia a la información, por tanto la palabra codificada final será de tamaño N. El código RS puede corregir hasta un número de bits en error igual a:

$$T = \frac{N-K}{2} \quad (14)$$

Por ejemplo, el código RS (32,24,4) indica que por cada K= 24 bits de información, el codificador RS en la salida tiene N= 32 bits codificados, por tanto, los bits de redundancia agregados a la palabra son N-K= 8; y $T = 8/2=4$, es decir puede corregir hasta 4 bits en error.

Una vez que los datos codificados abandonan el bloque RS, entran al bloque de codificación convolucional, el cual también agrega bits de redundancia a la información entrante.

La siguiente tabla resume de forma puntual los tipos de modulación y codificación establecidos por el estándar 802.16-2004 para WiMAX.

Tabla 8. Parámetros de codificación WiMAX [2]

Modulación	Tamaño del bloque no codificado [bytes]	Tamaño del bloque codificado [bytes]	Tasa de codificación total	Código RS	Tasa de CC
BPSK	12	24	1/2	(12,12,0)	1/2
QPSK	24	48	1/2	(32,24,4)	2/3
QPSK	36	48	3/4	(40,36,2)	5/6
16-QAM	48	96	1/2	(64,48,8)	2/3
16-QAM	72	96	3/4	(80,72,4)	5/6
64-QAM	96	144	2/3	(108,96,6)	3/4
64-QAM	108	144	3/4	(120,108,6)	5/6

La tasa de codificación total es una tasa que permite calcular en un paso la cantidad de información a la salida de todo el codificador FEC, es decir, **ya incluye la codificación CC y la codificación RS.**

Por ejemplo, para la modulación QPSK con tasa de CC 5/6:

1. Haciendo el calculo considerando de forma separada las tasa de CC y la aplicación del código RS:

Dado que se usa un código RS (40,36,2), por cada 36 bits entrantes se obtienen 40 bits codificados mediante RS. Al entrar éstos en el CC, se le aplica la tasa de CC que es de 5/6:

$$datos\ codificados\ FEC = datosCC = datosRS * \frac{1}{tasa\ de\ CC} = 40 * \frac{6}{5} = 48 \quad (15)$$

2. Aplicando la tasa de codificación total, la cual otorga directamente el resultado total a la salida del codificador FEC (incluyendo RS y CC):

$$datos\ codif\ FEC = bloque\ no\ codificado * \frac{1}{OCR} = 36 * \frac{4}{3} = 48 \quad (16)$$

Obteniendo así el mismo resultado.

4.5.4 Técnicas de acceso múltiple

De acuerdo con el SF (*Service Flow*), parámetro que se describió en el capítulo anterior, serán las características de ancho de banda que la BS asigne a casa SS. El acceso múltiple permite a varios usuarios recibir servicios de la misma BS, y se lleva a cabo mediante ráfagas de bits dinámicas, en la cuales se indica la forma en la que los recursos se asignan en la red.

FDD (Frequency Division Duplexing)

En esta técnica los canales DL y UL están alojados en frecuencias diferentes. Se usa un *frame* de duración fija para las transmisiones en dichas direcciones; lo cual facilita el uso de diferentes esquemas de modulación; así como mantener una comunicación simultanea *full-dúplex* para los SS, es decir, que puedan escuchar continuamente el DL y transmitiendo y opcionalmente *Half-Duplex* cuando puede escuchar siempre que no esté transmitiendo.

TDD (Time Division Duplexing)

En este caso UL y DL están alojados en la misma frecuencia pero asignados en tiempos distintos. Un frame TDD tiene una duración fija y se divide en un número de slots físicos que ayudan a dividir de forma sencilla en ancho de banda. Estos slots tienen una duración de 4 símbolos modulados.

Para el presente trabajo, se hará énfasis en considerar el **modo TDD**, para el estándar IEEE802.16-2004 en la capa física OFDM PHY, conocida más comúnmente como WiMAX fijo. El *frame* TDD es adaptable en cuanto a que el ancho de banda destinado al UL y DL puede cambiar. Su estructura general se muestra en las figuras 4.17 y 4.18:

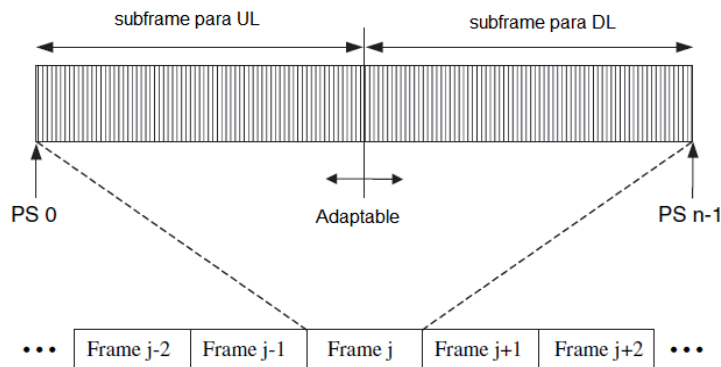


Figura 4.17. Frame TDD

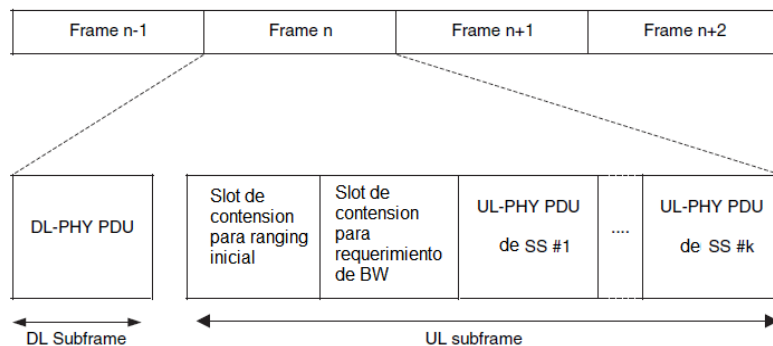


Figura 4.18. Estructura general de la trama TDD para OFDM PHY

4.5.4.1 Subframe Downlink en OFDM PHY

Consiste en una sola PHY PDU en la dirección *Downlink*, la cual puede ser compartida por varias SS. Inicia con un **preámbulo largo**, el cual utilizan las SS para sincronización. Es seguido por un campo denominado **Frame Control Header (FCH)**, el cual contiene el DLFP (*Down Link Frame Prefix*) que es un prefijo en el que se especifica el perfil de servicio y la longitud de al menos uno de los de las secuencias DL que lo suceden; tiene la duración de un símbolo OFDM y se codifica usando BPSK con CC ½.

Posteriormente están alojadas las **ráfagas o bursts de datos** provenientes de cada SS, los cuales se transmiten en orden decreciente de acuerdo a su robustez (tipo de modulación empujado) de acuerdo con sus perfiles de servicio. El primero de ellos puede contener adicionalmente a las MAC PDU provenientes de la capa MAC los **DL-MAP Y UL-MAP**.

Estos campos son indicadores que contiene la información acerca de cómo esta siendo usados los canales DL y UL respectivamente, es decir, de cómo se están asignando los recursos entre los SS.

También se transmiten inmediatamente después de estos indicadores los mensajes **DCD (Downlink Channel Descriptor)** y **UCD (Uplink Channel Descriptor)**. La Figura 4.19 muestra los campos para este frame:

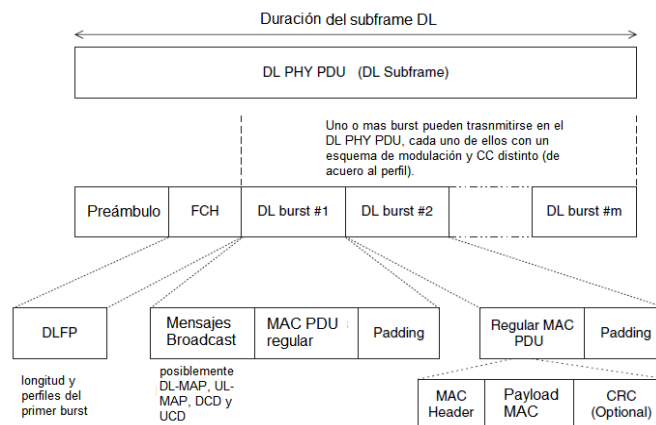


Figura 4.19. Estructura del subframe DL OFDM PHY

4.4.4.2 Subframe Uplink Para OFDM PHY

Contiene tres partes globales, las cuales se ilustran en la Figura 4.20 y se describen a continuación:

- **Slots de contención para el *ranging* inicial (IE):** la BS especifica un intervalo en cual nuevas estaciones pueden unirse a la red. Los paquetes en este intervalo usan el mensaje RNG-REQ o petición de *ranging*. En este intervalo pueden ocurrir colisiones.
- **Slots de contención para solicitud de BW:** intervalo en el cual se alojan las peticiones de ancho de banda para la BS.
- **Una o más PHY PDU's:** cada una de ellas transmitidas en ráfagas. Proviene de cada una de las estaciones SS con destino en la BS. De igual forma, cada una de ellas tiene un perfil definido, por tanto se transmiten usando diferentes modulaciones y esquemas de codificación dependiendo del que cada SS tenga asignado en un momento dado.

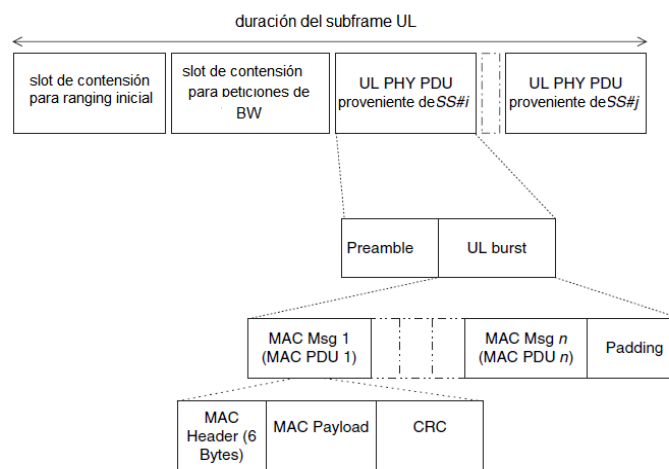


Figura 4.20. Estructura del subframe UL

4.6 CÁLCULO DE LA EFICIENCIA VOLUMÉTRICA

En esta sección se presentara un ejercicio que permite calcular la eficiencia volumétrica para una cierta cadena de datos que llega a una red WiMAX. Para ello es necesario tomar en cuenta a los protocolos de capas superiores como son TCP e IP, los cuales se describieron en el Capítulo 2; posteriormente

Problema: calcular la eficiencia volumétrica para un stream de datos originado en la capa de aplicación TCP, de longitud 3600 bytes que entrará a una red WiMAX. Tome en cuenta el modelo de referencia TCP/IP, considerando fragmentación en la capa de aplicación solamente y con MTU=1500 bytes. Usar modulación QPSK con CC 2/3.

Datos:

Payload TCP = 3600 bytes

MTU=1500 bytes

Calcular eficiencia volumétrica en capa de aplicación: Para la capa de aplicación se considerará el protocolo TCP para el procesamiento de los datos. Dado que la MTU =1500 bytes es menor que el tamaño del *stream* de datos en esta capa es necesario fragmentar dicho *stream* en paquetes más pequeños; a los cuales se les agregara el encabezado TCP.

Se sabe que: $Enc_{TCP} = 20 \text{ [bytes]}$

Por tanto:

$$num_{fragmentos} = \frac{payload_{TCP}}{MTU_{TCP}} = \frac{3600 \text{ bytes}}{1500 - 20 \text{ bytes}} = \frac{3600}{1480} = 2.4324 \quad (17)$$

Lo anterior nos dice que habrá dos fragmentos del tamaño de la MTU y un fragmento más pequeño:

Fragmento 1: bytes 0 a 1480 (datos) + 20 bytes (encabezado) = 1500 bytes (MTU_{TCP})

Fragmento 2: bytes 1481 a 2960 (datos) + 20 bytes (encabezado) = 1500 bytes (MTU_{TCP})

Fragmento 3: bytes 2961 a 3600 (datos) + 20 bytes (encabezado) = 660 bytes

Por tanto, se transmitirá a la capa IP un total de:

$$payload_{IP} = 1500 + 1500 + 660 = 3660 \text{ bytes} \quad (18)$$

La eficiencia volumétrica en TCP esta dada por:

$$EfVol_{TCP} = \frac{payload_{TCP}}{payload_{IP}} = \frac{3600 \text{ bytes}}{3660 \text{ bytes}} = 0.9836 \approx 98.4\% \quad (19)$$

Como se puede ver, la eficiencia volumétrica en TCP es muy alta, pues los 20 bytes que se agregan a una cadena de 1500 bytes son una parte proporcional muy pequeña.

1. Cálculo de eficiencia volumétrica en capa de red

Para la capa de red, se utilizara el protocolo IP.

De (2) sabemos que $Enc_{IP} = 20 \text{ [bytes]}$

Por tanto, para cada fragmento llegado de TCP, se agregara un encabezado IP para encapsularlo en la capa de red.

Fragmento 1 IP= 1520 bytes

Fragmento 2 IP= 1520 bytes

Fragmento 3 IP= 680 bytes

Por tanto, la cantidad de información total que se enviara a la capa MAC será:

$$\text{payload MAC} = 1520 + 1520 + 680 = 3720 \text{ bytes}$$

Y la eficiencia volumétrica para la capa de red IP será:

$$EfVol_{IP} = \frac{\text{payload TCP}}{\text{payload MAC}} = \frac{3600 \text{ bytes}}{3720 \text{ bytes}} = 0.9677 \approx 96.8\% \quad (21)$$

De igual forma que en el punto anterior, la eficiencia volumétrica sigue siendo muy alta. Es menor pues ya se han agregado más encabezados, lo cual lleva a un consumo mayor de los recursos respecto de los datos útiles.

Cálculo de eficiencia volumétrica en capa de acceso al medio MAC

WiMAX, como se analizó en este Capítulo, agrega a la información un encabezado y una suma de verificación al final de los datos útiles; el encabezado (6 bytes) y la suma de verificación (4 bytes):

$$\text{adicional}_{MAC} = 10 \text{ [bytes]}$$

De igual forma que en los pasos anteriores, a cada uno de los fragmentos previos se les agregaran 10 bytes de información adicional:

Fragmento 1 IP= 1520 bytes + 10 bytes= 1530 bytes

Fragmento 2 IP= 1520 bytes + 10 bytes= 1530 bytes

Fragmento 3 IP= 680 bytes + 10 bytes= 690 bytes

Por tanto, la cantidad de información total que se enviara a la capa física PHY será:

$$\text{payload MAC} = 1530 + 1530 + 690 = 3750 \text{ bytes}$$

Y la eficiencia volumétrica para la capa de MAC será:

$$EfVol_{MAC} = \frac{\text{payload TCP}}{\text{payload MAC}} = \frac{3600 \text{ bytes}}{3750 \text{ bytes}} = 0.96 \approx 96\% \quad (22)$$

De igual forma que en el punto anterior, la eficiencia volumétrica sigue siendo muy alta, pues los datos de *Overhead* no son comparables al tamaño de la cadena de datos, por tanto, dicha información no le afecta de forma directa al desempeño del sistema.

Veamos que sucede ahora en la capa física.

2. Cálculo de eficiencia volumétrica en capa física PHY

Como se mencionó el presente Capítulo, la capa física de WiMAX presenta dos tipos de codificación, las cuales agregan la información de redundancia a la cadena original para permitir la corrección de errores.

Para **QPSK CC 2/3** y de acuerdo con los datos proporcionados por la Tabla 8, se usa un código RS (32,24,4). Dado que por cada 24 bits de la cadena que llega a la capa PHY (no codificados), a la salida del bloque RS se obtiene 32 bits, que son la información codificada.

El *payload* para la capa PHY es de 3750 bytes, por tanto, al pasar primero por el codificador RS, se obtiene:

$$bloques_{24bytes} = \frac{payload\ PHY}{24\ bytes} = \frac{3750\ bytes}{24\ bytes} = 156.25 \approx 157 \quad (23)$$

Es decir, se obtienen 157 bloques de 24 bytes provenientes de la cadena *payload* PHY. Como por cada uno de esos grupos de 24 bytes a la salida del codificador RS se obtengan 32, el total de bytes a la salida del codificador RS es:

$$bytes\ RS = 157 * 32\ bytes = 5024\ bytes \quad (24)$$

Posterior al codificador RS, la información pasa al codificador convolucional, el cuál tiene una tasa de codificación 2/3; lo que significa que por cada 2 bytes de información a la entrada del codificador, se obtendrán 3 bytes a la salida.

Por tanto:

$$bytes\ CC = bytes\ RS * \frac{1}{tasa\ CC} = 5024\ bytes * \frac{3}{2} = 7\ 536\ bytes$$

Por tanto los bytes en la capa física que se enviarán a través del medio físico son:

$$bytes\ PHY = 7\ 536\ bytes$$

Este mismo cálculo como se vio, anteriormente, se puede realizar usando la tasa total de codificación.

Finalmente, la eficiencia volumétrica para la capa física es:

$$EfVol_{PHY} = \frac{payload\ TCP}{bytes\ PHY} = \frac{3600\ bytes}{7536\ bytes} = 0.4778 \approx 47.8\% \quad (25)$$

Se observa que para la capa PHY la eficiencia volumétrica disminuye de forma drástica, lo cual se debe a que se está usando un perfil de servicio poco eficiente, es decir, una tasa de

codificación relativamente (2/3) y el código RS también agrega gran cantidad de información adicional.

Usando tasas de codificación más altas como 5/6 la eficiencia volumétrica también disminuye pues aun se le esta agregando gran cantidad de información adicional a la información original, sin embargo, lo hace de forma menos drástica.

4.7 CONCLUSIONES

La tecnología WiMAX es una tecnología de banda ancha inalámbrica que ofrece características atractivas, lo cual podría resultar útil en múltiples aplicaciones como los servicios de datos a gran escala y por su factibilidad de ofrecer QoS, para aplicaciones multimedia complejas como voz y video, además de que reduciría costos frente a redes cableadas.

La capa MAC para WiMAX es la capa más importante para esta tecnología, pues es a través de ella que se llevan a cabo la definición de los *Service Flow (SF)*, los cuales permiten la aplicación de QoS que es una de las ventajas más claras que ofrece dicha tecnología. Así mismo, esta capa agrega carga adicional a las *MSDU's* provenientes de capas superiores. Tomando en cuenta solamente las tramas MAC genéricas (datos), contando encabezado y *CRC*, la cantidad de información adicional es:

$$\mathbf{adicional}_{MAC} = 10 \text{ [bytes]}$$

Los datos proporcionados por la tabla 8 se usaran como base en los cálculos a realizarse para comportar la eficiencia volumétrica. La cantidad de información adicional depende del perfil del servicio a usar, ya que intervienen la tasa de codificación convolucional a usar y el código RS; para ello se utilizará la tasa total de codificación.

$$\begin{aligned} & \text{bits codificados}_{PHY WiMax} \\ &= \text{ceiling} \left[\frac{\text{tamañoPSDU}}{\text{bits no codificados}} \right] * \frac{1}{\text{tasa total de codificacion}} \quad (26) \end{aligned}$$

La función *ceiling* representa una función matemática que redondea el resultado de la división al entero inmediato superior, lo cual permitiría hacer un cómputo de los símbolos no codificados ya contando bits de *padding*.

Capítulo 5.

Comparativo WiFi vs WiMAX

5.1 INTRODUCCIÓN

En los capítulos anteriores (3 y 4) se hizo una descripción detallada de algunos aspectos de los estándares 802.11 y 802.16 respectivamente; los cuales han servido como una base para la implementación de tecnologías de redes inalámbricas denominadas comercialmente WiFi y WiMAX.

El presente Capítulo tiene como objetivo presentar una comparación de ambas tecnologías vistas desde diferentes perspectivas, como son tipos de modulación, técnicas de acceso al medio y el mercado que pretenden cubrir, así como brindar una visión general de la situación actual de dichas tecnologías.

5.2 NICHOS DE MERCADO WiMAX Y WiFi

WiFi es una tecnología que está muy bien instalada como medio de acceso a los **servicio de Internet en el punto final de la red.**

Algunos de sus servicios son:

- **Wireless ISP:** consiste en vender el servicio de acceso a Internet usando el concepto de WLAN y su tecnologías y elementos, sin embargo, proporcional la conectividad fuera de casa mediante AP's públicos llamados *Hot spots*.
- **Redes Mesh en pequeñas ciudades:** dar movilidad a una terminal mediante una red de AP's los cuales se intercambian los mensajes de una terminal entre ellos (*handover*), de tal forma que se mantenga la conectividad de la terminal móvil.
- Agregar las redes adhoc, e indicar la diferencia con las redes *Mesh*

WiMAX no ha tenido una penetración decisiva en el mercado debido a que, contrariamente a WiFi, no pretende llegar a los usuarios finales como primer paso; más bien **se centra en llegar a los carriers (operadores)** del servicio quienes a su vez lo proporcionarán a los usuarios finales.

Por tanto, se han planteado 3 etapas de desarrollo para WiMAX:

- **Fase 1: Acceso fijo para las líneas privadas de servicio o hot spot Backhaul (Point to point):** tasa de transmisión de 100 Mbps usando antenas exteriores. Los proveedores encontrarán aquí un nicho de mercado en dichos sistemas punto a punto, sobre todo en áreas donde el acceso al servicio telefónico (ADSL) es difícil de obtener.
- **Fase 2 BWA o Wireless DSL:** significa competir de forma directa con tecnologías como WiFi, sin embargo, esta decisión es riesgosa, pues WiMAX es una tecnología que ha llegado tarde al mercado.
- **WiMAX móvil:** es la gran ventaja de WiMAX sobre tecnologías como WiFi y DSL o cable modem.

5.3 ENLACES DE RADIO

5.3.1 Frecuencias de operación

En cuanto a los radioenlaces que implementan dichas tecnologías, la diferencia radica en que mientras **WiFi** opera únicamente en **bandas no licenciadas (2.5 y 5 GHz)** definidos en cuatro distintos enlaces, **WiMAX** lo hace **en bandas tanto licenciadas como no licenciadas** lo que le confiere un mayor rango de posibilidades de implementación.

Como se mencionó en el capítulo 4, en el estándar 802.16a definía la operación de las redes **WiMAX en frecuencias entre 2 y 11 GHz**, con las cuales se podían implementar redes NLOS; entre las bandas más atractivas para instalar sistemas están:

- **Banda de 2.5 GHz (MMDS) Licenciada:** en EU se han asignado 200 MHz de espectro licenciado entre los 2.5 y 2.7 GHz.
- **Banda de 3.5 GHz Licenciada:** parte del espectro asignada similar a la de 2.5 GHz, en el rango 3.5 a 3.7 GHz y es válida alrededor del mundo.
- **Banda de 3.5 GHz no licenciada:** la FCC ha abierto en EU una banda adicional de 50 MHz en el rango e 3.65 a 3.70 GHz para servicios inalámbricos fijos.
- **Banda de 5 GHz no licenciada:** 555 MHz alojados en las bandas 5.150-5.350 GHz y 5.470-5.825 GHz.

