

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.

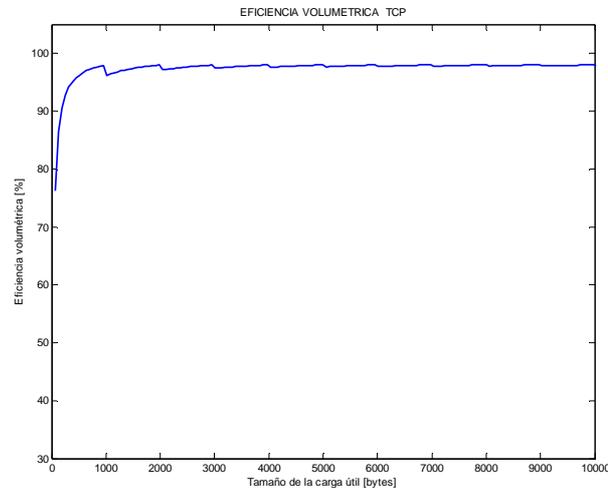
6.4 RESULTADOS

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

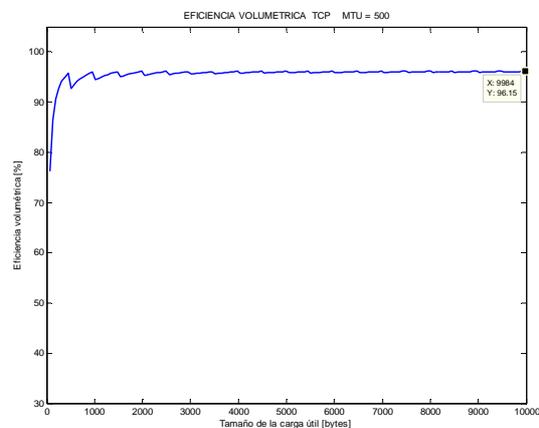
A continuación se muestra la gráfica de eficiencia volumétrica para el protocolo TCP. Se usa una fragmentación considerando una MTU = 1000 bytes. En la gráfica siguiente es posible ver que la eficiencia volumétrica es muy cercana al 100%, pues el protocolo TCP solo agrega una información adicional de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



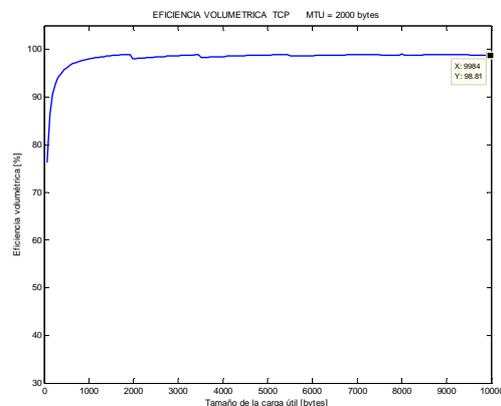
La gráfica presenta un comportamiento creciente, es decir, la eficiencia volumétrica comienza a aumentar gradualmente y después se estabiliza en un tipo de asíntota tendiendo al 100%. Esto se debe a que, para cadenas de datos cortas que son comparables con la longitud de la información adicional, ésta 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.

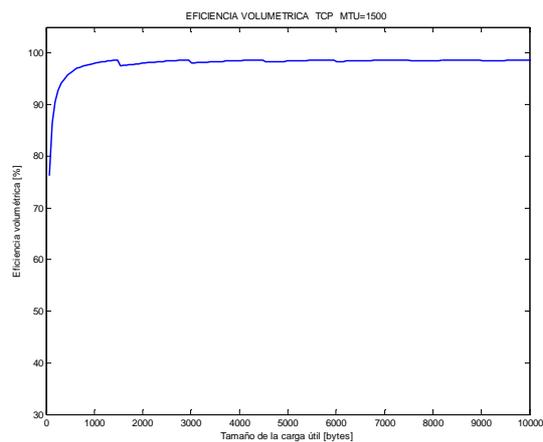
Actualmente, por comodidad se usa una MTU = 1500 bytes, ya que es la MTU para Ethernet. Se utilizará este valor de MTU para la obtención de todos los resultados posteriores.