En México, la distribución de frecuencias destinada para hacer pruebas con tecnologías de nueva generación WiMAX es la que se muestra a continuación:

Banda De Frecuencias De 3400-3600 MHz Acceso Inalámbrico

Bloque	Banda de frec's (MHz)	Empresas Concesionadas	Observación
A/E	3400 - 3425 / 3500-3525	MIDICELL (Nacional) No cubrió el pago	Rescatada por SCT
B/F	3425-3450 / 3525-3550	AXTEL (Nacional)	Acceso para servicio de telefonía local e Internet Pruebas con tecnología WiMAX
C/G	3450-3475 / 3550-3575	TELMEX (Nacional)	
D/H	3475-3500 / 3575-3600	SPC (TELECOSMOS) (Nacional) Cesión de derechos otorgado a Nextel	Acceso a internet de banda ancha

5.3.2 Parámetros del canal físico

Para **WiFi** se ha definido un ancho de banda del **canal de fijo** en 25 MHz para las versiones 802.11b y **20 MHz para las versiones 802.11a/g**. **WiMAX** presentan anchos de banda de canal ajustables, usando TDD por ejemplo, es posible hacer que el canal *Downlink* sea más grande que el *Uplink*, dependiendo de las necesidades de la red. Son ajustables desde **1.25 MHz a 20 MHz**, lo cual representa una gran ventaja para los operadores en bandas licenciadas pues el espectro es un recurso muy costoso en términos monetarios. En el caso del presente trabajo se hará uso de una canal de 7 [MHz].

5.4 MÉTODOS DE TRANSMISIÓN DE INFORMACIÓN

WiMAX incorpora técnicas de acceso múltiple como son **TDD y FDD**, lo cual permite que la tecnología sea **full-dúplex** a diferencia de WiFi que es *Half-dúplex*.

WiFi utiliza el método conocido como CSMA/CA debido a que el mismo canal es usado tanto por el suscriptor como por el AP lo que ocasiona que el medio esta expuesto, haciendo de éste sistema un sistema **Half-dúplex**. Dicho mecanismo le permite escuchar el canal antes de transmitir para verificar que esté libre y hasta que esta condición se presenta puede trasmitir. Esta característica se ha mantenido en WiFi debido a que hace más accesibles los precios de los radios.

5.4.1 Modulación

WiFi IEEE 802.11a/g: usan un sistema basado en OFDM para ofrecer ancho de banda teórico de hasta 54 Mbps. Se usan 64 frecuencias portadoras ortogonales usando modulaciones como BPSK, QPSK, 16-QAM Y 64-QAM. La versión g opera en la frecuencia de 2.4 GHz. **WiMAX** utiliza distintos tipos de modulación y técnicas de acceso al medio, al igual que WiFi, usa OFDM, y para adicionar movilidad OFDMA. Entre ellas, *Single Carrier*, OFDM (256 portadoras) y OFDMA (2048) portadoras.

5.4.2 Forward Error Correction (FEC)

WiFi incluye el bloque FEC para las variantes 802.11a/g, la variante 802.11b no lo incluye. El tipo de FEC aplicado a estos dos estándares es el bloque de codificación convolucional. **WiMAX por su parte, incluye tanto codificación convolucional como códigos Reed-Solomon**, los cuales agregan mayor robustez al sistema. Los códigos *Reed-Solomon*, son códigos cíclicos que permiten corregir múltiples errores aleatorios.

5.5 PARÁMETROS DE EFICIENCIA

5.5.1 Eficiencia espectral: WiFi vs WiMAX

La eficiencia espectral es una medida que determina el grado de aprovechamiento que tiene una determinada banda de frecuencias usada para transmitir datos en tasas de bits por segundo, se mide en unidades de bps/Hz. Para **WiFi**, las versiones a y g cuya tasa de transmisión varían de los 6 a los 54 Mbps derivan una eficiencia espectral del **0.24 a 2.7 bps/Hz**. Para **WiMAX**, esta eficiencia tiene que ver con los esquemas de modelación y codificación aplicadas, dando como resultado una eficiencia espectral de hasta **5 bps/Hz** (100 Mbps en un canal de 20 MHz). Dado que la distancia afecta dicha eficiencia, un valor más realista medido en la práctica es de **3.5 bps/Hz** resultado de una tasa de 70 Mbps y un canal de 20 MHz (el más alto valor)

5.6 CONCLUSIONES

En el presente Capítulo se plantearon una serie de comparaciones entre las tecnologías WIMAX y WiFi, la siguiente tabla resume de forma puntual las características de cada una de ellas, con la cual se puede hacer una comparación más precisa de las características técnicas que poseen y contrastar sus semejanzas y diferencias de forma rápida:

Categoría	WiMAX IEEE 802.16-2005	WiFi IEEE 802.11g
Aplicación / nicho de mercado	Redes inalámbricas de área local WLAN	Acceso inalámbrico de banda ancha. <i>Backhauling</i>
Bandas de frecuencia	Licenciadas y no licenciadas de 2-11 GHz	No licenciadas: 2.4 GHz ISM (g)
Ancho de banda de canal	Ajustable de 1.25 MHz a 20 MHz	20 MHz
Half/Full Dúplex	<i>Full duplex (subframes DL y UL)</i>	<i>Half duplex (single carrier)</i>
Tecnología de radio (acceso al medio)	OFDM 256 portadoras	OFDM 64 portadoras
Modulación adaptable	Si BPSK, QPSK, 16-QAM y 64-QAM	Si BPSK, QPSK, 16-QAM y 64-QAM
FEC	Códigos convolucionales CC 1/2,3/4,2/3 Códigos Reed- Solomon 1/2 ,3/4,2/3	Códigos convolucionales CC 1/2,3/4,2/3
Protocolos de acceso al canal	<i>Request/grant TDMA</i> <i>Best Effort</i>	CSMA/CA
Movilidad	Solo con la mejor a 802.16e	En desarrollo para 802.11n
QoS	<i>Request/grant</i> <i>Unsolicited Grant-Real time</i> <i>Real Time Polling</i> <i>Variable Bit Rate Non Real Time</i> <i>Variable Bit Rate Best Effort</i>	DCF en versiones 802.11g WME, WSM, en desarrollo
Potencias de transmisión	1 [W]=30 [dBm]	Nominal de 30 [mW]=15 [dB]
Eficiencia espectral	0.24 a 2.7 bps/Hz	3.5 bps/Hz
Cobertura	Hasta 10 Km	Hasta 150 m
Tipos de antenas	Omnidireccionales, sectoriales y paneles punto a punto Guanacias hasta de 18 dBi	Omnidireccionales (<i>hotspot</i>) Bidireccionales Direccionales
Equipos de radio	CPE: <i>indoor/outdoor</i> para BS y el equipo suscriptor BS: equipo de radio centralizado de la red.	CPE: adaptadores inalámbricos como USB o PCI. AP: elemento centralizado de la red
Modelos de propagación	Modelos dependientes de distancia	Modelo dependiente de distancia

Capítulo 6.

Comparación y Análisis de la eficiencia volumétrica en redes WiFi y WiMAX

6.1 INTRODUCCIÓN

En este Capítulo se presenta el análisis de los resultados obtenidos para el estudio de la eficiencia volumétrica para una red WiFi y WiMAX.

Dichos resultados se obtuvieron mediante un programa implementado en el software de Matlab v. R2010a, en el cual se obtuvieron las gráficas tanto de la eficiencia volumétrica por protocolo, conjunta y comparativa entre ambos estándares. Se presentan la gráficas y se lleva a cabo un análisis de dichos resultados

Por último se presenta una aplicación de la eficiencia volumétrica, al realizar un cálculo teórico de la tasa de transmisión de datos o "*throughput*" para un enlace WiFi y WiMAX. Se describe en detalle el cálculo que se realiza en ambos casos y posteriormente se aplican los resultados previamente obtenidos de la eficiencia volumétrica para obtener un resultado final en cuanto a la verdadera tasa de transmisión de datos.

6.2 CONCEPTO DE EFICIENCIA VOLUMÉTRICA

La **eficiencia volumétrica** es un concepto que se sustenta en el manejo y tratamiento que se le da a la información al pasar a través de la red. Toda carga útil de datos es sometida a un determinado proceso en los equipos por los que atraviesa dependiendo de las funciones que estos implementen.

Para que la información pueda ser llevada desde la capa de aplicación, que es en la que el usuario tiene contacto directo con las aplicaciones e interfaces que le permiten acceder a ella y manejarla, hasta el medio físico que la transportara; la información pasa por varios procesos de encapsulamiento. Se agrega nueva información a los datos útiles de forma que estos puedan ser interpretados de forma correcta en el siguiente destino de la red; son generalmente banderas de control, temporizadores, números de identificación, entre otros.

Dicha información adicional genera carga adicional en la red, pues esta también debe ser procesada y transportada de la misma forma que los datos útiles, por tanto, consume recursos valiosos de la red, principalmente el ancho de banda, con lo cual también puede generar retrasos y pérdidas en la red.

La eficiencia volumétrica es un **indicador del aprovechamiento de los recursos de la red para la transmisión de datos, así como de la capacidad real que el canal tiene para el envío de la información de usuario**. Dicha capacidad real se ve modificada por factores como la información adicional agregada llamada *overhead*; la cual depende directamente de factores como el protocolo de encapsulamiento que se esté usando, las tasas de codificación y los códigos implementados (perfiles de servicios), fragmentación, el tamaño de la cadena de datos útiles, entre otras

Definición:

La **eficiencia volumétrica** es una medida del desempeño de la red pues es un parámetro que indica la capacidad real del canal para el transporte de datos; a través de la relación entre la información adicional agregada y la carga de datos útiles del usuario en una cierta red, en la cual se implementa una determinada pila de protocolos.

Una ecuación que puede representar de forma puntual el cálculo de la eficiencia volumétrica para una determinada capa y con un protocolo M. Los datos útiles son aquellos que no han sido procesados aun por el protocolo correspondiente:

$$EfVol = \frac{\text{datos utiles}}{\text{datos utiles} X + \sum_{i=N}^X \text{adicional}_i} \quad (27)$$

Dónde:

X = protocolo de la capa más alta de la pila de protocolos a analizar.

N = protocolo usado en una cierta capa (actual).

adicional_i = datos adicionales agregados por el protocolo i.

i= índice que referencia los protocolos usados.

Ejemplo:

Si se trabaja con la pila de protocolos TCP/IP y el estándar IEEE 802.11g, de acuerdo con el Capítulo 3 la pila de protocolos será:

Capa del modelo TCP/IP	Protocolo a usar
Capa de aplicación	TCP
Capa de red	IP
Capa de acceso al medio MAC	802.11 g: PLCP, PMD
Capa física	distintas modulaciones y CC

Si se desea obtener la eficiencia volumétrica para la capa de red, representada por el protocolo IP:

$$\begin{aligned}
 EfVol_{IP} &= \frac{\text{datos utiles TCP}}{\text{datos utiles TCP} + \sum_{i=IP}^{TCP} \text{adicional}_i} \\
 &= \frac{\text{datos utiles TCP}}{\text{datos utiles TCP} + (\text{adicional}_{IP} + \text{adicional}_{TCP})} \quad (27)
 \end{aligned}$$

De esta forma se obtiene la eficiencia volumétrica para el protocolo IP, como sólo hay un protocolo de capa superior para la pila de protocolos que se está usando, la suma de carga de datos adicionales considera los datos adicionales del protocolo actual (IP) y de los de capas superiores, en este caso TCP.

6.3 CONSIDERACIONES GENERALES

Para llevar a cabo el estudio de la eficiencia volumétrica en el presente trabajo, es necesario establecer las condiciones generales bajo las que éste se llevó a cabo.

- En cuanto a la pila de protocolos usada, para la capa de aplicación, se tomo en cuenta al protocolo TCP, para la capa de red a IP y en la capa de enlace de datos, más específicamente la capa MAC y en la capa PHY se tomaron en cuenta los que se especifican en los entandares [1] y [2].
- Para el estándar IEEE 802.11 se tomaron en cuenta el **formato de trama** que se establece para la capa MAC y en capa PHY el formato de trama PLCP, así como la codificación propuesta en el estándar [1].
- Para el estándar IEEE 802.16 en la capa MAC se tomo en cuenta el formato de trama de la subcapa MAC común y para la capa física, la codificación propuesta en el estándar [2].
- Únicamente se consideraron tramas de datos para ambos estándares, pues el objetivo principal consiste en el estudio de la eficiencia volumétrica para los datos del usuario.
- Se considera fragmentación de datos únicamente en el protocolo TCP, estableciendo para tal efecto una **MTU= 1500 [bytes]** debido a que es el valor estándar que se ha tomado en cuenta en muchas redes de datos por ser el valor manejado por Ethernet.
- Para llevar a cabo es estudio, se consideró como carga útil o *payload* un rango que abarca desde **los 64 a los 10 000 [bytes]**, tomando para graficar muestras cada 64 [bytes]; siendo esta la variable independiente utilizada en el modelado de la eficiencia volumétrica.
- Para el cálculo de las tasa de transmisión se consideró un ambiente ideal, en el que ésta no se ve afectada por fenómenos como las colisiones; así mismo, no se considera la posibilidad de la retransmisión de datos en caso de errores.

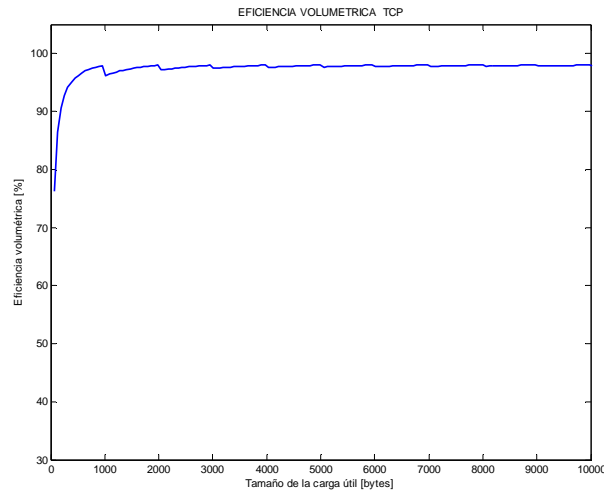
6.4 RESULTADOS

Se presentaran a continuación las gráficas obtenidas para el análisis de eficiencia volumétrica. Se plantea el análisis de las mismas subdividiéndoles en categorías, primero se plantea el análisis de algunos aspectos generales de la eficiencia volumétrica. Posteriormente se presentan los resultados enfocados a los protocolos TCP e IP que son comunes a ambos estándares.

Siguiendo el punto anterior se presentan los resultados para el estándar IEEE 802.11 en cuanto a la capa MAC y PHY haciendo un comparativo entre perfiles al final. En la sección siguiente se efectúa un estudio análogo para el estándar IEEE 802.16. Finalmente se plantea la comparación de ambos estándares en las capas PHY y MAC obteniéndose conclusiones previas.

6.4.1 Eficiencia volumétrica

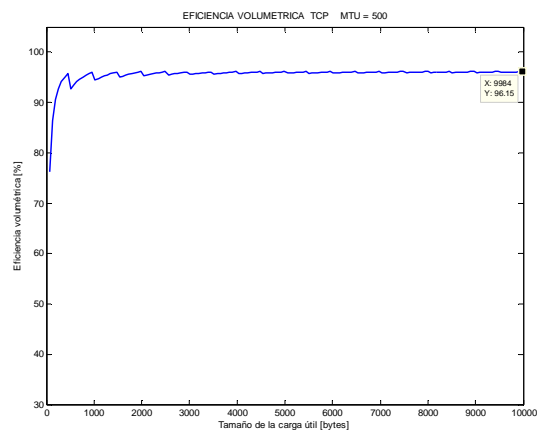
A continuación se muestra la gráfica de eficiencia volumétrica para el protocolo TCP. Se usa una fragmentación considerando una MTU = 1000 bytes. En la gráfica siguiente es posible ver que la eficiencia volumétrica es muy cercana al 100%, pues el protocolo TCP solo agrega una información adicional de 20 bytes a la cadena de datos de usuario de acuerdo con la ecuación (1).



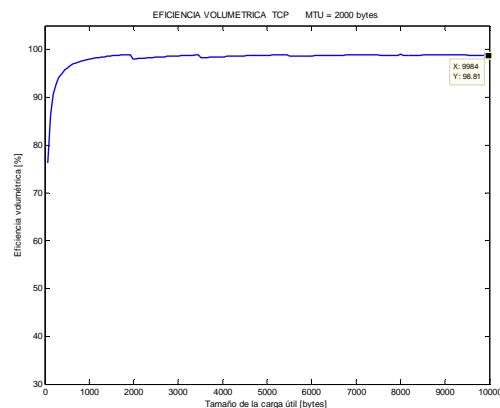
La gráfica presenta un comportamiento creciente, es decir, la eficiencia volumétrica comienza a aumentar gradualmente y después se estabiliza en un tipo de asíntota tendiendo al 100%. Esto se debe a que, para cadenas de datos cortas que son comparables con la longitud de la información adicional, ésta si representa un aumento significativo, afectando directamente a la eficiencia volumétrica. En cambio, para cadenas de datos más largas en las que 20 bytes no son tan significativos se presenta un aumento de la eficiencia volumétrica.

Otro aspecto fundamental que se observa en la gráfica es que presenta una serie de picos o discontinuidades. Esas discontinuidades se deben a la **fragmentación** de los datos que el protocolo TCP está llevando a cabo. En este caso se usa una fragmentación con MTU=1000 bytes, es posible ver que dichos picos están localizados en los valores en los que la cadena de datos alcanza algún múltiplo de esa cantidad.

La eficiencia volumétrica disminuye al fragmentar. Esto es debido a que cada uno de los fragmentos de un paquete debe tener encabezado TCP, entonces la información adicional para esa cadena de datos aumenta dependiendo del número de fragmentos que la integren. Con mayor información adicional, la eficiencia volumétrica disminuye. Lo anterior se comprueba fácilmente comparando las siguientes gráficas, la primera tiene una MTU de 500 bytes, la segunda de 2000 bytes:



Para esta gráfica, los picos son muchos pues la MTU es pequeña y la fragmentación ocurre con más frecuencia. El máximo valor obtenido para la eficiencia volumétrica es 96.15 %. En la siguiente grafica, la MTU es más grande, por lo que los picos son pocos y muy espaciados. El valor de la eficiencia volumétrica máximo en este caso es de 99%.



De lo anterior se pueden deducir dos observaciones importantes:

1. **La eficiencia volumétrica es directamente proporcional al tamaño de la cadena de datos útiles.** Cuando la cadena de datos es corta la eficiencia es baja, si es larga, la eficiencia aumenta.
2. **La eficiencia volumétrica también es proporcional al valor de la MTU.** Entre mayor sea la MTU usada para fragmentar, menos veces se fragmentaran las cadenas largas, y por tanto la información adicional para cada una de ellas disminuye, lo cual se traduce en un aumento de dicha eficiencia.

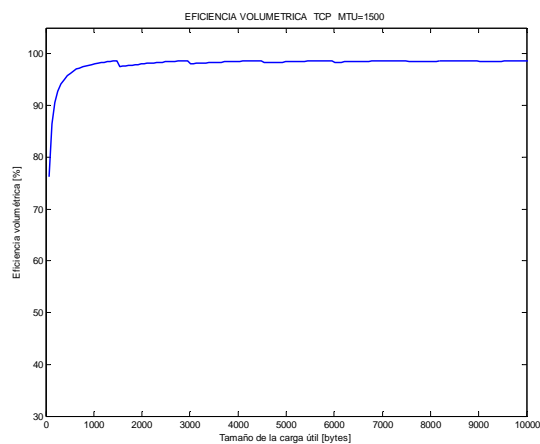
Actualmente, por comodidad se usa una MTU = 1500 bytes, ya que es la MTU para Ethernet. Se utilizará este valor de MTU para la obtención de todos los resultados posteriores.

6.4.2 Eficiencia volumétrica en el estándar IEEE 802.11

En esta sección se mostraran los resultados en los cálculos para el estándar IEEE 802.11g; en principio se expondrán las gráficas para la eficiencia volumétrica en forma progresiva, es decir, del la capa más alta de la pila de protocolos (TCP) hasta la más baja y algunas variantes de la capa PHY de acuerdo con las diversas tasa de trasmisión que soporta.

- **Eficiencia volumétrica para TCP**

Como se observó en la sección anterior, la eficiencia volumétrica en TCP es muy cercana al 100% debido a que la cantidad de datos adicionales que aporta es relativamente pequeña. Para una MTU=1500 bytes, el resultado obtenido es:

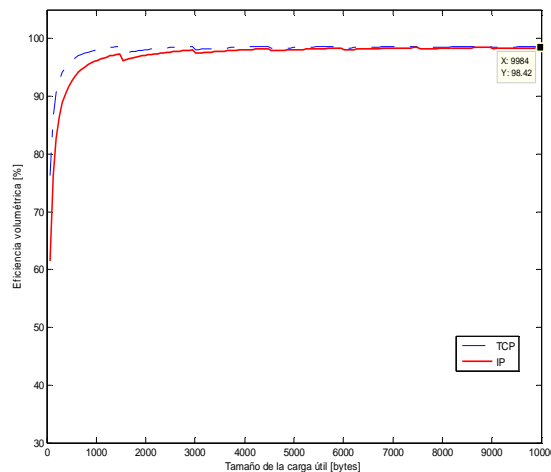


La mayor caída en la eficiencia volumétrica se presenta en la primera fragmentación, esto es debido a que coincide con las cadenas de datos útiles más cortas; en lo sucesivo éste factor ya no es tan importante, por lo que las caídas son menos pronunciadas.

- **Eficiencia Volumétrica en IP**

La siguiente figura muestra la grafica de las eficiencias volumétricas IP y TCP (en línea discontinua). Se observa que son graficas gemelas en su forma, pues como ya se comento, la información que se encapsulo dentro del protocolo TCP se convierte ahora en la carga útil (*payload*) para el protocolo IP. Por tanto, la fragmentación tiene el mismo efecto que en TCP.

La diferencia significativa entre ambas curvas es el hecho de que la eficiencia volumétrica disminuye debido a que una vez que se re-encapsula el *payload* proveniente de TCP, en IP se agregan 20 bytes adicionales de información (Ec. 2). Para este caso, la máxima eficiencia que se obtiene es de 98.42%, aunque al igual que en el caso de TCP, es una curva asintótica al 100%.