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:

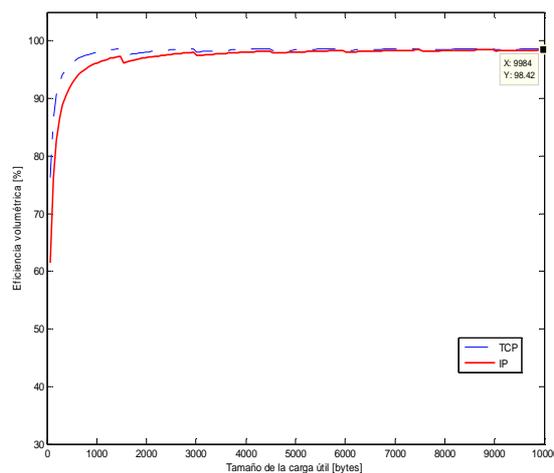


La mayor caída en la eficiencia volumétrica se presenta en la primera fragmentación, esto es debido a que coincide con las cadenas de datos útiles más cortas; en lo sucesivo éste factor ya no es tan importante, por lo que las caídas son menos pronunciadas.

- **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%.

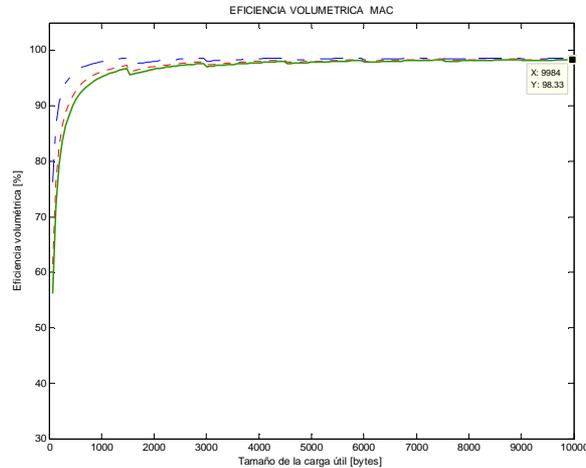


- **Eficiencia Volumétrica en capa MAC**

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_{BPSC})	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.

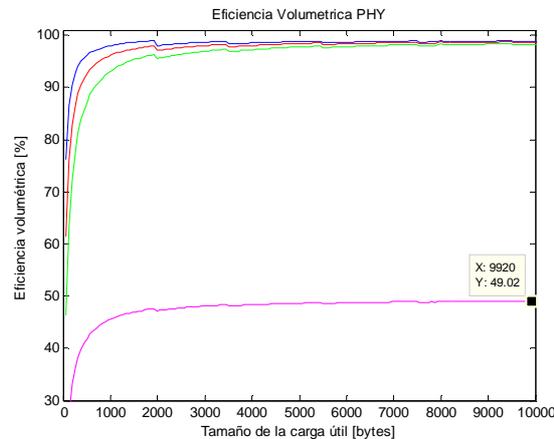
Los resultados para el cálculo de la eficiencia volumétrica para WiFi fueron los siguientes:

- **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.

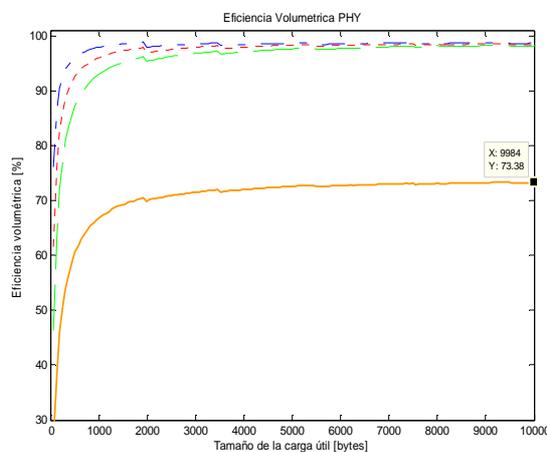
¹⁶ Se profundizara en dichos cálculos más adelante en este Capítulo.



- **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.