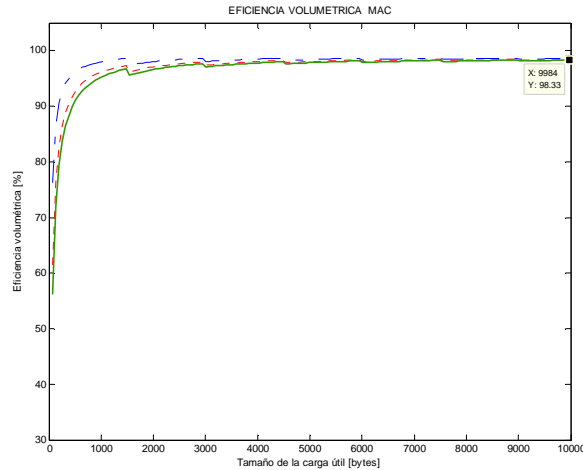


- **Eficiencia Volumétrica en capa MAC**

La figura siguiente resalta la eficiencia volumétrica para la capa MAC, en la cual se agrega información propiamente dicha del estándar IEEE 802.11. Esta capa es muy importante para el estándar, pues define la técnica de acceso al medio, las técnicas de contención y manejo de colisiones, así como direccionamiento físico (direcciones MAC).

Una vez más, debido a que se está agregando una cantidad fija de información a la MSDU (*payload* proveniente de IP) para adecuarla a MPDU; la eficiencia volumétrica también tendrá un comportamiento muy similar al que hemos visto para los dos protocolos anteriores, tomando en cuenta que la eficiencia disminuye en una proporción

ligeramente mayor, pues se están agregando en éste caso 34 bytes de acuerdo con la ecuación (3).



• **Eficiencia volumétrica WiFi PHY**

La capa física WiMAX es la que marca un fuerte cambio en la eficiencia volumétrica. Esto se debe a que se han definido distintas tasas de transmisión para el estándar, y cada una de estas es asociada a un tipo diferente de modulación y codificación convolucional.

De acuerdo con la tasa de transmisión que se esté usando, la Tabla 4 establece ciertos parámetros que permiten hacer el cálculo de los bits que se tendrán a la salida del codificador; existen 8 diferentes categorías, cada una con una diferente modulación, y tasa de CC y que hace un mapeo entre los bits de datos a la entrada (N_{DBPS}) y los bits que saldrán del codificador una vez que la información haya sido codificada (N_{CBPS}).

Tabla 4. Parámetros dependientes del campo Rate (tasa de datos) [1]

Perfil No.	Tasa de datos [Mbps]	Modulación	Tasa de codificación (R)	Bits codificados por subportadora (N_{BPCS})	Bits codificados por símbolo OFDM (N_{CBPS})	Bits de datos por símbolo OFDM (N_{DBPS})
1	6	BPSK	1/2	1	48	24
2	9	BPSK	3/4	1	48	36
3	12	QPSK	1/2	2	96	48
4	18	QPSK	3/4	2	96	72
5	24	16-QAM	1/2	4	192	96
6	36	16-QAM	3/4	4	192	144
7	48	64-QAM	2/3	6	288	192
8	54	64-QAM	3/4	6	288	216

Los datos de la tabla se obtienen de la siguiente forma:

Cada símbolo OFDM dura $4\mu\text{s}$, para WiFi se manejan 52 portadoras por canal (el cual tiene un ancho de 20[MHz]) de las cuales solo 48 son de datos¹⁶. Tomando como ejemplo el perfil número 8, al usar modulación 64-QAM, cada subcanal o portadora de datos llevará 6 bits. Por tanto:

$$\#bits \text{ por símbolo} = 6 [\text{bits}] \cdot 48 \text{ portadoras} = 288 [\text{bits}] = N_{CBPS}$$

Que es el número de bits de datos codificados por símbolo OFDM.

Y para obtener los bits no codificados (de datos) por símbolo se toma la tasa de codificación CC denominada R:

$$N_{DBPS} = N_{CBPS} \cdot R = 288[\text{bits}] \cdot \frac{3}{4} = 216[\text{bits}]$$

Por último; dividiendo el resultado anterior entre la duración del símbolo OFDM.

$$R_{\text{datos}} = \frac{216 [\text{bits}]}{4[\mu\text{s}]} = 54 [\text{Mbps}] \quad (28)$$

La tasa de datos anterior únicamente refleja la tasa máxima de transmisión que se puede tener en cada uno de los canales de 20 MHz, sin considerar aun los tiempos empleados en la transmisión de mensajes de control y señalización; tampoco se han considerado los datos de *overhead* (encabezados, verificación, datos de control) los cuales como se mostrará a continuación tiene un impacto fuerte en la cantidad de datos útiles a transportar.

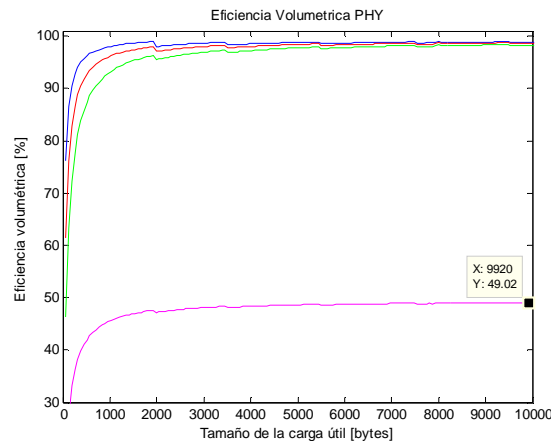
Los resultados para el cálculo de la eficiencia volumétrica para WiFi fueron los siguientes:

- **Capa PHY con tasa de datos 6 Mbps, BPSK con CC=1/2 (1) tasa de datos 12 Mbps, QPSK con CC=1/2 (3)**

Para este perfil de servicio es posible observar que la eficiencia volumétrica en la capa física disminuye de forma muy abrupta y se notan una serie de picos pequeños a lo largo de la curva. Los picos son producidos al tomar grupos de bits del tamaño N_{DBPS} de la información original para realizar el cálculo de la información total a la salida del codificador como N_{CBPS} . Tal cantidad de información adicional se refleja en la eficiencia volumétrica pues ésta disminuye a cerca de la mitad, queda finalmente en 49.08%.

Para el perfil 3 la máxima eficiencia para dicha grafica es de 48.93%. La eficiencia disminuye ligeramente respecto al caso 1, pues la fragmentación de bytes se hace en bloques de 48 bits, y no de 24.

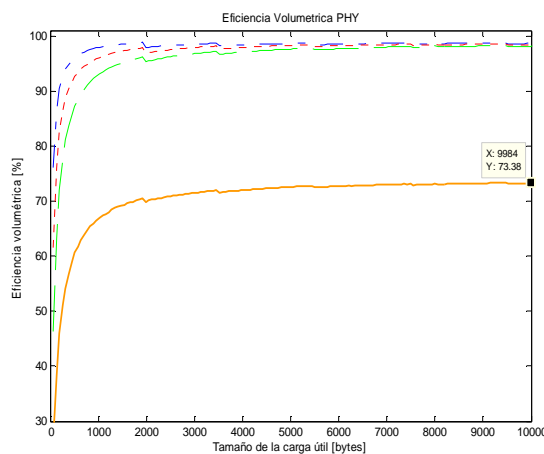
¹⁶ Se profundizara en dichos cálculos más adelante en este Capítulo.



- **Capa PHY con tasa de datos 9 Mbps, BPSK con CC=3/4 (2)**

Para el segundo caso definido por el estándar, la eficiencia volumétrica aumenta respecto de lo registrado para el caso 1. Esto se debe a que, a pesar de usar la misma modulación, la tasa de codificación cambia haciéndose más grande (pasa de 1/2 a 3/4). Por tanto, la cantidad de datos adicionales agregados es menor; aumentando la eficiencia volumétrica.

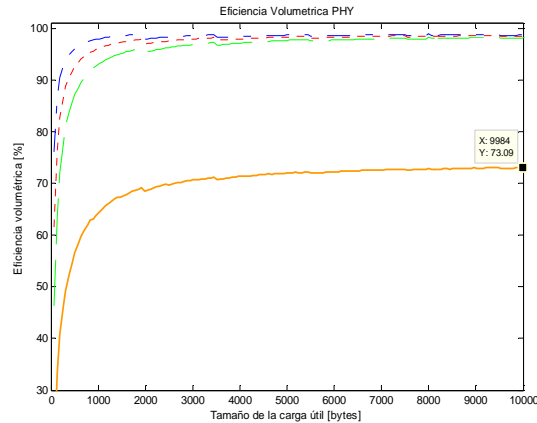
El máximo valor registrado en la grafica es de 73.5%, lo cual tiene una cierta relación con el valor de CC, pues es posible ver que la eficiencia solo se reduce en aproximadamente 25% del valor original (en el que la eficiencia era de 99%) .



- **Capa PHY con tasa de datos 18 Mbps, QPSK con CC=3/4 (4) y 36 Mbps, 16-QAM con CC=3/4 (6)**

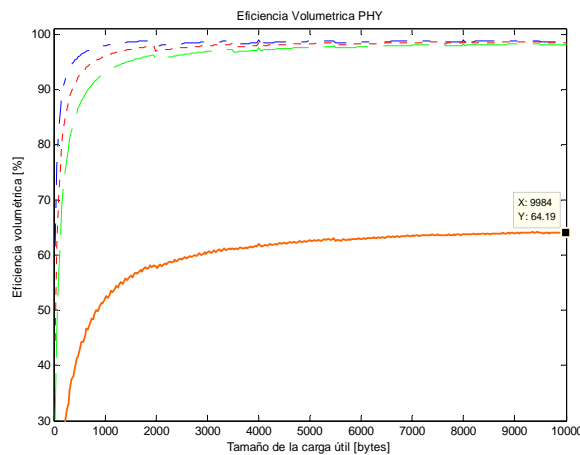
De forma similar al caso 1 y 3, este resultado tiene muchas similitudes con el caso 2, pues su CC es de 3/4, es decir, de un 75% aproximado al 75% del valor de máxima eficiencia volumétrica. De igual forma, la diferencia es mínima y se debe a la cantidad de bytes que se toman a la entrada del codificador para obtener bits codificados, pues en este caso se

toman 96 en vez de 48, lo que también disminuye, aunque de forma mínima, la eficiencia volumétrica.



- **Capa PHY con tasa de datos 48 Mbps, 64-QAM con CC=2/3 (7)**

En este caso, dado que la tasa de codificación convolucional cambia, la máxima eficiencia volumétrica también se modifica en dicha proporción. Por tanto, es alrededor de una tercera parte menor que el máximo valor. De acuerdo con la siguiente gráfica, el mayor valor es de 64.19%.

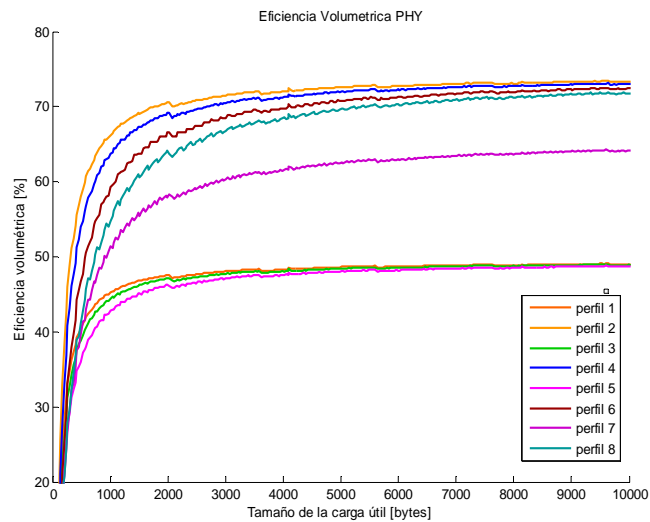


- **Grafica comparativa entre perfiles WiFi**

Como se pudo observar en las graficas anteriores, la eficiencia volumétrica depende en mayor medida de la tasa de codificación CC. Aquellos perfiles que poseen una tasa de codificación similar como son 1, 3 y 5; la eficiencia volumétrica se comporta de forma muy parecida, alrededor del 43%. Lo mismo pasa para los perfiles 2, 4, 6 y 8, que fluctuaron alrededor del 73% de eficiencia. Sólo el perfil 7 se destacó de los demás, pues

su tasa de codificación convolucional de 2/3 se refleja en eficiencia volumétrica de cerca del 66%.

Así mismo, la eficiencia volumétrica para perfiles similares disminuye conforme se toma un número mayor de bits a la entrada del codificador. Lo anterior puede ser verificado en la siguiente grafica que muestra tal eficiencia volumétrica para todos los perfiles WiFi.



La **modulación** es un parámetro que tiene mayor injerencia en la tasa de transmisión, pues determina la cantidad de bits que se pueden transmitir en un símbolo de datos codificados; en términos prácticos, aumenta la cantidad de bits que pueden ser transmitidos de forma simultánea a través del medio de transmisión siempre y cuando la señal transmitida tenga una buena calidad.

Dado que la eficiencia volumétrica es un concepto que tiene que ver con **la cantidad neta de información que viaja por el medio**, la cantidad de bits que se codifican por símbolo OFDM consiste en arreglar dicha información neta en conjuntos de bits, los cuáles se asignan en diversas portadoras que los transportan a través del medio físico. Por tanto, la **eficiencia volumétrica es independiente del esquema de modulación que se use** (sea de bajo o alto nivel), **depende únicamente de la cantidad neta de datos que se transmitan y directamente de la tasa de codificación que se use.**

6.4.3 Eficiencia volumétrica para el estándar IEEE 802.16

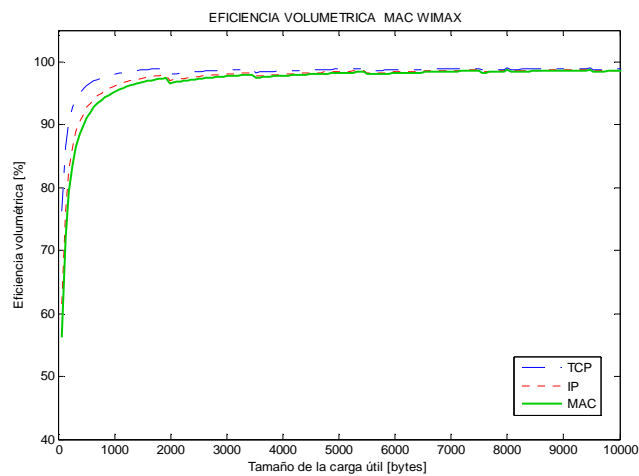
En la sección anterior se trató la eficiencia volumétrica para la tecnología WiFi, en esta sección se hará lo correspondiente para WiMAX.

La eficiencia volumétrica para TCP e IP son idénticas para ambas tecnologías, pues para las dos se maneja la misma MTU. Por tanto, sólo se hará el análisis para la capa MAC y PHY OFDM.

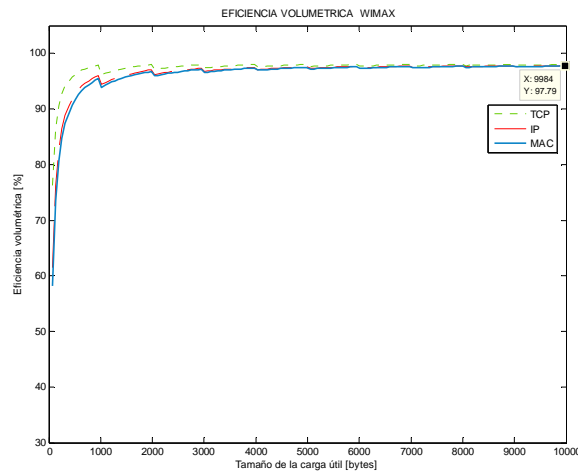
- **Eficiencia Volumétrica en capa MAC**

De acuerdo con la ecuación (5), la capa MAC para WiMAX agrega un total de 10 bytes, por tanto, la eficiencia volumétrica se calcula usando este valor como la información adicional agregada a la MSDU proveniente de la capa 3.

Esta capa es muy importante para el estándar IEEE 802.16, pues es a través de ella que se efectúan los procesos para establecer la calidad de servicio QoS que se ofrecerá a los suscriptores. Así mismo, se implementan técnicas para resolución de colisiones así como técnicas para garantizar la seguridad en los datos. En este caso, comparando el resultado con la eficiencia para los protocolos TCP e IP, ésta no disminuye tanto en comparación con ellas pues sólo se están agregando 10 bytes como máximo. La eficiencia máxima es de 97.8%.



En la práctica, lo más común es agregar 6 bytes únicamente como encabezado MAC. A continuación se muestra el resultado para un encabezado de 6 bytes. **Como se puede observar la diferencia en la eficiencia volumétrica es mínima, su valor máximo 97.79%.**



- **Eficiencia Volumétrica en capa OFDM PHY**

Para realizar el análisis de la eficiencia volumétrica para el estándar IEEE 802.16 en cuanto a la capa física, se identifican 7 perfiles, es decir, combinaciones de modulaciones y tasa de codificación convolucional y de codificación Reed-Solomon (RS). Se ilustran en la siguiente tabla, la cual se tomó del Capítulo 4.

Tabla 8. Parámetros de codificación WiMAX

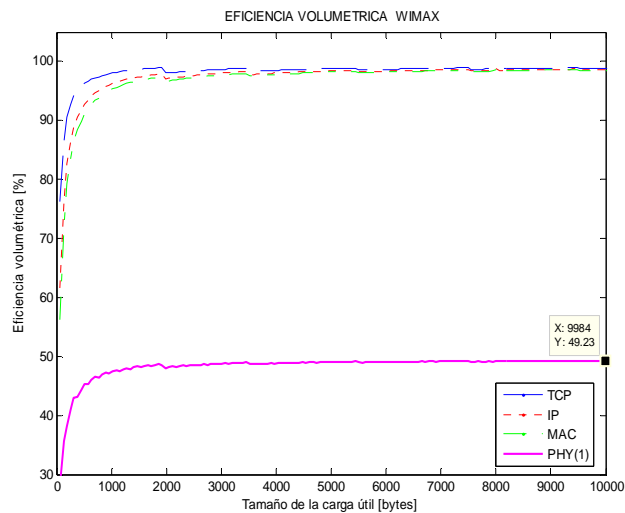
Perfil No.	Modulación	Tamaño del bloque no codificado [bytes]	Tamaño del bloque codificado [bytes]	Tasa de codificación total (OCR)	Código RS	Tasa de CC
1	BPSK	12	24	1/2	(12,12,0)	1/2
2	QPSK	24	48	1/2	(32,24,4)	2/3
3	QPSK	36	48	3/4	(40,36,2)	5/6
4	16-QAM	48	96	1/2	(64,48,8)	2/3
5	16-QAM	72	96	3/4	(80,72,4)	5/6
6	64-QAM	96	144	2/3	(108,96,6)	3/4
7	64-QAM	108	144	3/4	(120,108,6)	5/6

De acuerdo con dicha tabla, tomando en cuenta el primer perfil (BPSK CC ½) en el codificador entran 12 bytes y a la salida se obtienen 24 bytes, tomando en cuenta tanto la codificación RS como la codificación convolucional. A continuación se hará una breve descripción de los resultados obtenidos para cada perfil de capa física

- **Capa PHY con BPSK CC ½ y RS(12,12,0) (1)**

Para este perfil, de forma similar a los resultados obtenidos para WiFi, la eficiencia volumétrica cae de forma importante respecto a la obtenida para los protocolos de MAC, IP y TC.

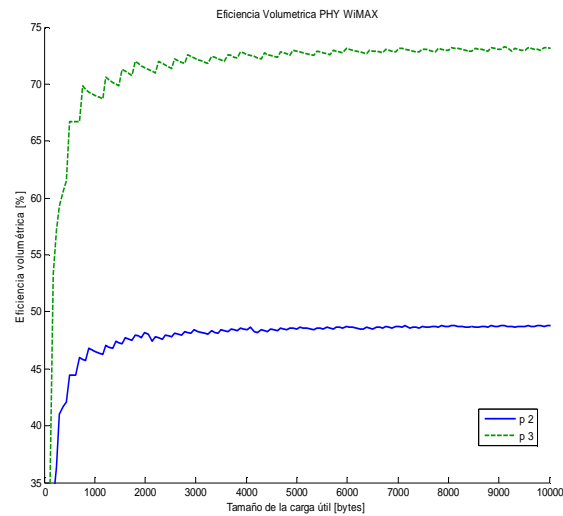
En este caso, dado que la tasa de codificación total (OCR) es igual a la tasa de codificación convolucional (1/2) ; sin embargo, dado que la tasa de codificación total es de 1/2 significa que la información a la salida del codificador se está duplicando, por tanto, la eficiencia volumétrica disminuye en un 50% respecto al valor máximo de eficiencia volumétrica obtenida para WiMAX. Como se observa en la siguiente figura, para este caso, la máxima eficiencia volumétrica es de 49.23%.



- **Capa PHY con QPSK OCR ½ RS (24,48) (perfil 2) y QPSK OCR 3/4 RS (36,48) (perfil 3)**

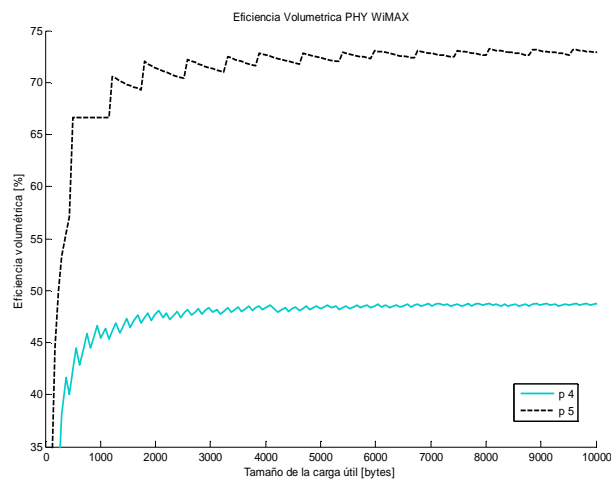
Para éste perfil, debido a que la tasa de codificación total OCR es igual a la del perfil anterior, es decir, de 1/2 la eficiencia volumétrica es muy similar en su máximo valor. De forma muy parecida a como sucede en WiFi, en este caso se toma una mayor cantidad de bits a la entrada del codificador, y como consecuencia disminuye la eficiencia volumétrica pero en una proporción mínima.

En cuanto al perfil 3, debido a la tasa de codificación de ¾, la eficiencia volumétrica aumenta de forma considerable pues se agregan menos datos adicionales y queda, de forma similar a lo que sucede en WiFi, la eficiencia volumétrica esta cerca del 73%



- **Capa PHY con 16-QAM OCR 1/2 RS (48,96) (p 4) y 16-QAM OCR 3/4 RS (72,96) (p 5)**

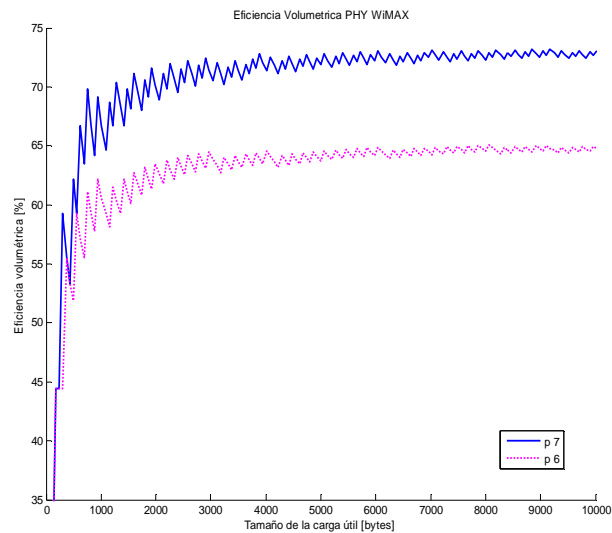
Para el perfil 4 como se ha mostrado en casos anteriores, la eficiencia volumétrica disminuye quedando en 48% aproximadamente; lo cual es esperado debido a que la tasa de codificación promedio (o total) es de 1/2. Para el perfil 5, la eficiencia volumétrica está cerca del 73% pues su tasa de codificación total es de 3/4.



- **Capa PHY con 64-QAM OCR 2/3 RS (96,144) (perfil 6) y 64-QAM OCR 3/4 RS (108,144) (perfil 7)**

Para el perfil 6, la eficiencia volumétrica alcanza un valor aproximado de 63%, en el cual se refleja la tasa de codificación promedio que es de 2/3 de la máxima eficiencia volumétrica. Para el perfil 7 se obtiene un resultado esperado; dado que la tasa de

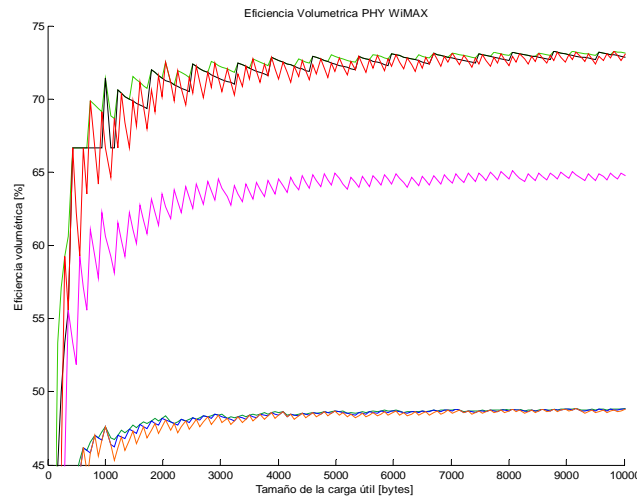
codificación promedio es 3/4, la eficiencia volumétrica es mayor que la del perfil 6 pues agrega menos información adicional respecto de la original. Por tanto la eficiencia es mayor.



- **Comparativo final para capa PHY WIMAX**

En la siguiente figura se muestran las gráficas de los 7 perfiles que se manejaron para el presente estudio. Como se puede observar, de forma similar a lo que sucede para WiFi, las curvas que tienen tasas de CC iguales presentan una eficiencia volumétrica similar y por tanto el comportamiento en sus gráficas es parecido.

Se notan picos muy marcados en este caso, lo cual se debe a que cada vez que el codificador FEC toma un bloque de bits para codificar, la información se está fragmentando y se le agregan bytes adicionales; lo cual tiene como consecuencia la disminución de la eficiencia volumétrica. En el caso de WiFi, estos picos no son tan notorios debido a que la fragmentación se lleva a cabo en bits (en este caso son Bytes u octetos los que se toman a la entrada del FEC), con lo cual los picos resultan más continuos y pequeños y por tanto, no son tan perceptibles como en este caso.

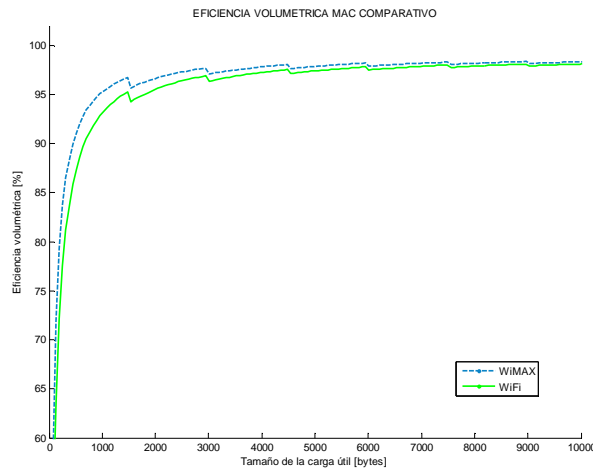


6.5 COMPARACIÓN DE LA EFICIENCIA VOLUMÉTRICA ENTRE ESTÁNDARES 802.11 Y 802.16

6.5.1 Comparación en capa MAC

La siguiente grafica muestra el resultado de evaluar la eficiencia volumétrica para la capa MAC en ambos estándares. La grafica de línea discontinua muestra el resultado de la eficiencia volumétrica para WiMAX, la que se muestra en línea continua es el resultado para WiFi. Como se aprecia en la grafica, la eficiencia volumétrica para WiMAX es mayor que la registrada en WiFi.

Lo anterior tiene su explicación en la cantidad de datos adicionales que ambos estándares agregan en esta capa a la MSDU proveniente de la capa de red. Mientras WiFi agrega hasta 34 bytes de información (la mayoría de esta información constituida por las direcciones MAC de la estación central y los dispositivos), el estándar para WiMAX sólo marca un aumento de 10 bytes como máximo (6 bytes como encabezado y 4 como suma de verificación). Como se mencionó previamente, entre mayor sea la cantidad de datos adicionales agregados la eficiencia volumétrica disminuye; en este comparativo se comprueba dicha premisa ***pues para WiMAX, caso en el que se agrega menos información, la eficiencia volumétrica resulta ser mayor en la capa MAC que para WiFi.***



6.5.2 Comparación en capa PHY WiFi vs WiMAX

Tabla 9. Perfiles a contrastar WiFi vs WiMAX para capa PHY

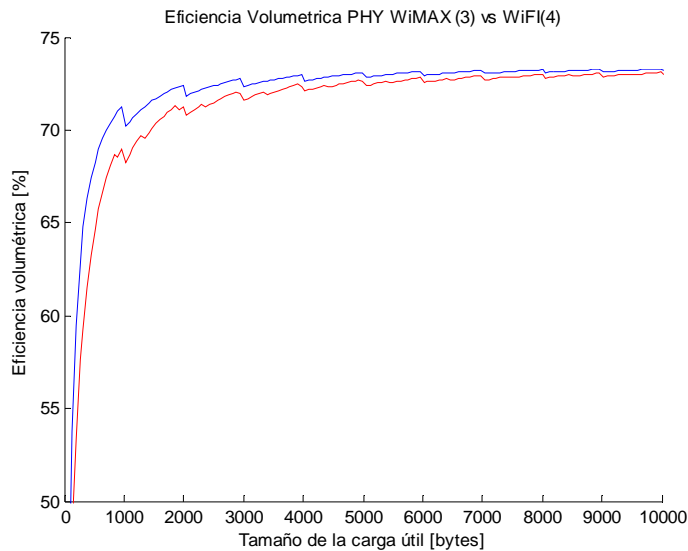
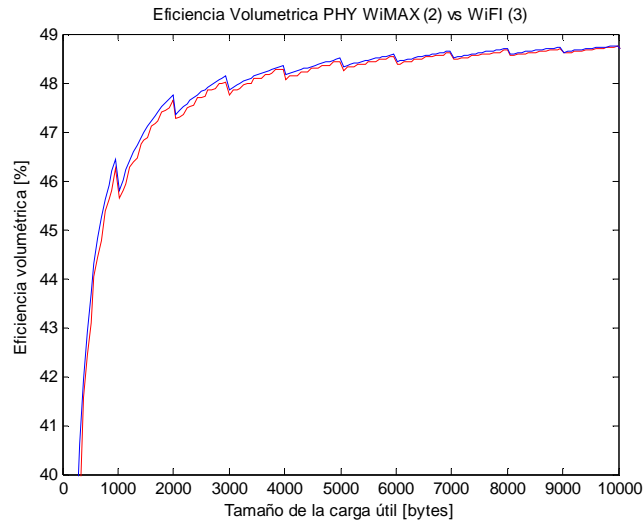
WiFi		WiMAX	
Perfil	Parámetros	Perfil	Parámetros
1	BPSK CC ½ (24,48)	1	BPSK OCRC ½ (12,24)
3	QPSK CC ½ (48,96)	2	QPSK OCR ½ (24,48)
4	QPSK CC 3/4 (72,96)	3	QPSK OCR 3/4 (36,48)
5	16-QAM CC 1/2 (96,192)	4	16-QAM OCR 1/2 (48,96)
6	16-QAM CC ¾ (144,192)	5	16-QAM OCR ¾ (72,96)
7	64-QAM CC 2/3 (192,288)	6	64-QAM OCR 2/3 (96,144)
8	64-QAM CC ¾ (216, 288)	7	64-QAM OCR ¾ (108,144)

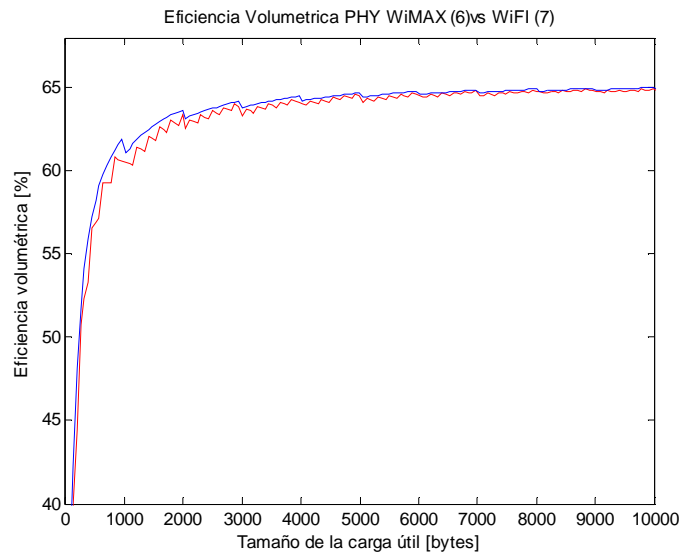
- **Capa PHY comparación Perfil 1 WiFi vs Perfil 1 WiMAX**

La grafica muestra que la eficiencia volumétrica para ambos estándares es muy similar, **WiMAX tiene una eficiencia volumétrica mayor** debido a que WiFi agrega en la capa MAC hasta 34 bytes adicionales de encabezados, en cambio WiMAX solo agrega 6 bytes adicionales.

Adicionalmente se debe tomar en cuenta la fragmentación que se lleva a cabo en la capa PHY, pues WiFi la realiza en bits, y WiMAX en bytes; WiFi fragmenta en partes más pequeñas, y como se analizo anteriormente, el fragmentar un mayor número de veces implica mayor cantidad de información adicional agregada; ambos factores explican la naturaleza de este resultado; sin embargo, de primera vista se determina que no es claramente diferenciador, pues los resultados son muy similares.

Para las últimas comparaciones, (perfiles 6 y 7) la fragmentación en WiMAX se hace más evidente, pues los picos o discontinuidades de las graficas se hacen más evidentes. Para WiFi éstos se hacen muy notorios y cercanos porque la fragmentación ocurre de forma continua, para WiMAX son espaciados pues fragmenta en partes más grandes. Sólo se reportan los graficos para 3 de las comparaciones, pues los resultados son similares:





6.6 EFICIENCIA VOLUMÉTRICA Y UTILIZACIÓN DEL CANAL

En esta sección se lleva a cabo un análisis del impacto que tiene la eficiencia volumétrica en la capacidad del canal para la transmisión de datos. Se utilizarán los datos obtenidos en las secciones anteriores para hacer una estimación de la tasa de transmisión (*throughput*) que se obtiene al transmitir únicamente datos en la red WiMAX y WiFi.

Para esta sección, el análisis se hará apoyado en los parámetros que se presentan en [19], pues reúnen de forma plena las condiciones bajo las que se está llevando a cabo el presente trabajo, como son: utilizar el esquema de WiMAX fijo (IEEE 802.16-2004) y un ancho de banda del canal de 3.5 MHz.

6.6.1 Cálculo teórico de la tasa de transmisión (*throughput*)

WIMAX

La información se envía a través de *frames*, cada uno de los cuales contiene una cierta cantidad de símbolos OFDM, en los cuales se acomodan de forma física los bits que se van a transmitir. Recordemos que cada símbolo OFDM se compone de 256 subportadoras para el caso de WiMAX fijo, aunque no todas ellas se usan para transmitir datos.

La figura 6.1 muestra la distribución en frecuencia del símbolo OFDM.

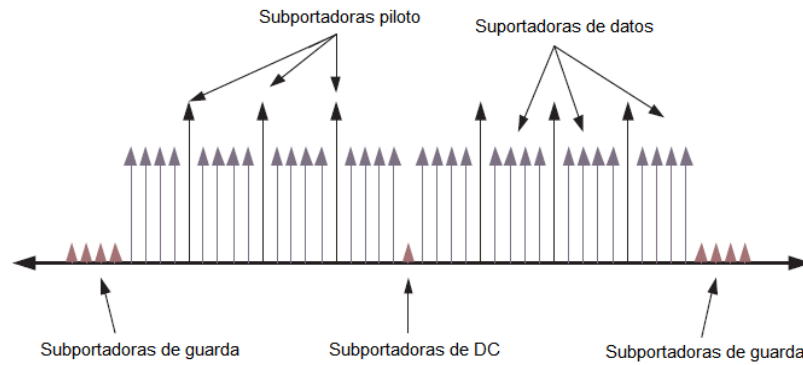


Figura 6.1. Estructura de un símbolo OFDM

La distribución del uso de cada tipo de subportadoras es el siguiente:

Tabla 10. Tipos de portadoras [4]

Tipo	Cantidad	Función
Piloto	8	Sincronización en capa PHY
Bandas de guarda	57 (27 inferiores y 28 superiores)	Prevenen interferencia con símbolos adyacentes
Nula (DC)	1	Indican la frecuencia central del canal
Datos	192	Llevan los datos útiles
Total	256	

Como se menciona anteriormente, se considerara como técnica de duplexión a TDD, por tanto, un frame OFDM utilizando TDD tiene la estructura que se muestra en la Figura 6.2:

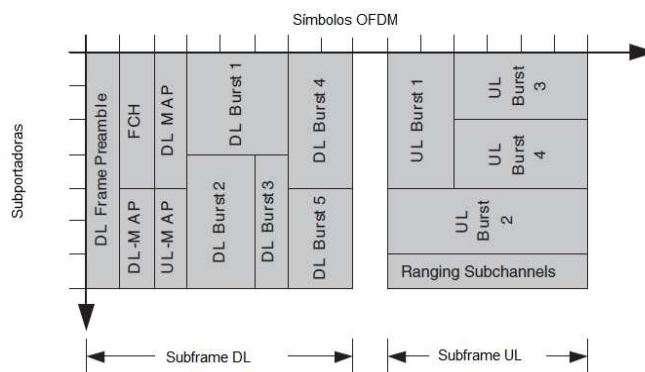


Figura 6.2. Frame TDD

En el eje horizontal se presentan los símbolos OFDM y en el vertical frecuencias o portadoras de datos. Por tanto, el objetivo es determinar el número de símbolos y subportadoras que contiene cada *frame* y qué cantidad de símbolos se usan para

transmitir datos de control y cuantos para datos. De acuerdo con [2], de forma esquemática, los campos que contienen los frames *UL* y *DL* son:

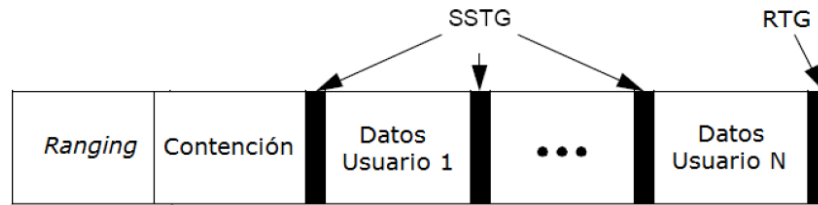


Figura 6.3. Subframe UL TDD

Los campos de control en este caso son: *Ranging*, *contención*, *RTG* y *SSTG*.

Se muestra en la Figura 6.4 el frame *DL* con detalle. Los campos de control son: preámbulo, FCH, UL MAP, DL MAP y TTG.

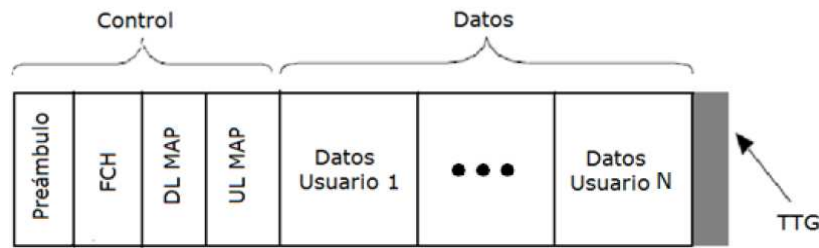


Figura 6.4. Subframe DL TDD

La siguiente tabla especifica de forma aproximada el tamaño de cada uno de los campos, se obtuvo de [19] pagina 49.

Tabla 11. Campos de control para TDD [19]

Campos de control	Tamaño
Preámbulo	1 símbolo
FCH	1 símbolo
Ranging	2 símbolos
Contención	5 símbolos (UL Frame)
DL MAP	24 bytes (QPSK 1/2)
UL MAP	47 bytes (QPSK 1/2)
TTG	4 símbolos + 35µs + Tp ¹⁷
RTG	4 símbolos + 35µs + Tp

Procedimiento: Se llevara a cabo el cálculo para el perfil WiMAX de mayor nivel, es decir, para 64-QAM 3/4. Como se menciona en el Apéndice B: Modulación, las modulaciones

¹⁷ En éste caso a TP (Tiempo de propagación) se considerará nulo debido a que se maneja una distancia despreciable entre BS y SS.

digitales permiten enviar un mayor número de bits de forma simultánea aumentando el *Throughput* del enlace. La tabla siguiente muestra una relación de los bits codificados por tipo de modulación, considerando el uso de 192 portadoras de datos útiles:

Tabla 12. Tipos de modulación y bits por símbolo OFDM [20]

Modulación	Bits codificados por subportadora	Bits por símbolo OFDM
BPSK	1	192
QPSK	2	384
16-QAM	4	768
64-QAM	6	1152

Consideraciones:

$$BW_{canal} = 7 \text{ [MHz]}$$

1. Espacio entre portadoras. Se calcula el espacio (en frecuencia) entre cada una de las subportadoras del símbolo OFDM:

$$\Delta f = \frac{BW_{canal}}{256 \text{ portadoras}} = 27.35 \text{ [KHz]} \quad (28)$$

Se aplica un factor de sobremuestreo para asegurar la ortogonalidad de las portadoras y por tanto prevenir la interferencia intersímbolo, el estándar define diversas tasas, para este caso se usara la el más bajo que es 8/7:

$$f_s = n \cdot \Delta f = \frac{8}{7} \cdot 13.671 \text{ [KHz]} = 31.25 \text{ [kHz]} \quad (29)$$

2. Para calcular la duración temporal del símbolo OFDM se toma el inverso de f_s :

$$T_d = \frac{1}{f_s} = \frac{1}{31. \text{KHz}} = 32 \left[\frac{\mu s}{\text{simbolo}} \right] \quad (30)$$

Agregando la duración del prefijo cíclico o espacio de guarda (CP) que se tomara como $\frac{1}{4}$, la duración total es:

$$T_s = 32\mu s + 32\mu s \cdot \frac{1}{4} = 40 \left[\frac{\mu s}{\text{simbolo}} \right] \quad (31)$$

3. Considerando que cada *frame* dura 10ms [4], el número de símbolos por *frame* es:

$$\#simbolos = \frac{10 \left[\frac{ms}{frame} \right]}{40 \left[\frac{\mu s}{simbolo} \right]} = 250 \left[\frac{simbolos}{frame} \right] \quad (32)$$

Este número de símbolos corresponde al cálculo hecho en referencia al total de portadoras, por tanto, es necesario especificar cuántos de estos símbolos se usarán para transportar los datos útiles.

Como muestra la tabla 10, solo 192 de las 256 portadoras transportan datos útiles. Sin embargo, es necesario tomar en cuenta adicionalmente la cantidad de símbolos que se consumen por los campos de control en cada uno de los subframes (*UP/Downlink*).

Usando los datos de la Tabla 11, es posible ver que los campos RTG y TTG que se encargan de separar ambos subframes ocupan un cierto número de símbolos OFDM. De la misma forma, los campos *Ranging*, de Contención para UL y el Preámbulo, *FCH*, *UL MAP* y *DL MAP* para DL son campos de control.

- **Frame Uplink**

El número de símbolos consumidos por el campo RTG se obtiene de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} RTG &= 4 [simbolos] + 35\mu s = 4 [simbolos] + \frac{35 \mu s}{80 \left[\frac{\mu s}{simbolo} \right]} \\ &= 4.875 [simbolos] \quad (32) \end{aligned}$$

$$\#simbolos_{RTG} \approx 5 [simbolos]$$

Por tanto, la cantidad de símbolos de control consumidos para este *subframe* es:

$$\begin{aligned} \#simbolos_{control_{UL}} &= \#simbolos_{ranging} + \#simbolos_{contención} + \#simbolos_{RTG} \\ &= 2 + 5 + 5 \end{aligned}$$

$$\#simbolos_{control_{UL}} = 12 [simbolos] \quad (33)$$

- **Frame Downlink**

Se calculará la cantidad de símbolos que ocupan tanto el UL y DL MAP, dado que no se usa subcanalización por usar el estándar para WiMAX fijo todas las portadoras que no se usen en un campo serán desperdiciadas.

$$UL\ MAP = 47\ bytes \cdot 8 \left[\frac{bits}{byte} \right] = 376 [bits] \approx 2 [simbolos] \quad (34)$$

$$DL\ MAP = 24\ bytes \cdot 8 \left[\frac{bits}{byte} \right] = 192\ [bits] \approx 1\ [simbolo] \quad (35)$$

Y para el campo TTG:

$$RTG = 4\ [simbolos] + 35\ \mu s = 4\ [simbolos] + \frac{35\ \mu s}{80 \left[\frac{\mu s}{simbolo} \right]} = 4.875\ [simbolos]$$

$$\#simbolos_{TTG} \approx 5\ [simbolos] \quad (36)$$

Por tanto, sumando los valores de los campos de control, para este subframe:

$$\begin{aligned} \#simbolos_{control_{DL}} &= \#simbolos_{Preamble} + \#simbolos_{FCH} + \#simbolos_{TTG} \\ &+ \#simbolos_{ULMAP} + \#simbolos_{DLMAP} \\ &= 1 + 1 + 5 + 2 + 1\ [simbolos] \end{aligned}$$

$$\#simbolos_{control_{DL}} = 10\ [simbolos] \quad (37)$$

Una vez que se conocen la cantidad de símbolos ocupados por los campos de control, es necesario conocer qué cantidad de símbolos se utilizan para cada uno de dichos *frames*. De acuerdo con [17], el *subframe UL* ocupa el 44% de todo el *frame* TDD, y el campo DL el restante 56% (lo cual es lógico pues son asimétricos y generalmente el *frame DL* es más grande).

Por tanto, del cálculo anterior:

$$\#simbolos_{UL} = \#simbolos \cdot 0.44 = 250 \left[\frac{simbolos}{frame} \right] (0.44) = 110\ [simbolos] \quad (38)$$

$$\#simbolos_{DL} = \#simbolos \cdot 0.56 = 250 \left[\frac{simbolos}{frame} \right] (0.56) = 140\ [simbolos] \quad (39)$$

Por tanto la cantidad de símbolos usados para transmitir datos de usuario es:

$$\#simbolos_{utiles\ UL} = \#simbolos_{UL} - simbolos_{control_{UL}} = 110 - 12\ [simbolos]$$

$$\#simbolos_{utiles\ UL} = 98\ [simbolos] \quad (40)$$

$$\#simbolos_{utiles\ DL} = \#simbolos_{DL} - simbolos_{control_{DL}} = 140 - 10\ [simbolos]$$

$$\#simbolos_{utiles\ DL} = 130\ [simbolos] \quad (41)$$

Si sólo se consideran los datos de control ya mencionados (los que son parte de los *frames* de capa física), la tasa de transmisión que se obtiene se puede calcular de la siguiente forma:

$$R_{datos} = \#portadoras_{datos} \cdot n \cdot OCR \cdot \#simbolos_{utiles} \cdot \#frames \quad (42)$$

Dónde:

$\#portadoras_{datos}$ = portadoras de datos por símbolo OFDM

n = número de bits por símbolo OFDM

OCR = tasa de codificación total (CC+RS)

$\#simbolos_{utiles}$ = símbolos útiles en *subframe* (UL / DL)

$\#frames$ = número de *frames* por segundo

Sustituyendo en la ecuación (14) los datos que ya se conocen:

$$R_{datosUL} = 192 \cdot 6 \cdot \frac{3}{4} \cdot 98 \cdot 100 = 8.46 \text{ [Mbps]} \quad (43)$$

$$R_{datosDL} = 192 \cdot 6 \cdot \frac{3}{4} \cdot 130 \cdot 100 = 11.23 \text{ [Mbps]} \quad (44)$$

Los resultados anteriores reflejan la tasa de transmisión **cuando sólo se consideran los parámetros de capa PHY del canal de comunicación**; es decir, cuando se consideran a los campos de control para los *subframes* UL y DL. Dicho análisis se llevará a cabo en la sección 6.6.2.

WiFi

De acuerdo con los parámetros de la Tabla 3 (Capítulo 3), el estándar IEEE 802.11g utiliza 52 portadoras no nulas por símbolo OFDM. De ellas 48 son de datos y 4 son portadoras piloto.

Sin embargo, debido a los mecanismos para la prevención de colisiones, existen una serie de espacios temporales muertos, los cuales son usados para controlar tiempos de espera que controlan el mecanismo por el cual la terminal pueda acceder al canal. Los temporizadores DIFS y SIFS así como los mensajes de confirmación de recibido ACK deben ser contabilizados en el tiempo que tarda en recibirse una trama.



Imagen 6.5 Temporizadores *DIFS*, *SIFS* y *ACK* para una trama de datos

Para dicho cálculo se supondrá una situación ideal, en la que no ocurren errores y se está libre de colisiones (toda transmisión es exitosa en el primer intento). Por tanto, el Throughput se define como:

$$R_{datos} = \frac{\text{payload}}{\text{tiempo colisiones} + \text{tiempo de transmisión} + \text{tiempo interframe} + T_{ACK}}$$

$$R_{datos} = \frac{\text{payload}}{T_{TX} + T_i + T_{ACK}} \quad (44)$$

El tiempo de colisión, por la razón que se menciona vale cero, por tanto será necesario calcular el tiempo de transmisión encontrando cuantos símbolos ocupa la carga útil o *payload* y agregando los tiempos de los temporizadores (*tiempo interframe*). Algunos de los valores en duración para estos parámetros son [1] [12]:

Tabla 13. Parámetros de tiempo IEEE 802.11a [12] [23]

Parámetro	Valor
$T_{\text{PREAMBLEe PLCP}}$	16 μs ($T_{\text{short}} + T_{\text{long}}$)
TG (tiempo de guarda)	0.8 μs
T_{SIGNAL} (Duración del campo <i>SIGNAL</i>)	4 μs (TG + tiempo <i>SIGNAL</i>)
T_{SYM} (tiempo del símbolo OFDM)	4 μs (TG+ tiempo del símbolo OFDM)
T_{SHORT} (duración de la secuencia corta)	8 μs
T_{LONG} (duración de la secuencia larga)	8 μs
T_{SIFS} [12]	16 μs
T_{DIFS} [12]	34 μs

Por tanto, tomando en cuenta un paquete con la máxima MTU TCP, es decir, de 1500 bytes, el cálculo quedaría de la siguiente forma:

1. Dado que los tiempos de un DIFS y un SIFS corresponde a 16 y 34 μs respectivamente [12] intercambiar un único *frame* de datos requiere que la estación espere un DIFS,

transmita el frame de datos y espere la confirmación ACK. ACK se transmite después de un tiempo SIFS, por tanto, el total de tiempo en espera en este lapso son 50 μ s.

$$T_i = 50 [\mu s] \quad (45)$$

Para el ACK, depende de la tasa de datos que se ocupe para transmitirlo. Por comodidad y por ser una tasa intermedia, se considera una tasa de 24 Mbps, la cual requiere tres símbolos OFDM, e incluyendo el encabezado serían:

$$T_{ACK} = 32 [\mu s] \quad (46)$$

- Posteriormente se debe cuantificar el número de símbolos OFDM que se ocupan en transmitir el frame de datos para obtener el tiempo correspondiente. Dado que el preámbulo y el campo *Signal*¹⁸ en capa física en la subcapa PLCP requiere 20 μ s ($T_{PREAMBLE} + T_{SIGNAL}$). Para una carga útil de 1500 bytes que es la MTU que se utilizó para el TCP y tomando en cuenta la tasa de transmisión de 54 Mbps donde el número $N_{DBPS}=216$, se tendrían:

$$\#simbolos = \frac{1500[bytes] \cdot 8 \left[\frac{bits}{byte} \right]}{216 [bits]} \approx 56 \quad (47)$$

- Se calcula, por tanto, el tiempo necesario para transmitir dicho número de símbolos (del frame de datos) es decir:

$$T_{TX} = 56 \cdot 4[\mu s] = 224 [\mu s] \quad (48)$$

- Se contabiliza entonces, el tiempo total de transmisión del frame:

$$T_{total} = T_{TX} + T_i + T_{ACK} = 224 [\mu s] + 50 [\mu s] + 32 [\mu s] = 306 [\mu s] \quad (49)$$

- Por tanto, la tasa de transmisión una vez considerados los tiempos de transmisión es:

$$R_{datos} = \frac{12000 bits}{306 \mu s} = 39.21 [Mbps] \quad (50)$$

Con lo cual, es posible ver que varía de forma importante respecto del valor máximo que se plantea que es de 54 Mbps. El cálculo para las otras tasas de transmisión se hace de forma análoga, se muestran los resultados en la siguiente tabla:

¹⁸ Dichos campos se describieron en el Capítulo 3.
 Facultad de Ingeniería UNAM
 Departamento de Ingeniería en Telecomunicaciones

Tabla 14. Comparación entre Troughput máximo y usando temporizadores

Perfil WiFi	Troughput máximo R_{MAX} [Mbps]	Troughput con temporizadores R_{datos} [Mbps]
1. BPSK CC ½ RS (24,48)	6	5.76
2. QPSK CC ½ RS (48,96)	12	11.11
3. QPSK CC 3/4 RS (72,96)	18	16.00
4. 16-QAM CC 1/2 RS (96,192)	24	20.62
5. 16-QAM CC ¾ RS (144,192)	36	28.71
6. 64-QAM CC 2/3 RS (192,288)	48	35.93
7. 64-QAM CC ¾ RS (216, 288)	54	39.21

Sin embargo, igual que en el caso anterior, hay que tener en cuenta que la cantidad real de datos útiles de usuario que son transportados también dependen de la cantidad de encabezados que e información adicional que se haya agregado a la información como consecuencia del procesamiento de la misma a través de los distintos protocolos de la red. Es en este punto, donde los resultados obtenidos de la *eficiencia volumétrica* en las secciones anteriores cobran relevancia, pues se deben considerar como un factor que reduce aun más la tasa de transmisión de la información.

6.6.2 Tasa de transmisión (throughput) considerando a la eficiencia volumétrica

- **WiMAX**

Los perfiles que se consideraron para *WiMAX en la capa OFDM PHY* se establecieron anteriormente y se concentran en la Tabla 9.

A continuación se realizara el cálculo para el perfil 7 de **WiMAX 64-QAM OCR ¾**, el procedimiento es idéntico para los demás perfiles, únicamente es necesario aplicar los parámetros obtenidos de la tabla 11 y las correspondientes tasas de codificación OCR. La ecuación 14 se modifica para abarcar la eficiencia volumétrica obtenida para la capa PHY OFDM en WiMAX, quedando e la siguiente forma:

$$R_{datosUL} = \#portadoras_{datos} \cdot n \cdot OCR \cdot \#simbolos_{utilesUL} \cdot \#frames \cdot efVol_{PHY_x} \quad (51)$$

Dónde:

$efVol_{PHY_x}$ = eficiencia volumétrica de capa PHY en el perfil x

De los resultados para la eficiencia volumétrica en capa PHY para el perfil 7:

$$efVol_PHY_7 = 73.29\%$$

Sustituyendo datos en la ecuación (15):

$$R_{datosUL} = 192 \cdot 6 \cdot \frac{3}{4} \cdot 98 \cdot 100 \cdot 0.7329 = 6.21 \text{ [Mbps]} \quad (52)$$

$$R_{datosDL} = 192 \cdot 6 \cdot \frac{3}{4} \cdot 130 \cdot 100 \cdot 0.7329 = 8.23 \text{ [Mbps]} \quad (53)$$

La siguiente tabla resume los resultados:

Tabla 15: Throughput final WiMAX

WiMAX					
Protocolo	No.	Perfil	efVol_PHY [%]	Throughput datos UL [Mbps]	Troughput datos DL [Mbps]
PHY OFDM	1	BPSK OCRC ½	48.86	0.46	0.61
	2	QPSK OCR ½	48.86	0.92	1.22
	3	QPSK OCR 3/4	73.31	0.91	2.75
	4	16-QAM OCR 1/2	48.87	2.07	2.44
	5	16-QAM OCR ¾	73.31	1.84	5.49
	6	64-QAM OCR 2/3	65.08	4.14	3.25
	7	64-QAM OCR ¾	73.29	6.21	8.23
MAC (perfil 7)	NA	NA	97.52	8.26	10.96
IP (perfil 7)	NA	NA	97.84	8.28	10.99
TCP (perfil 7)	NA	NA	98.04	8.30	11.01

NA: no aplicable

Como se puede observar directamente de la tabla, la disminución de la tasa de transmisión que solo considera datos de control en comparación con la que considera datos de *overhead* es importante.

Sin no se consideran los datos de control en los frames UL y DL, se obtiene tasas de 9 Mbps y 12 Mbps respectivamente. Las cuales disminuyen a causa de que los datos de control consumen recursos de la red a 8.46 Mbps y 11.23 Mbps respectivamente.

En el caso el perfil 7, que es el perfil con la modulación más eficiente con una tasa de codificación mayor (agrega menos datos adicionales), el Throughput para el subframe UL pasa de 8.46 Mbps a 6.21 Mbps y en DL de 11.23 Mbps a 8.23 Mbps (al considerar datos por *overhead*); tal como la eficiencia volumétrica indica, disminuyen en el orden de un 25% de su valor original aproximadamente.

WiFi

En el caso de **WiFi**, la aplicación de la eficiencia volumétrica se hará directamente sobre la tasa de transmisión aplicando los valores obtenidos de eficiencia volumétrica; por tanto, ésta tasa de transferencia ya considera el *overhead* producida por la información adicional como son los encabezados, sumas de verificación y demás información de sincronía y control.

Tabla 16. Troughput en WiFi

WiFi					
Protocolo	No. Perfil	Tasa máxima [Mbps]	EfVol_PHY [%]	Troughput datos [Mbps]	Troughput + overhead [Mbps]
PHY OFDM	1	6	46.75	5.76	2.69
	3	12	46.75	11.11	5.19
	4	18	69.84	16.00	11.17
	5	24	46.56	20.62	9.60
	6	36	69.84	28.71	20.05
	7	48	62.08	35.93	22.31
	8	54	69.87	39.21	27.40
	MAC (perfil 8)	NA	NA	97.52	39.21
IP (perfil 8)	NA	NA	97.84	39.21	38.36
TCP (perfil 8)	NA	NA	98.04	39.21	38.44

De la Tabla 16 se observa que al igual que para WiMAX, la tasa de trasmisión máxima difiere bastante de la tasa de trasmisión final considerando datos de control y *overhead*.

Como es lógico, la proporción en la que disminuye dicha tasa está en función de la eficiencia volumétrica que cada perfil haya presentado; sin embargo, para el perfil 8 del cual se mostraron cálculos en detalle, se observa que la tasa disminuye desde 54 Mbps teóricos a 39.21 Mbps, obteniéndose aproximadamente un 71% del valor original.

6.7 CONCLUSIONES

Una vez realizado el estudio de la eficiencia volumétrica para ambos estándares, es posible comprobar que es un parámetro que afecta de forma directa a la capacidad que tiene la red de enviar datos de usuario a través del canal inalámbrico. Este indicador es afectado directamente por tres factores: el primero de ellos y más importante es la cantidad de datos adicionales que se agregan a la información de usuario en cada una de los protocolos implementados; el segundo es el tamaño de la cadena de datos útiles que se estén enviando a través del canal y tercero es el tamaño de la MTU a usarse para llevar a cabo la fragmentación.

Como se pudo apreciar en los resultados, a mayor cantidad de datos adicionales agregados, menor la eficiencia volumétrica, lo cual es lógico pues se estará produciendo una sobrecarga de datos de la red. En este sentido, y para ambos estándares, la capa física (PHY) es decisiva pues la tasa de codificación convolucional es un buen indicador de la cantidad adicional de datos presentes. En las capas de aplicación con el protocolo TCP, en capa de red con el protocolo IP e incluso en la capa MAC, la eficiencia volumétrica se mantiene alta para ambos estándares.

Cabe destacar que los resultados obtenidos para ambos estándares son parecidos, incluso en la capa PHY, pues al usar ambas tecnologías OFDM como una técnica de acceso al medio, los perfiles de servicio que éstos ofrecen son análogos (tomando en cuenta la tasa de codificación total OCR para WiMAX). La diferencia más notoria radica en que WiMAX agrega 6 bytes en capa MAC mientras WiFi agrega hasta 34 bytes; así mismo, WiFi fragmenta en segmentos más pequeños en la capa física; ambos factores ocasiona que WiMAX tenga una eficiencia volumétrica mayor, sin embargo, la diferencia para cadenas largas es mínima (en decimas o centésimas de punto porcentual) y en cadenas más cortas hasta de un 3%.

Posteriormente, al calcular la tasa de datos útiles de usuario, es necesario restar a la tasa máxima en ambos las pérdidas que se tienen por el envío de datos de control en los *frames* como tiempos de espera, información de los perfiles, y otros; además de los datos consumidos por el *overhead*, indicado por la eficiencia volumétrica. Los resultados obtenidos reflejan que **WiFi** tiene aproximadamente el 71% del valor máximo cuando se usa el perfil con la modulación y tasa de codificación más eficiente (64QAM CC $\frac{3}{4}$), es decir, pasa de los **54 Mbps a 39.21 Mbps. WiMAX** por su parte, y tomando en cuenta el mismo perfil pasa de de **8.46 Mbps a 6.21 Mbps en UL y en DL de 11.23 Mbps a 8.23 Mbps;** ocupando en datos de usuario aproximadamente el 73% de la tasa máxima.

Como se puede constatar, ambos resultados son similares. Por tanto, se concluye que ambos estándares tiene un rendimiento similar en cuanto a trasmisión de datos de usuario, siendo sus características propias las que las hacen diferentes y les confieren ventajas o desventajas.

Capítulo 7.

Análisis teórico de la cobertura de WiFi y WiMAX

7.1 INTRODUCCIÓN

Para el presente trabajo se tomaran en cuenta dos modelos de propagación similares de tal forma que se pueda hacer una comparación más precisa en cuanto a la cobertura ofrecida por cada uno de ellos.

Para WiMAX se hará uso del modelo de propagación para usuarios fijos, mismo que se tomará de [21] que es un modelo desarrollado por la *Universidad de Stanford*, y que contempla tres categorías que abarcan diversos tipos de ambientes como son el urbano, sub-urbano y el rural. Para el caso de WiFi, se utilizará el modelo simple de pérdidas en espacio libre o modelos de rayos directos, muy usados para modelar ambientes externos (outdoor) basados en [22].

Se tiene como objetivo encontrar la cobertura máxima teórica que ambas tecnologías pueden proporcionar de acuerdo con la relación señal a ruido (*Signal to Noise Ratio SNR*) que sea detectado en el receptor; de acuerdo con los perfiles que establecen los estándares [1] y [2], de tal forma que se pueda determinar que tipo de perfil se puede ofrecer en una determinada zona en los alrededores al AP o BS según sea el caso.

7.2 ANÁLISIS WIMAX

Para llevar a cabo este análisis, se presentan a continuación las ecuaciones utilizadas para llevar a cabo los cálculos de acuerdo con [21], la Tabla 17 resume dichas expresiones matemáticas y sus parámetros:

Tabla 17. Modelo de propagación de usuarios fijos [21]

Variable	Expresión matemática	Parámetros
Path Loss	$PL = A + 10 \cdot \gamma \cdot \log \left[\frac{d}{d_0} \right] + s + Cf + Ch$	$d > d_0$ $d_0 = 100[m]$
Path loss dependent of distance	$A = 20 \log \left(\frac{4\pi d_0}{\lambda} \right), \quad \lambda = \frac{c}{f}$	$c = 3 \times 10^8 \frac{m}{s}$
Path loss exponent (γ)	$\gamma = \left(a - bh_{bs} + \frac{c}{h_{bs}} \right)$	a, b y c se toman de la Tabla 18.
Shadow fading (s)	$s = \mu_\sigma$	μ_σ en Tabla 18

Frequency correction factor (Cf)	$Cf = 6 \cdot \log \left(\frac{f}{1900 \text{ [MHz]}} \right)$	f [MHz]
Height correction factor	$Ch = -10.7 \cdot \log \left(\frac{h_{ss}}{2} \right)$ en Categoría A y B $Ch = -20 \cdot \log \left(\frac{h_{ss}}{2} \right)$ para Categoría C	2[m] < h_{ss} < 10[m]
Potencia recibida	$P_{RX} [dBm] = EIRP [dBm] + G_{RX} [dBi] - PL [dB]$	
Effective Isotropic Radiated Power (EIRP)	$EIRP [dBm] = P_{TX} [dBm] + G_{TX} [dBi] - Lc [dB]$	Lc: pérdidas en líneas de transmisión y conectores
Relación señal a ruido (SNR)	$SNR [dB] = P_{RX} [dBm] - N [dBm]$	N: ruido térmico
Ruido térmico (N)	$N [dBm] = 10 \cdot \log(T \cdot BW \cdot K_0) + Nf [dB] + 30$	$T = 20 \text{ K}$ $K_0 = 1.38 \times 10^{-23} \text{ [J/K]}$ Bw: ancho de banda Nf= figura del ruido del receptor

En la siguiente tabla se encuentran las constantes obtenidas de forma experimental para evaluar los tipos de terreno:

Tabla 18. Categorías del terreno [21]

Parámetro	Categoría del terreno		
	A (densidad de árboles moderada a densa)	B (media a baja densidad de árboles)	C (terreno plano)
a [m]	4.6	4.0	3.6
b [m⁻¹]	0.0075	0.0065	0.0050
c [m]	12.6	17.1	20.0
μ_σ	10.6	9.6	8.20

Para evaluar la distancia a la que la señal puede viajar manteniendo un cierto perfil especificado en el estándar, es necesario conocer la relación existente entre dichos perfiles y la relación SNR mínima que se requiere para cada uno de ellos. Esta información se puede obtener del estándar [2] y se ha colocado en la Tabla 19 que se muestra a continuación:

Tabla 19. Tipo de modulación y CC de acuerdo con SNR [2]

Modulación y tasa de codificación		SNR [dB] recibida
BPSK	1/2	6.4
QPSK	1/2	9.4
	3/4	11.2
16-QAM	1/2	16.4
	3/4	18.2
64-QAM	2/3	22.7
	3/4	24.4

Los cálculos en detalle, se llevarán a cabo para el escenario A (De alta a moderada densidad de árboles) y utilizando el perfil más sencillo (BPSK ½). El cálculo se realiza de forma análoga para los escenarios B y C, aplicando los valores de la Tabla 19 en el cálculo del término Path Loss Exponent.

Datos:

- SNR=6.4 [dB] (para BPSK ½)
- P_{Tx} = 30 [dBm]
- BW(UL)=3.5 [MHz] (recordar que se está usando un canal de 7 MHz)
- $f = 3.5[\text{GHz}] + \text{BW}/2$
- $h_{bs} = 80$ [m]
- $h_{ss} = 6.6$ [m]
- $d_0 = 100$ [m]
- $G_{tx} = 15$ [dB]
- $G_{rx} = 18$ [dB]
- $L_c = 5$ [dB]

Solución

Aplicando la ecuación para ruido térmico:

$$N[\text{dBm}] = 10 \log(T \cdot BW \cdot K_0) + N_f[\text{dB}] + 30$$

$$= 10 \log \left[290[\text{K}] \cdot 3.5 \times 10^6 [\text{Hz}] \cdot 1.38 \times 10^{-23} \left[\frac{\text{J}}{\text{K}} \right] \right] + 4[\text{dB}] + 30$$

$$N[\text{dBm}] = -104.547 [\text{dBm}] \dots (54)$$

Calcular la potencia en el receptor con el resultado (a):

$$P_{RX} = SNR[\text{dB}] + N[\text{dBm}] = 6.4 [\text{dB}] + (-104.53[\text{dBm}]) = -98.14[\text{dBm}] \quad (55)$$

Se obtiene a continuación el Path Loss mediante la relación señal a ruido SNR y la figura de ruido N (1); sin embargo, es necesario conocer primero el valor de la distancia *para Path*

Loss Dependent of Distance (A), el factor *shadow fading* (s) y los factores de corrección para la altura y frecuencia (Ch y Cf):

Para la $f=3.5$ [GHz]

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \times 10^8 \left[\frac{m}{s} \right]}{3.5 \times 10^9 [Hz]} = 0.08571 [m] \quad (56)$$

Por tanto, sustituyendo el resultado (2):

$$A = 20 \log \left(\frac{4\pi d_0}{\lambda} \right) = \frac{4\pi(100m)}{0.08571 [m]} = 83.32 [dB] \quad (57)$$

$$\gamma = a - b h_{BS} + \frac{c}{h_{BS}} = 4.6 + 0.0075(80m) + \frac{12.6}{80m} = 4.157 [dB] \quad (58)$$

$$s = \mu_s = 10.6 [dB] \quad (59)$$

$$C_f = 6 \log \left(\frac{f}{1900 \text{ Mhz}} \right) = 6 \log \left(\frac{3500 \text{ MHz}}{1900 \text{ Mhz}} \right) = 1.5925 [dB] \quad (60)$$

$$C_h = -10.7 \log \left(\frac{h_{ss}}{2} \right) = -10.7 \log \left(\frac{6.6 \text{ m}}{2} \right) = -5.548 [dB] \quad (61)$$

De la ecuación de potencia en el receptor:

$$P_{RX} = EIRP [dBm] + G_{RX} - PL \Rightarrow PL = EIRP [dBm] + G_{RX} - P_{RX} \quad (62)$$

Sin embargo, aun falta obtener el valor EIRP, para ello:

$$EIRP [dBm] = P_{Tx} + G_{TX} - L_c [dB] =$$

$$30 [dBm] + 15 [dB] - 5 [dB] = 40 [dBm] \quad (63)$$

Sustituyendo (7) y (2) en la ecuación PL:

$$PL = EIRP [dBm] + G_{RX} - P_{RX} = 40 [dBm] + 15 [dB] + 98.14 [dBm] =$$

$$153.14 [dBm] \quad (64)$$

Con el resultado (64) es posible igualar a la siguiente ecuación y despejar el valor d:

$$PL = A + 10\gamma \log \left(\frac{d}{d_0} \right) + s + C_f + C_h$$

$$153.14 [dBm]$$

$$= 83.32 [dB] + 10(4.1575 [dB]) \log \left(\frac{d}{100m} \right) + 10.6 [dB] + 1.5925 [dB]$$

$$- 5.548 [dB] \quad (65)$$

Finalmente, despejando:

$$d = 3309.2 [m] \approx 3.309 [Km] \quad (66)$$

- **Condiciones de terreno A**

Para los demás perfiles WiMAX, se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 20. Cobertura WiMAX para terreno tipo A

Modulación y tasa de codificación		SNR [dB] recibida	PRX[dBm]	PL [dBm]	d[m]
BPSK	1/2	6.4	-98.147	153.147	3309.2
QPSK	1/2	9.4	-95.147	150.147	2802.6
	3/4	11.2	-93.347	148.347	2536.7
16-QAM	1/2	16.4	-88.147	143.147	1901.9
	3/4	18.2	-86.347	141.347	1721.5
64-QAM	2/3	22.7	-81.847	136.847	1341.7
	3/4	24.4	-80.147	135.147	1221.2

De forma esquemática:

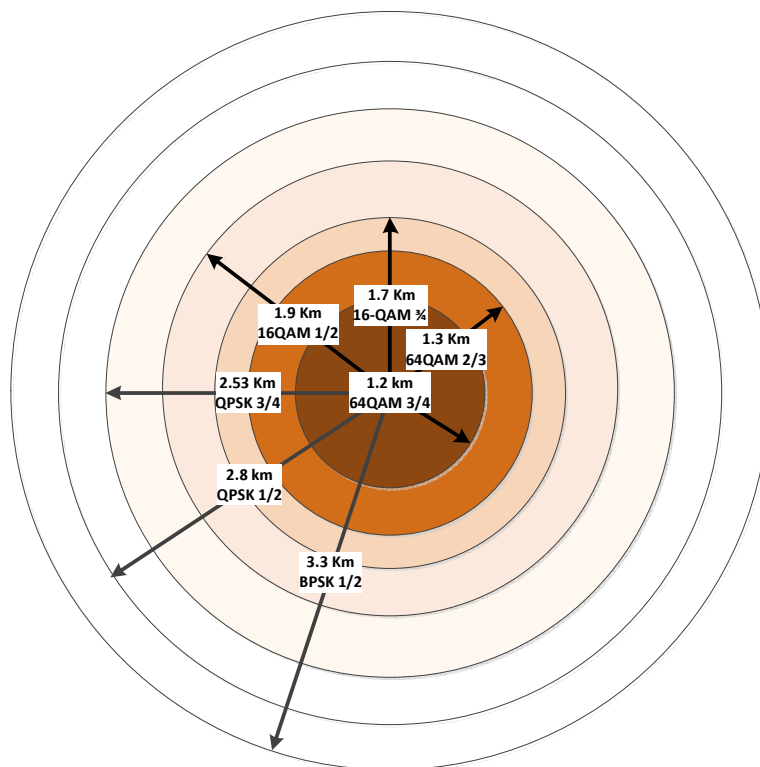


Figura 7.1. Cobertura WiMAX Escenario A

- **Condiciones de terreno B**

Tabla 21. Cobertura WiMAX para terreno tipo B

Modulación y tasa de codificación		SNR [dB] recibida	PRX[dBm]	PL [dBm]	d[m]
BPSK	1/2	6.4	-98.147	153.147	5138.9
QPSK	1/2	9.4	-95.147	150.147	4262.2
	3/4	11.2	-93.347	148.347	3809.7
16-QAM	1/2	16.4	-88.147	143.147	2754.8
	3/4	18.2	-86.347	141.347	2462.3
64-QAM	2/3	22.7	-81.847	136.847	1859.9
	3/4	24.4	-80.147	135.147	1672.9

- **Condiciones de terreno C**

Tabla 22. Cobertura WiMAX para terreno tipo C

Modulación y tasa de codificación		SNR [dB] recibida	PRX[dBm]	PL [dBm]	d[m]
BPSK	1/2	6.4	-98.147	153.147	6782.3
QPSK	1/2	9.4	-95.147	150.147	5551.6
	3/4	11.2	-93.347	148.347	4923.2
16-QAM	1/2	16.4	-88.147	143.147	3479.5
	3/4	18.2	-86.347	141.347	3085.7
64-QAM	2/3	22.7	-81.847	136.847	2285.1
	3/4	24.4	-80.147	135.147	2040.0

7.3 ANÁLISIS WiFi

Para este análisis se hará uso del modelo empírico desarrollado para ambientes externos *Outdoor* basado en [23] y [24] denominado *Long-Distance Path Loss Model*. De forma similar al caso de WiMAX, el término denominado *Path Loss Exponent* (en este caso denominado *n*) permite introducir en el cálculo la forma en que la señal es afectada por diversos objetos y ambientes.

Tabla 23. Modelo de propagación para WiFi [22]

Variable	Expresión matemática	Parámetros
<i>Path Loss</i>	$PL = P_L(d_0) + 10 \cdot n \cdot \log \left[\frac{d}{d_0} \right]$	$d > d_0$ $d_0 = 1[m]$

Path loss dependent of distance	$P_L(d_0) = 20 \log\left(\frac{4\pi d_0}{\lambda}\right), \quad \lambda = \frac{c}{f}$	$c = 3 \times 10^8 \frac{m}{s}$ n: se obtiene de la Tabla 24
Effective Isotropic Radiated Power (EIRP)	$EIRP[dBm] = P_{TX}[dBm] + G_{TX}[dBi] - L_c[dB]$	Lc: pérdidas en líneas de transmisión y conectores
Potencia recibida	$P_{RX}[dBm] = EIRP[dBm] + G_{RX}[dBi] - PL[dB]$	
Relación señal a ruido (SNR)	$SNR[dB] = P_{TX}[dBm] + G_{TX}[dBi] + G_{RX}[dBi] - PL - N[dBm] - I_m[dB]$	N: ruido térmico $I_m = implementation\ margin = 5$ [dB] G_{TX} : ganancia antena transmisora G_{RX} : ganancia de antena receptora
Ruido térmico (N)	$N[dBm] = 10 \cdot \log(T \cdot BW \cdot K_0) + Nf[dB] + 30$	$T = 290 K$ $K_0 = 1.38 \times 10^{-23} [J/K]$ Bw: ancho de banda en Hz Nf= figura del ruido del receptor

Tabla 24. Path Loss Exponent para diversos ambientes [23]

Ambiente	Path Loss Exponent (n)
Espacio libre	2
Microceldas urbanas	2.7 - 3.5
Macrocelas urbanas	3.7 - 6.5
Edificio de oficinas (mismo piso LOS)	1.6 - 3.5
Edificio de oficinas (múltiples pisos NLOS)	2 - 6
Tiendas	1.8 - 2.2
Fábricas/Visibilidad	1.6 - 3.3
Casa	3

Se llevara a cabo el análisis para tres tipos de ambientes

- a) Área urbana (microceldas urbanas) n=3.1
- b) Área de edificios sin línea de Vista (múltiples pisos) n=4
- c) Fábricas con visibilidad n=2.4

Se considerara la transmisión entre un único transmisor y un receptor, por tanto y sin perder generalidad se considerara que la interferencia y reflexiones (fading) y colisiones pueden despreciarse (no se considera por tanto CSMA/CA).

Se considera la potencia de transmisión establecida por el estándar 802.11g, y parámetros como *Implementation margin*:

$$P_{tx} = 40 [mW] = 16[dBm] [26]$$

$$I_m = 5 \text{ [dB]}$$

$$Nf = 4 \text{ [dB]}$$

$$BW = 20 \text{ [MHz]}$$

$$L_C = 5 \text{ [dB]}$$

Para las ganancias de las antenas, se analizan dos equipos de fabricantes comerciales; para el AP se usa el CiscoAironet 1300, en el cuál también se verifican los parámetros anteriores; y un equipo terminal, en este caso un teléfono Wireless compatible con dicho AP:

Cisco Aironet 1300 Outdoor AP [25]:

$$G_{RX} = 13 \text{ [dBi]}$$

Cisco Unified Wireless IP Phone 7921G: [26]

$$G_{TX} = 2 \text{ [dBi]}$$

Se probará la validez del modelo de propagación tomando en consideración dos variables importantes para el cálculo; por un lado se tomará en cuenta la **sensibilidad del receptor**, que es la potencia mínima que debe detectar (Potencia recibida P_{RX}) para operar en un nivel adecuado para garantizar una tasa de transmisión. Éste parámetro se obtendrá de las hojas de especificaciones del AP que actúa como receptor [26]¹⁹.

Por otro lado, se tomará en cuenta el estudio realizado por Jim Geiger [27], en el que se propone el **valor de la SNR** para distintos niveles de asociación con el AP. En éste caso se hará el cálculo de la potencia recibida, se calculará también el alcance máximo para dichos parámetros y se contrastará con los que se ofrecen en las hojas de especificaciones

Cálculo para ambiente en Área urbana

Se calcula la longitud de onda para la frecuencia en la que se trabajará, que es 2.4×10^9 [Hz]

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \times 10^8 \left[\frac{m}{s} \right]}{2.4 \times 10^9 \text{ [Hz]}} = \mathbf{0.125 [m]} \dots (67)$$

Se calcula el parámetro *Path Loss Dependent of Distance* usando el resultado (1):

$$P_L(d_0) = 20 \log \left(\frac{4\pi(1[m])}{0.125[m]} \right) = \mathbf{40.046 [dB]} \dots (68)$$

¹⁹ Se decidió tomar en cuenta al AP como receptor pues la información que se proporciona en cuanto al alcance es más amplia para el teléfono, con la cual se podrá realizar una comparación más precisa.

Se obtiene el parámetro Path Loss (PL) usando el resultado (2), para el área urbana n toma valores entre 2.7 y 3.5, se toma por tanto un valor promedio $n=3.1$:

$$PL = P_L(d_0) + 10 \cdot n \cdot \log \left[\frac{d}{d_0} \right] = 40.046[dB] + 10(3.1) \log \left[\frac{d}{1m} \right] \dots (69)$$

Se obtiene el valor del ruido térmico:

$$\begin{aligned} N &= 10 \cdot \log(T \cdot BW \cdot K_0) + Nf[dB] + 30 \\ &= 10 \log \left(290[K] \cdot 20 \times 10^6[Hz] \cdot 1.38 \times 10^{-23} \left[\frac{J}{K} \right] \right) + 4[dB] + 30 \\ N &= -96.96[dBm] \dots (70) \end{aligned}$$

Una vez hechos los cálculos anteriores, se procederá a verificar la validez del modelo de propagación elegido tomando como referencia algunos de los valores obtenidos en las hojas de especificaciones de los equipos.

1. Sensibilidad del receptor como variable independiente

La relación señal a ruido para la e potencia recibida más alta (54 Mbps) se obtiene sustituyendo (4) y el valor *Implementation margin*:

$$\begin{aligned} SNR &= P_{TX}[dBm] + G_{TX}[dBi] + G_{RX}[dBi] - Lc[dB] - PL - N[dBm] - I_m[dB] \\ &= P_{RX}[dB] - N[dBm] - I_m[dB] \end{aligned}$$

$$SNR[dB] = -72[dBm] - (-96.96)[dBm] - 5[dB] = 24.96[dB] \quad (71)$$

De la expresión para potencia recibida:

$$\begin{aligned} P_{RX}[dBm] &= EIRP[dBm] + G_{RX}[dBi] - PL[dB] = \\ &P_{TX}[dBm] + G_{TX}[dBi] - Lc[dB] + G_{RX}[dBi] - PL[dB] \end{aligned}$$

Sustituyendo los valores indicados, para el valor más alto de potencia (54 Mbps):

$$\begin{aligned} -72[dBm] &= \\ 16[dBm] + 2[dBi] - 5[dB] + 13[dBi] - \left(40.046[dB] + 10(3.1) \log \left[\frac{d}{1m} \right] \right) [dB] \end{aligned}$$

Despejando el valor de la distancia:

$$d = 71.80[m] \approx 72[m] \quad (72)$$

Los resultados para los tres ambientes descritos son:

Tabla 25. Resultados de cobertura WiFi 1

SNR [dB]	Prx [dBm]	Tasa de transmisión [Mbps]	Área urbana d (n=3,1)	Edificios NLOS d (n=4)	Fábricas d (n=2,4)
1,96≈2	-90,00	6	273,38	77,36	1404,43
7,96≈ 8	-89	9	253,81	73,03	1275,95
10,96≈11	-86	12	203,11	61,45	956,83
12,96≈ 13	-84	18	175,08	54,76	789,77
15,96≈ 16	-81	24	140,10	46,08	592,24
19,96≈ 20	-77	36	104,09	36,60	403,49
23,96≈ 24	-73	48	77,34	29,07	274,89
24,96≈ 25	-72	54	71,80	27,45	249,75

De forma grafica, para el ambiente área urbana la relación entre SNR, modulación y distancia se muestra en la figura:

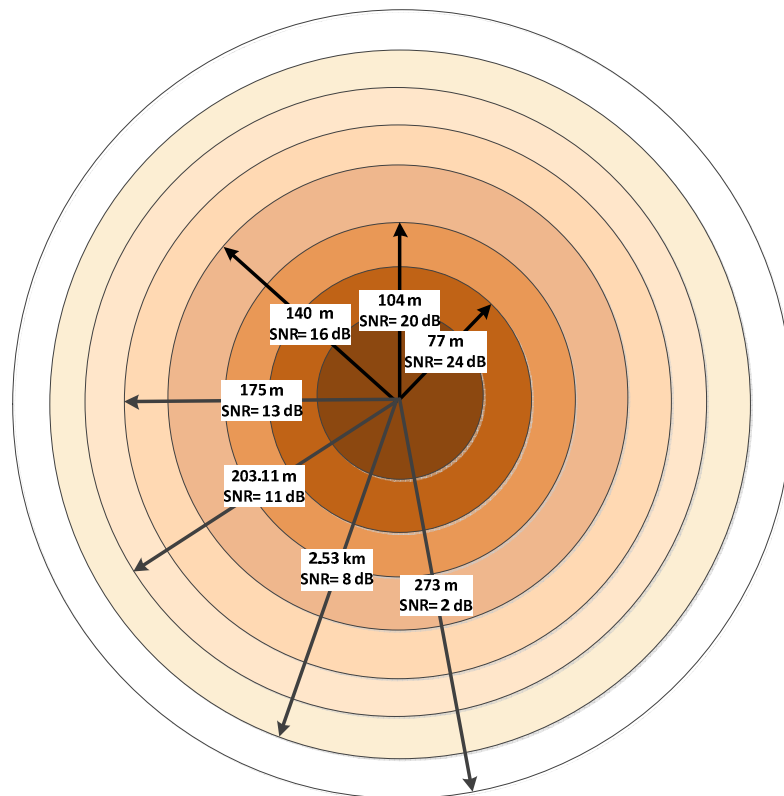


Figura 7.3. Cobertura de WiFi para escenario Urbano

De la tabla se observa que la relación señal a ruido obtenida tiene valores poco aceptables para servicios como voz que exigen una SNR de 25 dB, y aun incluso con los 20 dB para al menos, poder conectarse con el AP [27].

La cobertura que se obtiene utilizando los parámetros ya mencionados, es coherente en los casos a y b (áreas urbanas y edificios sin LOS), pues en la práctica se pueden verificar de forma empírica. Sin embargo, el resultado obtenido para el caso de fábricas (caso C) es muy grande en comparación con los datos reales, en los que la cobertura está muy limitada.

De acuerdo con las hojas de especificaciones para el transmisor (*Cisco Unified Wireless IP Phone 7921G*), se obtiene coberturas de 120 m para 54 Mbps y 220m a 6 Mbps [26]. Los resultados obtenidos para el caso de aéreas urbanas sí corresponden de forma aceptable con los datos proporcionados por el fabricante, sin embargo, para los casos b y c los rangos están muy lejanos.

En éste caso la diferencia puede deberse a que el fabricante no esta tomando en cuenta ciertos factores como la atenuación en función de distancia (*Path Loss*) ni el *Path Loss Exponet* que depende de un ambiente en particular; así como las ganancias de antenas, el *implementation margin* y demás factores atenuantes de la señal.

2. Relación señal a ruido SNR como variable independiente

De forma similar al caso anterior; se calculará ahora la potencia que se recibe (sensibilidad del receptor) y una vez obtenido este valor se procede a calcular la distancia máxima o alcance para cada escenario;

$$SNR = P_{RX} [dB] - N[dBm] - I_m[dB] \Rightarrow$$

$$P_{RX}[dBm] = SNR[dB] + N[dBm] + I_m[dB]$$

Sustituyendo valores para el valor más alto de SNR (40 dB):

$$P_{RX}[dBm] = SNR[dB] + N[dBm] + I_m[dB]$$

$$P_{RX}[dBm] = 40[dB] + (-96.96)[dBm] + 5[dB] = - 51.96 [dBm] \quad (73)$$

De esta forma se obtiene la distancia para cada uno de los ambientes deseados, en este caso se utiliza $n = 3.1$:

$$-51.96[dBm] = 16[dBm] + 2[dBi] - 5[dB] + 13[dBi] - \left(40.046[dB] + 10(3.1)\log\left[\frac{d}{1m}\right]\right)[dB]$$

Despejando el valor de la distancia:

$$d = 16.21 [m] \approx 16[m] \quad (74)$$

Los resultados para los tres ambientes descritos son:

Tabla 26. Resultados de cobertura WiFi 2

SNR [dB] ²⁰	Prx [dBm]	Tasa de transmisión [Mbps]	Área urbana d (n=3,1)	Edificios NLOS d (n=4)	Fábricas d (n=2,4)
5	-86,96	6	218,13	64,94	1049,14
10	-81,96	9	150,46	48,70	649,38
15	-76,96	12	103,78	36,52	401,95
25	-66,96	18	49,38	20,54	153,99
25	-66,96	24	49,38	20,54	153,99
25	-66,96	36	49,38	20,54	153,99
30	-61,96	48	34,06	15,40	95,32
40	-51,96	54	16,21	8,66	36,52

Se obtiene resultados muy similares que en el punto número 1, de igual forma, el que más se aproxima a los valores proporcionados por el fabricante es el caso de área urbana; en cuanto a los dos casos restantes para Área de edificios NLOS los resultados son aproximados a los que se obtienen en la práctica.

Para ambientes especificados como fábricas los primeros valores (6 a 12 Mbps con 1.05 Km, 650 m 401 m) no corresponden a los obtenidos en la realidad, pues la cobertura de WiFi es en verdad limitada y difícilmente se alcanzan cientos de metros de cobertura; sin embargo se acercan a los especificados en el AP Cisco Aironet 1300 usado como AP Outdoor (105 m a 54 Mbps y 430 m a 11 Mbps).

²⁰ Se toman del artículo [27], se repite para las modulaciones intermedias.

7.4 CONCLUSIONES

Después de analizar los resultados obtenidos en el presente estudio, fue posible comprobar que WiMAX tiene una cobertura muy superior a la de las redes de área local pues está en el orden de km (el máximo obtenido en el estudio fue cercano a 7 km); mientras que WiFi lo hace en el orden de metros (hasta 200 m aproximadamente).

Se pudo comprobar que para los ambientes en los que hay más obstrucciones como es el caso de ambientes urbanos y con alta densidad de árboles, el valor del Path Loss aumenta, ocasionando una disminución de la cobertura respecto de ambientes planos donde los obstáculos no generan grandes pérdidas a la señal por esparcimiento (fading), absorción o atenuación). **Para WiMAX se obtuvo una cobertura de hasta 3km y para WiFi de hasta 280m** como máximo en este tipo de ambiente.

Lo mismo ocurre para los ambientes sin línea de vista. En el caso de WiFi, la cobertura obtenida fue mayor que para ambientes urbanos obteniéndose resultados máximos de **78 m frente a los 270 m** ya mencionados para el ambiente urbano. Para WiMAX, este valor aumenta respecto del área con baja densidad de árboles, pues la densidad de éstos disminuye, llegando a una cobertura **de 5.13 km**.

Para los ambientes con pocas obstrucciones, la cobertura aumenta considerablemente en comparación con los tipos de terreno anteriores, en WiFi alcanza hasta 1.5 Km de forma teórica, lo cual en la práctica no es muy congruente, pues aunque el terreno contenga pocas obstrucciones, difícilmente se alcanzan cientos de metros como máxima cobertura. Para el caso de WiMAX, el valor máximo está en el orden de los 6.8 km., valor que resulta muy atractivo tomando en cuenta los resultados de WiFi y las ventajas que WiMAX ofrece.

Capítulo 8.

Conclusiones finales

8.1 CONCLUSIONES GENERALES

Con la realización del presente trabajo fue posible analizar dos tecnologías de acceso inalámbrico, cuya diversidad de aplicaciones y características, las han colocado como líderes en el mercado o como una excelente opción para brindar más servicios de Internet en mercados poco explorados.

El estudio llevado a cabo en relación con la eficiencia volumétrica resulta útil debido a que constituye una forma de conocer la capacidad real que tiene el canal inalámbrico cuando se habla de la transmisión de datos útiles (de usuario), pues como se ha podido comprobar, los datos adicionales que se usan como parámetros de control o indicadores (el caso más común del *overhead*) directamente y en una forma importante al rendimiento de la red.

Se pudieron obtener datos importantes acerca de los factores que influyen en la obtención de la eficiencia volumétrica como un indicador, los más importantes son el tamaño de la cadena de datos, el tamaño de la MTU para fragmentar los datos y la tasa de codificación que se use, pues de ella depende en gran medida la cantidad de datos adicionales que se colocan en el canal inalámbrico.

Se comprobó que ambas tecnologías presentan una eficiencia volumétrica muy similar, lo cual se ve influido en gran medida por los perfiles de usuario que ambos manejan, pues estos son idénticos (tomando en cuenta la tasa total de codificación en el caso de WiMAX); pues como resultado final se obtuvo que para WiFi los datos de usuario constituyen el 71% de la capacidad del canal, y en el caso de WiMAX un 73%, usando ambos el perfil más eficiente (64-QAM CC $\frac{3}{4}$).

De los resultados anteriores, se concluye a pesar de ser tecnologías con una capacidad similar de transmitir datos de usuario debido a sus especificaciones técnicas y propósitos, son tecnologías muy distintas, pues mientras WiMAX ofrece como grandes ventajas la posibilidad de ofrecer una mayor cobertura con verdadera calidad de servicio, WiFi se perfila como una tecnología que continuará con una fuerte presencia en el mercado en los próximos años debido a su bajo costo y fácil instalación.

El futuro más prometedor, por tanto para ambas tecnologías es convertirse en complementarias mediante el uso de *backhauling*, que permitirá aprovechar las grandes ventajas de la amplia cobertura de WiMAX para que AP's por ejemplo, lleven el servicio a mercados con poca penetración de servicios de tecnologías de información y distribuirlo en zonas más pequeñas a través de AP's WiFi como son edificios o zonas públicas.

En cuanto al estudio de cobertura que se realizó, se puso de manifiesto que la cobertura de WiMAX es muy superior a la que ofrece WiFi; lo cual es debido a factores como la potencia de transmisión, y las pérdidas registradas durante en enlace. Para WIMAX se obtuvieron resultados en el orden de Kilómetros en todos los escenarios propuestos, siendo el escenario C (con poca densidad de árboles) el que presenta un mayor alcance, de aproximadamente 6.7 km.

En los modelos de propagación usados, denominados dependientes de la distancia, el factor más importante y que arroja resultados útiles es el *Path Loss Exponent*; pues sus valores determinados de forma experimental permiten realizar cálculos más realistas tomando en cuenta algunos aspectos como obstáculos naturales o artificiales que afectan a las señales de radio pues producen efecto indeseados como desvanecimientos, atenuación, multitraectorias y demás fenómenos que afectan la calidad de la señal disminuyendo su alcance.

Se comprobó que para los ambientes con pocos obstáculos, el valor del *Path Loss Exponent* disminuye y por tanto la cobertura aumenta, en contraste con los ambientes congestionados y con obstáculos, que limitan la cobertura. Por ultimo, se comprobó

8.2 TRABAJO FUTURO

Como una mejora al presente trabajo, se podría hacer estudios de eficiencia volumétrica involucrando una pila de protocolos más amplia, por ejemplo, incluyendo a Ethernet como un protocolo de capa de enlace de datos. De esta forma se podría tener resultados aun más precisos acerca la cantidad adicional de información presente en el enlace.

De igual forma, los estudios de cobertura podrían complementarse don modelos de propagación más completos que incluyan parámetros más complejos y un mayor número de variables de tal forma que el resultado sea más preciso. Así mismo, se podría complementar con estudios reales realizados con mediciones en equipo, de tal forma que se pudiese obtener una validación de los resultados obtenidos a través del modelo teórico.

APÉNDICE A

Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS)

A.1 Introducción

Las técnicas de espectro ensanchado o espectro esparcido son técnicas de transmisión usadas en telecomunicaciones que permiten transmitir datos digitales principalmente mediante interfaces aéreas.

Se basa en el ensanchamiento de la señal a lo largo de una banda de frecuencias muy ancha mucho mayor al que originalmente tiene la señal y en la que se pueden transmitir los datos. Una vez que se han ensanchado se presentan como rudo distribuida en toda la banda de frecuencia. Lo anterior se lleva a cabo procesando a la señal original con una función independiente del mensaje, la cual debe ser conocida por el receptor.

Estas técnicas se describieron de forma teórica por una actriz de Hollywood llamada Hedy Lamarr y el pianista George Antheil en. Describieron un enlace de radio seguro para control de torpedos 1941 (muy influenciado por la Segunda Guerra Mundial) en el que se describía el control de torpedos haciendo cambiar la frecuencia de forma constante, lo que impedirá que se pudiera intervenir.

Una aplicación típica fue en los transceptores de corto alcance incluían sistemas de posicionamiento satelital (GPS), comunicaciones móviles 3G, WLAN y Bluetooth. Su éxito reside en el buen aprovechamiento del ancho de banda pues este tipo de tecnologías requieren el uso de espectro licenciado, lo cual resulta sumamente caro pues es un recurso limitado.

A3. Definición

Existen diferentes tecnologías de espectro ensanchado (SS), pero todas tienen en común la siguiente idea: la clave o secuencia de código, insertada en el canal de comunicación. La forma de insertar este código es la que define que tipo de técnica SS se está usando. Como ya se mencionó, el término "Spread Spectrum" o espectro ensanchado, se refiere a la expansión del ancho de banda de la señal, incluso hasta en varios órdenes de magnitud, lo cual ocurre cuando la secuencia de código es insertada [13].

Es un sistema de RF (Radio Frecuencia) en el cual el ancho de banda de la señal en banda base es esparcido de forma intencional a lo largo de un ancho de banda más grande inyectando una señal de frecuencia mayor.

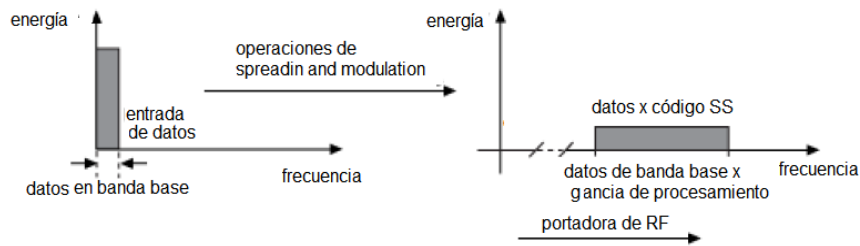


Figura 1. Ensanchamiento de la señal

Como se observa en la figura 1, la energía usada para transmitir dicha señal se distribuye en todo el ancho de banda semejando ruido. La diferencia (en dB) entre la señal esparcida y la original se denomina Ganancia de procesamiento, la cual típicamente está entre 10 y 60 dB.

Para aplicar una técnica de SS, se debe de introducir el correspondiente código SS (lo cual se denomina spreading) en la cadena de transmisión antes de las antena receptora. Y de forma inversa, mediante la operación de de-spreading el *código SS* es retirado en la cadena receptora reconstruyendo la información original.

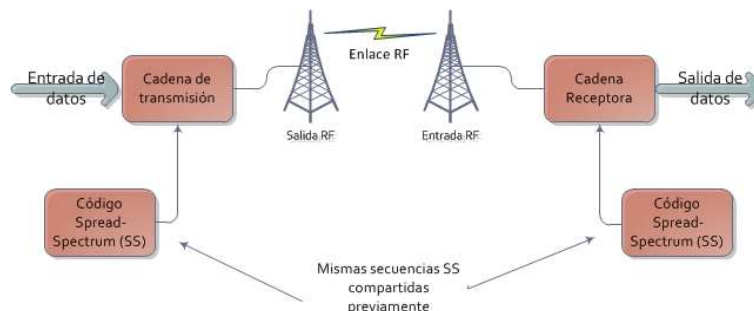


Figura 2. Diagrama de bloques de sistema SS

Al mismo tiempo, el hecho de que la señal ocupe un ancho de banda grande no limita el uso del espectro, se compensa con la posibilidad de compartirlo entre varios usuarios.

A4. Ventajas de las técnicas SS [11]

- La más importante de las es la resistencia a la interferencia y señales *jamming*²¹, las cuales son rechazadas pues no contiene el código SS (*key*). Sólo la señal deseada (la que contiene el código SS), será vista por el receptor al efectuar la operación de de-spreading.

²¹ Señales que impiden intencionalmente la recepción de las señales deseadas.

- Se puede ignorar el ruido, ya sea el que está presente en una banda angosta o en banda ancha, debido a la misma razón, no contiene el código SS. Así mismo, puede haber varias transmisiones activas con diferente técnica SS en la misma banda.
- También presentan resistencia al espionaje, pues quienes deseen escuchar las transmisiones sin autorización al no poseer el código no podrán decodificar la información, parecería solamente ruido para dichos receptores, además de que pueden colocarse por debajo del nivel de ruido pues se disminuye la densidad espectral al aplicar SS. Entonces el mensaje resultaría invisible.

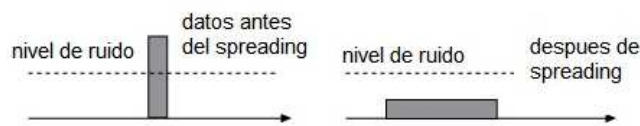


Figura 3. Señal de banda angosta y señal SS

- Resistencia a efectos multirayectoria los cuales son causados por objetos o condiciones atmosféricas, pues las señales reflejadas, a pesar de contener el código, pueden ser rechazadas para no interferir con las señales directas. Algunos métodos sí efectúan en dichas señales el proceso de de-spread y se agrega dicho contenido a la señal principal.

A5. Códigos Spread Spectrum (keys)

La parte más importante de estas técnicas es la presencia de código SS (o Key), el cual debe ser conocido por el transmisor y receptor.

Dichos códigos son secuencias digitales que deben ser tan largas y aleatorias como sea posible e tal forma que tengan apariencia de ruido. Sin embargo, deben ser totalmente reproducibles o el receptor no podrá extraer los datos que han sido enviados. Dichas secuencias son conocidas como *pseudoaleatorias (PSN Pseudo-random number)*. Para generarlas, el método más usado es utilizando un registro de corrimiento con retroalimentación.

Para garantizar la comunicación eficiente de espectro ensanchado; las secuencias PRN deben respetar ciertas normas, como la longitud, auto correlación, correlación cruzada, ortogonalidad y el equilibrio de los bits.

Apéndice B

Técnicas de Modulación

B1. Introducción

Las técnicas de modulación digital tienen como objeto adaptar la información digital al medio radioeléctrico. Para ello es necesario colocar la información en señales senoidales en el orden de microondas que puedan ser colocadas en el medio de transmisión, en este caso, en el aire.

En las modulaciones digitales, una señal senoidal analógica es modulada por una cadena de bits, lo cual podría ser considerado como una conversión digital/analógica. Los cambios en la señal portadora son escogidos entre un número finito de símbolos conocido como alfabeto.

Las formas más comunes de modulación digital son:

- Modulación por corrimiento de frecuencia *FSK (frequency-shift keying)*,
- Modulación por corrimiento de fase *PSK (phase-shift keying)*
- Modulación por amplitud *ASK (amplitude-shift keying)*.
- Modulación de amplitud en cuadratura *QAM (quadrature amplitude modulation)*

B2. FSK (Frequency-Shift Keying) [15]

Se usan dos frecuencias de ondas senoidales para representar los 1's y 0's lógicos, las cuales se transmiten con alternancias para crear los datos binarios seriales. Bajo esta nomenclatura, el 1 se denomina frecuencia de marca y el 0 frecuencia de espacio.

La señal resultante se parece a la siguiente figura, en ella, se usaron las frecuencias de 1070Hz y 1270 Hz para llevar a cabo la modulación:

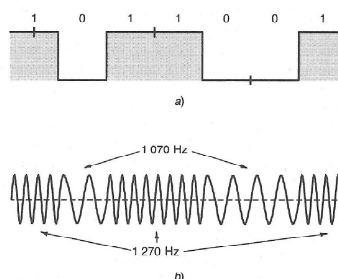


Figura 1. Modulación FSK a) señal binaria, b) señal FSK

B3. PSK (phase-shift keying)

En este tipo de modulación, la señal binaria que se transmitirá cambia el ángulo de fase de un carácter de onda senoidal. Dependiendo si se va a transmitir un 1 o 0 binario, es decir, se hace un corrimiento de fase lo que equivale a una diferencia de tiempo entre las dos señales senoidales de igual frecuencia. El máximo desplazamiento de fase es 180°.

La figura ilustra el caso más sencillo de PSK, el corrimiento binario **BPSK (Binary phase-shift keying)**, durante el tiempo que se transmite un 1, la señal tiene una fase, y cuando se transmite un 0 binario la portadora se transmite común un corrimiento de fase de 180°.

La constelación que establece el estándar 802.11 para PHY OFDM es la siguiente

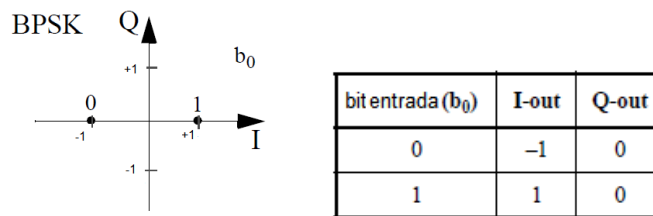


Figura 3. Constelación 802.11

B4. QPSK (Quadrature Phase-Shift Keying)

Esta modulación surge como una forma de aumentar la tasa de transmisión de datos sin aumentar en ancho de banda requerido, pues es posible codificar más de un bit por cambio de fase. Hay un cambio de símbolo por cada cambio de bit con BPSK. Para cada corrimiento de fase se especifican dos bits, de manera que cada desfase represente un símbolo constituido por n bits.

De esta forma, QPSK o 4-PSK permite codificar 2^n bits por cada cambio de fase, en este caso $2^2 = 4$, por lo que cada símbolo contiene dos bits. Cada par de bits corresponde a una fase (4 fases) por tanto hay 90° entre cada cambio de fase. La figura 4 muestra la constelación y tabla de asignación de fases para una modulación QPSK:

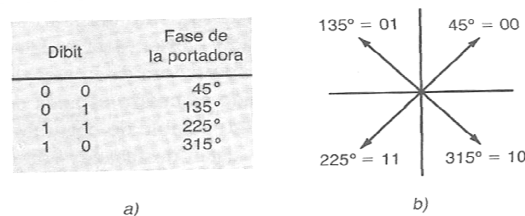


Figura 4: a) ángulo de fase de portadora para cada par de bits; b) constelación

La figura 5 muestra la constelación QPSK usada en el estándar 802.11 para la capa PHY OFDM:

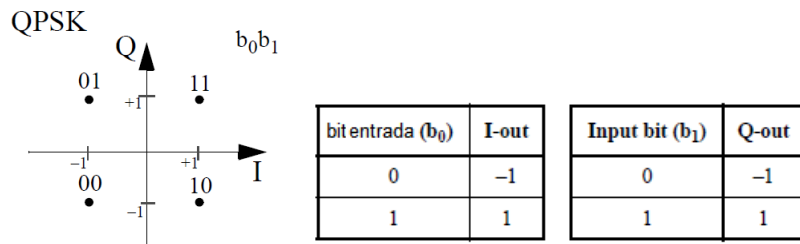


Figura 5. Constelación QPSK en 802.11

B4. QAM (Quadrature Amplitude Modulation)

Es una modulación muy popular que incrementa de forma notable la cantidad de datos por símbolo que se transmiten en el mismo ancho de banda. En esta modulación se hace variar la amplitud y la fase de la señal portadora para codificar la señal.

Por ejemplo, en 8-QAM hay 4 desfases como en QPSK, sin embargo, hay también dos diferentes amplitudes de portadora. Por tanto son 8 los diferentes estados que se obtienen con 3 bits por cada símbolo ya que $2^3 = 8$. Cada palabra binaria de 3 bits usa una combinación diferente de fase y amplitud.

Así mismo, existen otras modulaciones que se definen para el estándar 802.11, como son 16-QAM y 64-QAM, las cuales operan bajo el mismo principio. La modulación 16-QAM representa 16 estados diferentes, con 4 bits por símbolo y 4 amplitudes distintas. La modulación 64-QAM codifica 6 bits por símbolo y representa 64 estados diferentes, con 16 amplitudes distintas.

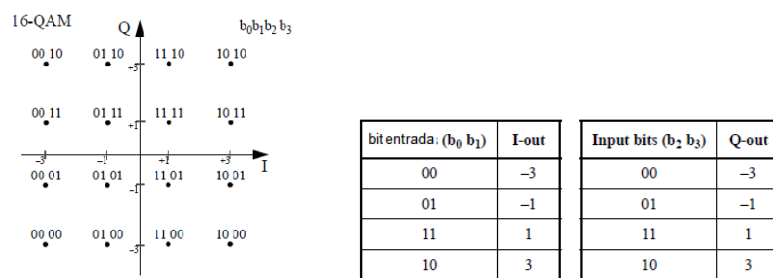


Figura 6. Modulación 16-QAM para el estándar 802.11

Apéndice C

Código en Matlab

WIMAX

```

close all;
clear all;
global muestras PL,
payloadIP,payloadMAC,payloadPHY,eficienciaTCP,eficienciaIP,eficienciaMAC,eficienciaPHY,encapsulaTCP,encapsulaIP,
encapsulaMAC,encapsulaPHY

min=0; %número minimo de bytes utiles
max=10800; %número maximo de bytes utiles
paso=64; %espaciado entre bytes
muestras=ceil((max-min)/paso); %número de muestras a graficar para payload
PL= zeros(muestras,1);

payloadIP=zeros(muestras,1); %recibira el resultado de la funcion ef_volTCP y sera el payloadIP
payloadMAC=zeros(muestras,1); %recibira el resultado de la funcion ef_volIP y sera el payloadMAC
payloadPHY=zeros(muestras,1); %recibira el resultado de la funcion ef_volIMAC y sera el payloadPHY

eficienciaTCP=zeros(muestras,1); %recibira el resultado de la efi vol TCP
eficienciaIP=zeros(muestras,1); %recibira el resultado de la efi vol IP
eficienciaMAC=zeros(muestras,1); %recibira el resultado de la efi vol MAC
eficienciaPHY=zeros(muestras,1); %recibira el resultado de la efi vol PHY

encapsulaTCP=zeros(muestras,2); %recibira el resultado de la efi vol TCP
encapsulaIP=zeros(muestras,2); %recibira el resultado de la efi vol IP
encapsulaMAC=zeros(muestras,2); %recibira el resultado de la efi vol MAC
encapsulaPHY=zeros(muestras,6); %recibira el resultado de la efi vol PHY

for(i=1:muestras)
    PL(i,1)=i*paso; %valores del payload
end

encapsulaTCP=ef_volTCP(PL,muestras); %ejecuta script ef_volTCP que retorna en un arreglo efvol y payloadIP

for (i=1:muestras)
    eficienciaTCP(i,1)=encapsulaTCP(i,1).*100; %recupera valores de eficiencia
    payloadIP(i,1)=encapsulaTCP(i,2); %recupera valores PayloadIP
end

figure
title('EFICIENCIA VOLUMETRICA WIMAX')
plot(PL,eficienciaTCP)
xlabel('Tamaño de la carga útil [bytes]')
ylabel('Eficiencia volumétrica [%]')
axis([0 10000 40 110])
hold on;

encapsulaIP=ef_volIPmodif(payloadIP,muestras,PL); %ejecuta script para eficiencia vol IP

for (i=1:muestras)

```

```

    eficienciaIP(i,1)=encapsulaIP(i,1).*100;
    payloadMAC(i,1)=encapsulaIP(i,2);
end

plot(PL,eficienciaIP,'r')

encapsulaMAC=ef_volMAC_wimax(payloadMAC,muestras,PL); %ejecuta script para ef volum MAC en wimax
hold on;

for (i=1:muestras)
    eficienciaMAC(i,1)=encapsulaMAC(i,1).*100;
    payloadPHY(i,1)=encapsulaMAC(i,2);
end

plot(PL,eficienciaMAC,'g')
hold on;

encapsulaPHY=ef_volPHYwimax(payloadPHY,muestras,PL); %ejecuta script para ef volum PHY en wimax

for (i=1:muestras)
    eficienciaPHY(i,1)=encapsulaPHY(i,5).*100;
    payloadPHY(i,1)=encapsulaPHY(i,3)*100;
end

plot(PL,eficienciaPHY,'m')
hold on;

plot(PL,payloadPHY)
hold on;

```

```

function eficiencia_MAC=ef_volMACwifi(payloadMAC,muestras,PL)

HD_MAC=34; %Bytes/octetos para el encabezado (2+2+6*4+2=30)+ FCS(4)

eficiencia_IP=zeros(muestras,2);

for(i=1:muestras)

    encapsulado=payloadMAC(i,1)+HD_MAC; %encapsulamiento de la trama inicial
    eficiencia_MAC(i,1)=PL(i,1)/encapsulado; %eficiencia
    eficiencia_MAC(i,2)=encapsulado;
end

```

```

function eficiencia_PHY=ef_volPHYwifi(payloadPHY,muestras,PL)

```

```

    data_rate=9; %in mbps
    rateBPS=data_rate*1000000;
    coding_rate=3/4;
    Ncbps=288; %[bits]
    Ndbps=216; %[bits]

    eficiencia_PHY=zeros(muestras,6);
    n=120;
    k=108;
    m=6; %no de bits por simbolo

```

```

for(i=1:muestras)
    LENGTH=payloadPHY(i,1);
    eficiencia_PHY(i,1)=LENGTH;
    RS=ceil(LENGTH/k*n);
    eficiencia_PHY(i,2)=RS;
    eficiencia_PHY(i,3)=PL(i,1)/RS;
end
return;
    
```

WIFI

global muestras PL

```

min=0; %número mínimo de bytes utiles
max=10800; %número máximo de bytes utiles
paso=64; %espaciado entre bytes
muestras=ceil((max-min)/paso); %número de muestras a graficar para payload
PL= zeros(muestras,1);
    
```

```

for(i=1:muestras)
    PL(i,1)=i*paso; %valores del payload
end
    
```

```

encapsulaTCP=ef_volTCP(PL,muestras); %ejecuta script ef_volTCP que retorna en un arreglo efvol y payloadIP
    
```

```

for (i=1:muestras)
    eficienciaTCP(i,1)=encapsulaTCP(i,1).*100; %recupera valores de eficiencia
    payloadIP(i,1)=encapsulaTCP(i,2); %recupera valores PayloadIP
end
    
```

```

figure(1)
plot(PL,eficienciaTCP)
xlabel('Tamaño de la carga útil [bytes]')
ylabel('Eficiencia volumétrica ')
axis([0 10000 30 102])
hold on;
    
```

```

encapsulaIP=ef_volIPmodif(payloadIP,muestras,PL); %ejecuta script para eficiencia vol IP
    
```

```

for (i=1:muestras)
    eficienciaIP(i,1)=encapsulaIP(i,1).*100;
    payloadMAC(i,1)=encapsulaIP(i,2);
end
    
```

```

plot(PL,eficienciaIP,'r')
    
```

```

encapsulaMAC=ef_volMACwifi_modif(payloadMAC,muestras,PL); %ejecuta script para ef volum MAC en wifi
hold on;
    
```

```

for (i=1:muestras)
    eficienciaMAC(i,1)=encapsulaMAC(i,1).*100;
    payloadPHY(i,1)=encapsulaMAC(i,2);
end
    
```

```

plot(PL,eficienciaMAC,'g')
    
```

```

hold on;

encapsulaPHY=ef_volPHYwifi_modif(payloadPHY,muestras,PL); %ejecuta script para ef volum PHY en wifi

for (i=1:muestras)
    eficienciaPHY(i,1)=encapsulaPHY(i,1).*100;
    %eficienciaPHY(i,2)=PL(i,1);
end

plot(PL,eficienciaPHY,'m')

```

```

function eficiencia_MAC=ef_volMACwifi(payloadMAC,muestras,PL)

HD_MAC=34; %Bytes/octetos para el encabezado (2+2+6*4+2=30)+ FCS(4)
eficiencia_IP=zeros(muestras,2);

for(i=1:muestras)

    encapsulado=payloadMAC(i,1)+HD_MAC; %encapsulamiento de la trama inicial
    eficiencia_MAC(i,1)=PL(i,1)/encapsulado; %eficiencia
    eficiencia_MAC(i,2)=encapsulado;
end

return;

```

```

function eficiencia_PHY=ef_volPHYwifi(payloadPHY,muestras)

data_rate=9; %in mbps
rateBPS=data_rate*1000000;
coding_rate=3/4;
Ncbps=288; %[bits]
Ndbps=216; %[bits]

PLCPpreamble=(12*Ncbps);%12simbolos*Ndbps es decir bits, codificados?????????????????' según si pporq dice que se
codif según la tasa
PLCPheader=24; %24 bits=3bytes NO CODIFICADOS

eficiencia_PHY=zeros(muestras,2);
NsymNC=0;
NdataC=0;
LENGTH=0;

for(i=1:muestras)

    LENGTH=payloadPHY(i,1). *8;
    NsymNC=ceil((16+LENGTH+6)/Ndbps); %calcula el número de simbolos del campo DATA en funcion de la long de la
trama MAC y sin codificar
    NdataC=(NsymNC*Ncbps); %calcula el número de bits codificados por simbolo
    bitsPHY=PLCPpreamble+PLCPheader+NdataC; %número de bITS en capa fisica codificados
    eficiencia_PHY(i,1)=LENGTH/bitsPHY; %eficiencia
    eficiencia_PHY(i,2)=ceil(bitsPHY./8); %tamaño en bytes de la cadena PHY

end
return;

```

Glosario

MTU (Maximum Transport Unit): se refiere al tamaño en bytes de la unidad de datos más grande que puede enviarse usando un protocolo de redes de datos.

Protocolo Orientado a conexión: es aquel en el que se identifica el flujo de tráfico con un identificador de conexión en lugar de utilizar explícitamente las direcciones de la fuente y el destino; lo que hace a los conmutadores de red más rápidos. Antes de iniciar la comunicación se verifican determinados datos entre estas lo que supone mayor carga de trabajo a una red.

Protocolo no orientado a conexión: comunicación entre dos puntos finales de una red en los que un mensaje puede ser enviado desde un punto final a otro sin acuerdo previo. El dispositivo en un extremo transmite los datos al otro, sin tener que asegurarse de que el receptor esté disponible y listo para recibir los datos.

Fragmentación: es un mecanismo que permite la interconexión de redes con capacidades de transmisión distintas. Cada uno de los fragmentos puede ser enviado de forma independiente e incluye un campo con la dirección destino y el número de secuencia para ser re ensamblado en el receptor.

WLAN (Wireless Local Area Network): es un sistema de comunicación de datos inalámbrico a través de ondas de radio (tecnología de radiofrecuencia), utilizado para transmitir información de un punto a otro sin necesidad de un medio físico guiado, muy utilizado como alternativa a las redes de área local cableadas. Ejemplo: WiFi.

WMAN (Wireless Metropolitan Area Network): es una clasificación para redes inalámbricas, éstas tiene una cobertura más amplia que las redes locales WLAN. Se basan en el estándar IEEE 802.16 y ofrecen una velocidad total efectiva de 1 a 10 Mbps, con un alcance de 4 a 10 kilómetros.

BWA (Broadband Wireless Access): comprende las tecnologías que proporcionan a los dispositivos portátiles, un acceso inalámbrico de alta velocidad a las redes de datos. Provee la misma conectividad que las tecnologías de acceso de banda ancha alámbricas tales como el xDSL y el cable modem. Utiliza de igual forma radiofrecuencia como medio de transmisión. Ejemplo: WiMAX.

OSI (Open System Interconnection): es el modelo de red descriptivo creado por el ISO, el cual es un marco de referencia para la definición de arquitecturas de interconexión de sistemas de comunicaciones. Se divide en siete capas: física, enlace de datos, red, transporte, sesión, presentación y aplicación, las cuales se asocian a un determinado número de protocolos.

QoS (Quality of Service): es una Medida de desempeño para un sistema de transmisión que refleja la calidad de transmisión y disponibilidad del servicio. Es especialmente importante para ciertas aplicaciones tales como la transmisión de vídeo o voz.

Movilidad: capacidad para conservar activos los servicios y aplicaciones que se tienen activos en una terminal en un cierto espacio geográfico al cambiarse de punto de acceso en una ubicación geográfica distinta incluso a velocidades muy altas.

AP (Access Point): es un dispositivo que interconecta dispositivos de comunicación inalámbrica para formar una red inalámbrica. Normalmente un WAP también puede conectarse a una red cableada, y puede transmitir datos entre los dispositivos conectados a la red cable y los dispositivos inalámbricos. Punto centralizado de acceso.

Backbone: se refiere a las principales conexiones troncales de Internet. Está compuesta de un gran número de ruteadores comerciales, gubernamentales, universitarios y otros de gran capacidad interconectados que llevan los datos a través de países, continentes y océanos del mundo mediante cables de fibra óptica. El término Backbone también se refiere al cableado troncal o subsistema vertical en una instalación de red de área local que sigue la normativa de cableado estructurado.

LOS (Line of Sight): propagación de las ondas electromagnéticas, las cuales viajan en línea directa, es decir, que no existe objeto que las interfiera.

LLC (Local Link Control): constituye la parte más alta de la capa de enlace de datos (capa2) en el modelo OSI. Provee de mecanismos de multiplexión que hacen posible que diferentes protocolos de red coexistan sin un a red multipunto. Y se transporten en el mismo medio; provee control de flujo y señales para la repetición automática así como mecanismos de administración de errores.

SDU (Service Data Unit): es una unidad de datos que al ser pasada a una capa más baja de acuerdo con el modelo OSI y que no ha sido encapsulada todavía en una PDU (Protocol Data Unit) por dicha capa. Son los datos que envía el usuario de los servicios en una dada capa y se transmite de forma sistemática y si cambios a un usuario de servicio del mismo nivel.

PDU (Protocol Data Unit): se utilizan para el intercambio entre unidades del mismo nivel, dentro de una capa del modelo OSI. Existen dos clases: de datos que contiene datos de usuario final, y de control que transportan datos para establecer funcione del protocolo. Esta información ya ha sido encapsulada por tanto en un determinado protocolo.

FCS (Frame Check Sequence): es una trama recibida que tiene una "secuencia" de verificación de trama incorrecta, también conocido como error de CRC o de checksum, difiere de la transmisión original en al menos un bit. En una trama con error de FCS, es probable que la información del encabezado sea correcta, pero la checksum que calcula la estación receptora no concuerda con la checksum que adjunta la estación transmisora al extremo de la trama. Por lo tanto, se descarta la trama.

LAN (Local Area Network): es la interconexión de varias computadoras y periféricos. Su extensión está limitada físicamente a un edificio o a un entorno de 200 metros, con repetidores podría llegar a la distancia de un campo de 1 kilómetro. Su aplicación más extendida es la interconexión de computadoras personales y estaciones de trabajo en oficinas, fábricas, etc.

ISM (Industrial, Scientific and Medical band): son bandas reservadas internacionalmente para uso no comercial de radiofrecuencia electromagnética en áreas industrial, científica y médica. En la actualidad estas bandas han sido popularizadas por su uso en comunicaciones WLAN. Su uso está abierto a todo el mundo sin necesidad de licencia, respetando los niveles de potencia y que tengan cierta tolerancia frente a errores, utilicen mecanismos de protección contra interferencias y técnicas de ensanchado de espectro.

Exponential Backoff: es un algoritmo que utiliza la retroalimentación para disminuir multiplicativamente la tasa de algún proceso, a fin de encontrar poco a poco una tasa aceptable; comúnmente se usa para programar las retransmisiones después de las colisiones. La retransmisión se retrasa por una cantidad de tiempo derivada del tiempo de espera DIFS y el número de intentos de retransmisión.

WEP (Wireless Equivalent Privacy): es el sistema de cifrado incluido en el estándar IEEE 802.11 como protocolo para redes Wireless que permite cifrar la información que se transmite. Proporciona un cifrado a nivel 2, basado en el algoritmo de cifrado RC4 que utiliza claves de 64 bits (40 bits más 24 bits del vector de iniciación IV) o de 128 bits (104 bits más 24 bits del IV).

Padding: bits de relleno que se adicionan una trama para hacerla coincidir con un tamaño específico, como lo es la MTU o bien un bloque de elementos de codificación.

CRC (Cyclic Redundancy Code): es una función que recibe un flujo de datos de cualquier longitud como entrada y devuelve un valor de longitud fija como salida. Es usada como suma de verificación para detectar la alteración de datos durante su transmisión o almacenamiento.

IFFT (Inverse Fast Fourier Transform): ejecuta la función de síntesis basado en la transformada rápida de Fourier, la cual calcula de forma rápida y en el dominio discreto la transformada directa de Fourier (DFT), la cual obtiene una representación en el dominio de la frecuencia, siendo la función original una función en el dominio del tiempo; estableciendo que toda función senoidal es la suma de sus componentes también senoidales en el dominio del tiempo.

Códigos de bloque: son técnicas utilizadas para transformar un conjunto de datos binarios "N" en otro un poco más largo "K" donde se agregan unos bits de más para dar redundancia al código saliente K, donde $(K > N)$. El número de dígitos de comprobación o redundancia será $M = K - N$; donde M son la cantidad dígitos adicionados.

Códigos Convolutionales: es un tipo de código de detección de errores donde: cada símbolo de m bits de información se transforma, al ser codificado, en un símbolo de n bits, donde m/n es la tasa del código ($n \geq m$) y la transformación es función de los k símbolos anteriores, donde k es la longitud del código.

Tasa de codificación (R): es la relación entre la longitud de la palabra original y la longitud de la palabra codificada, la cual ya contiene los bits de redundancia adicionales que se agregaron el codificador para la corrección de errores.

SNR (Signal to Noise Ratio): e define como el margen que hay entre la potencia de la señal que se transmite y la potencia del ruido que esta presente en el medio. Este margen es medido en Decibeles [dB].

ETSI HIPERMAN: s un estándar creado por el Instituto Europeo de Normas de Telecomunicaciones (ETSI) dirigido principalmente para proveer DSL inalámbrica de banda ancha, cubriendo un área geográfica grande. Se considera una alternativa europea a WiMAX y a la coreana WiBro.

Throughput: es el volumen de datos efectivo que fluye en una red de datos en un determinado momento. Difiere del ancho de banda en que este último es una cantidad teórica máxima de la información que pasa por el canal, en este caso, es un volumen de datos es menor debido a que existen diferentes factores en el medio que afectan dicho parámetro

Referencias de imágenes

Figura 2.1. Ejemplo de red de cinco capas Tomada de [5] pp. 27

Figura 2.2. Relación protocolo y servicio. Tomada de [5] pp. 37

Figura. 2.3. Modelo OSI. Tomada de
<http://www.upmdie.upm.es/Practicas/Comunicaciones/modeloOSI.htm>

Figura 2.4. Encapsulamiento de datos en modelo OSI. Tomada de
http://www.oocities.com/txmetsb/el_modelo_de_referencia_osi.htm

Figura 2.5. Comparación modelo TCP/IP y OSI. Tomada de [8]

Figura 2.6. Protocolos en modelo TCP/IP. Tomada de [5], pp. 43.

Figura 2.7. Encapsulación de datos en modelo TCP/IP. Tomada de [6]
<http://www.tcpipguide.com/>

Figura 2.8. Segmento TCP y Figura 2.9 Encabezado IP. Tomada de [5], pp. 434, 540.

Figura 2.10. Ejemplo de una red WLAN. Elaborada con Microsoft Visio 2010.

Figura 2.11. Imagen de un AP. Tomada de
<http://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:ModemWiFi.JPG>. Fecha de consulta: 15 Febrero 2011

Figura 2.12. Conjunto de BSS interconectados. Tomada de [12], Capítulo2.

Figura. 2.13. Red Ad-Hoc Tomada de
http://4.bp.blogspot.com/_TnKzeJZILBk/So7InP8reul/AAAAAAAAAck/BTz3GOXWNY/s400/Wlan_adhoc.png Fecha de consulta: 15 Febrero 2011

Figura 2.14. Red inalámbrica interconectada a redes cableadas Tomada de:
<http://img.tfd.com/cde/WIFIBRDG.GIF>. Fecha de consulta: 15 Febrero 2011

Figura 2.15. Estándares de redes inalámbricas según su cobertura geográfica Tomada de
http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/d/d2/Tipus_xarxa.gif. Fecha de consulta: 21 Febrero 2011

Figura 2.16. Arquitectura BWA Tomada de
http://mirentech.co.uk/cms/app/webroot/files/upload/image/voip_clip_image001.gif
Y modificada en Microsoft Visio por el autor. Fecha de consulta: 21 Febrero 2011

Figura 2.17. Aplicación WiFi Backhauling Tomada de
http://3.bp.blogspot.com/_FDX1mvf2_7U/TExlfd5fuMI/AAAAAAAAAwg/rHyI9yh4LXA/s1600/wima_x_pic1.gif Fecha de consulta: 21 Febrero 2011

Figura 2.18. El dispositivo móvil cambia de una BS a otra sin reiniciar la sesión Tomado de [4], pp. 50.

Figura 3.1. Distribución de las subcapas LLC y MAC Tomada de [5], pp 291.

Facultad de Ingeniería UNAM
Departamento de Ingeniería en Telecomunicaciones

Figura 3.2. Pila de protocolos 802.11 Tomada de [5], pp 293

Figura 3.3. Relación entre subcapas Elaborada con Microsoft Visio 2010 con base en [10] pp. 290.

Figura 3.4. Ejemplo de detección virtual el canal para 802.11 Tomada de [5] pp. 80.

Figura 3.5. Formato de trama MAC Tomada de [1] pp.39

Figura 3.6. Campo de Control de trama (Frame Format Field) Tomada de [1] pp. 40

Figura 3.7. Señal FSSS Tomada de [13] <http://www.maxim-ic.com/appnotes/index.mvp/id/1890>

Figura 3.8 Señal DSSS Tomada de [13] <http://www.maxim-ic.com/app-notes/index.mvp/id/1890>

Figura 3.9. Espectro OFDM Tomada de [12] Capítulo 13.

Figura 3.10. Cadena de transmisión de OFDM Elaborada con Microfot Visio con base en [14] .

Figura 3.11. Señal OFDM con prefijo cíclico Tomada de [14].

Figura 3.12 Formato de trama PPDU Tomado de [1] sección 17.3.2

Figura 3.13 Preámbulo PLCP Tomado de [1] sección 17.3.2 Elaborada con Microfot Visio con base en [12] Ch. 13

Figura 3.14. Transceptor 802.11a

Figura 3.15. Diagrama de bloques para FEC Tomado de [1] sección 17.3.5.5

Figura 3.16. Interleaving (intercalamiento) con 16-QAM Tomada de [12] ch. 13

Figura 4.1. Red PMP WiMAX Tomada de [4], pp. 30

Figura 4.2. Topología mesh. Tomada de [4], pp 29

Figura 4.3. CPE indoor y outdoor [17]

Figura 4.4. Antenas WiMAX [17]

Figura 4.5. Pila de protocolos del estándar 802.16 Tomada de [5]. pp.305

Figura 4.6. Arquitectura de capas Tomada de [4], pp.24.

Figura 4.7. Correspondencia CID y SFID Tomada de [4], pp. 84

Figura 4.8. Clasificación y asignación de CID Tomada de [4], pp. 89.

Figura 4.9. Forma genérica de la trama MAC 802.16 Tomada de [4], pp. 97.

Figura 4.10. Estructura de la trama y formato de encabezado MAC Tomada de [4], pp. 97.

Figura 4.11. Posibles capas físicas para WiMAX Tomada de [4], pp. 27.

Facultad de Ingeniería UNAM

Departamento de Ingeniería en Telecomunicaciones

Figura 4.12. La calidad del enlace determina el nivel de modulación a usar

Figura 4.13. Tipos de subportadoras OFDM Tomada de [4], pp. 51.

Figura 4.14. Cadena de transmisión OFDM Tomada de [4], pp. 70.

Figura 4.15. Generador de secuencias pseudoaleatorias para WiMAX OFDM Tomado de [4], pp. 70.

Figura 4.16. Codificador FEC para OFDM-PHY Tomado de [4], pp 72.

Figura 4.17. Frame TDD Tomado de [4], pp 115.

Figura 4.18. Estructura general de la trama TDD para OFDM PHY Tomado de [4], pp 115.

Figura 4.19. Estructura del subframe DL OFDM PHY Tomada de [4], pp.116.

Figura 4.20. Estructura del subframe UL Tomada de [4], pp.117 .

Figura 6.1. Estructura de un símbolo OFDM [4]

Figura 6.2. Frame TDD Tomada de [19] pp. 43

Figura 6.3. Subframe UL TDD Tomada de [19] pp. 44

Figura 6.4. Subframe DL TDD [19] Tomada de [19] pp. 44

Figura 6.5. Temporizadores DIFS, SIFS y ACK para una trama de datos

Figura 6.6. Cobertura WiMAX Escenario A

Figura 6.7. Cobertura WiMAX Escenario B

Figura 6.8. Cobertura WiMAX Escenario C

Figura 6.9. SNR para 802.11a Tomada de [25]

Figura 6.10. SNR para IEEE 802.11b Tomada de [26]

Referencias bibliográficas

- [1] IEEE 802.11-2007, *IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks*.
- [2] IEEE 802.16-2004, *IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks. Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access System*.
- [3] IETF RFC 1122. *Requirements for Internet Hosts -Communication Layers*, Octubre 1989.
- [4] Nayumi, Loufti, *WiMax: Technology for Broadband Wireless Access*, John Wiley & Sons, LTD, 2007, West Sussex, England.
- [5] Tanenbaum, Andrew, *Redes de computadoras*, 4º Ed., Pearson, Mexico, 2003.
- [6] Stallings, Williams, *Comunicaciones y redes de computadoras*, 7º Ed, Pearson, Madrid, 2004.
- [7] M. Kozierok, Charles, *The TCP Guide- Version 2.0*. ©2001-2004, All Rights Reserved.
- [8] CCNA Exploration 1. *Aspectos básicos de Networking*. Cisco Systems.
- [9] IEEE 802.11-2007, *IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks. Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications*.
- [10] F. Molisch, Andreas, *Wireless Communications*, John Wiley & Sons, LTD, 2005, West Sussex, England.
- [11] Ahmad, Aftab, *Wireless and Mobile Data Networks*, Editorial John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2005.
- [12] Gast, Matthew S., *802.11® Wireless Networks: The Definitive Guide*, 2º Ed, Editorial O'Reilly Media Inc., Sebastopol, CA, 2005.
- [13] Maxim Integrated Products, AN1890, AN 1890, APP1890, *Wireless RF and Cable*, 2003.
<http://www.maxim-ic.com/app-notes/index.mvp/id/1890>
Consultada el 16 de Marzo de 2011
- [14] Dr.S.S.Riaz Ahamed, *PERFORMANCE ANALYSIS OF OFDM*, Institute of Technology, Ramanathapuram, TamilNadu, India.
http://www.jatit.org/volumes/research-papers/Vol4No1/OFDM_FDM_DAB_DSL_PSK_QAM_IFFT.pdf
Consultada el 20 de Marzo de 2011
- [15] E. Frezel, Louis, *Sistemas electrónicos de comunicaciones*, 1º Ed. En español, Mexico, 2007, Alfaomega Ediciones.
- [16] F. Finneran, Michael, *WiMAX versus WiFi: a comparison of technologies markets and business plans*, 2004, dBrn Associates Inc.
<http://media.techtarget.com/searchMobileComputing/downloads/Finneran.pdf>
Consultada el 30 de marzo de 2011
- [17] WiMAX tutorial
www.wimax.com (4G wireless broadband solutions Inc.)

Consultada el 2 de Abril de 2011

- [18] Briones, Arellys y Nadia García, Analisis comparativo de las tecnologías WI-FI y WIMAX; Aplicaciones y servicios, Tesis para obtener el titulo de Ingeniero en electrónica y telecomunicaciones Escuela Superior Politécnica del Litoral, Guayaquil, Ecuador, 2006.
- [19] Aguilar Mendoza, Erick Eduardo y Genaro Cruz León, *Estudio instrumental de los parámetros QoS para la implementación de aplicaciones VoIP en una red WiMAX/IEEE 802.16-2004*, Tesis de Licenciatura, Facultad de Ingeniería UNAM, junio 2009.
Asesor. Dr. Victor Rangel Licea
- [20] Amitabh Kumar, *Mobile broadcasting with WiMAX: principles, technology, and applications*, Focal Press, 2008, pp. 86,91.
Consultado en Google Books, 19 Abril 2010.
- [21] Erceg, et. al, *An empirically based path loss model for wireless channels in suburban environments*, IEEE J. Select Areas Commun., vol. 17, no. 7, July 1999, pp. 1205-1211.
- [22] Reza- Akhavan, Mohammad, *Study the performance limits of IEEE 802.11 WLANs*, Master Thesis of Science in Computer Science Engineering, Lulea University of Technology, May 2006, pp. 43-45.
- [23] Goldsmith, Andrea, *Wireless Communications*, Stanford University, Ed. Cambridge, 2005, pp. 40.
- [24] Lopez Barnes, Rodrigo, *Proyecto final de carrera: red basada en acceso inalámbrico WiFi y WiMAX*, Marzo 2008. Universidad Autónoma de Madrid, Escuela Politécnica Superior.
<http://arantxa.ii.uam.es/~jms/pfcsteleco/lecturas/20080409RodrigoLopez.pdf>
Consultada el 20 de Abril de 2011
- [25] Phraphul, Chandra y David Lide, *WiFi Telephony: challenges and solutions for voice over WLANs*, Ed. Newnes, Oxford, 2007, pp. 131.
Consultado en Google Books, 26 de Abril de 2011.
- [26] Del Prado Pavon, Javier y Sunghyun Choi , *Link Adaptation Strategy for IEEE 802.11 WLAN via Received Signal Strength Measurement*, Communications, 2003. ICC '03. IEEE International Conference, 2003.
- [25] Hoja de datos Cisco Aironet 1300
Consultada en www.cisco.com
- [26] Hoja de datos para Cisco Unified Wireless pone 7921G
Consultada en www.cisco.com
- [27] Jim Geier, *Wi-Fi: Define Minimum SNR Values for Signal Coverage*, Mayo 2008.