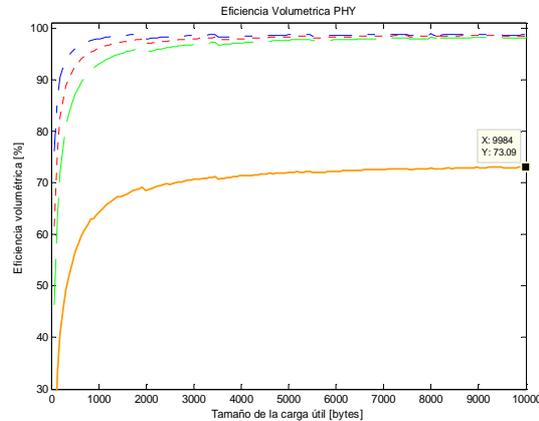
El máximo valor registrado en la grafica es de 73.5%, lo cual tiene una cierta relación con el valor de CC, pues es posible ver que la eficiencia solo se reduce en aproximadamente 25% del valor original (en el que la eficiencia era de 99%) .



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

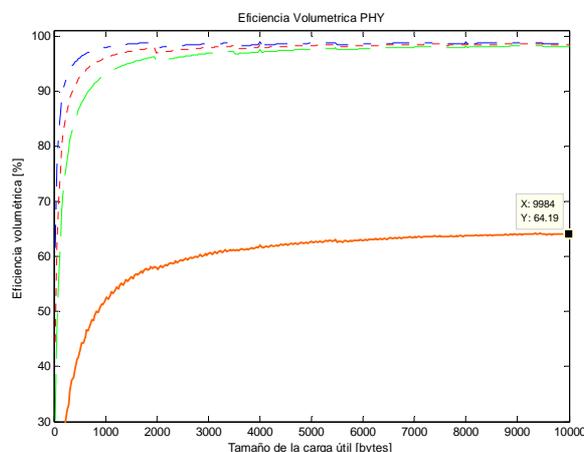
De forma similar al caso 1 y 3, este resultado tiene muchas similitudes con el caso 2, pues su CC es de 3/4, es decir, de un 75% aproximado al 75% del valor de máxima eficiencia volumétrica. De igual forma, la diferencia es mínima y se debe a la cantidad de bytes que se toman a la entrada del codificador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

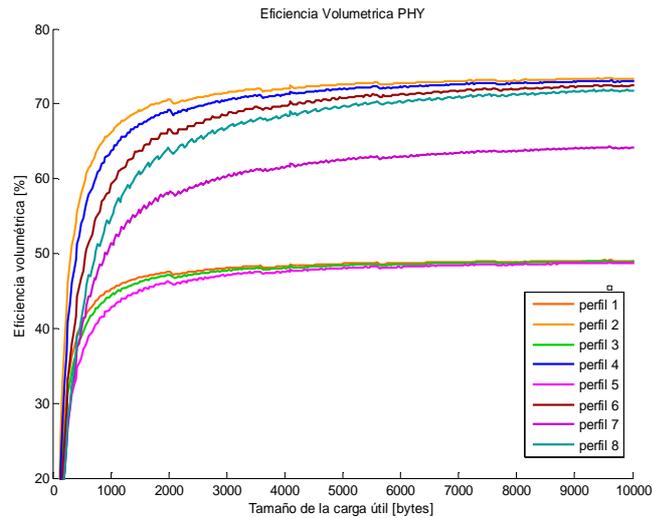


- **Grafica comparativa entre perfiles WiFi**

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

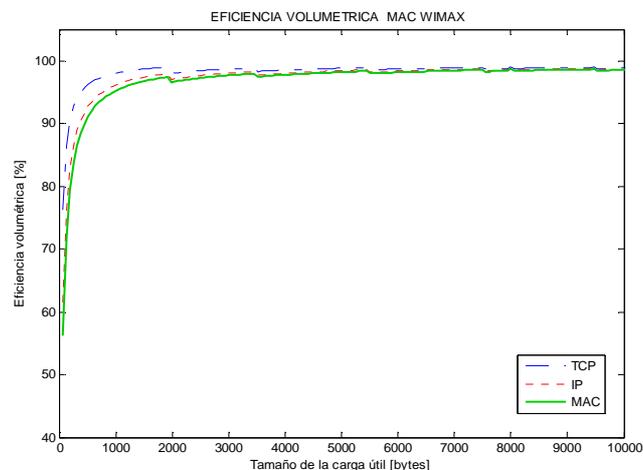
En la sección anterior se trató la eficiencia volumétrica para la tecnología WiFi, en esta sección se hará lo correspondiente para WiMAX.

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.

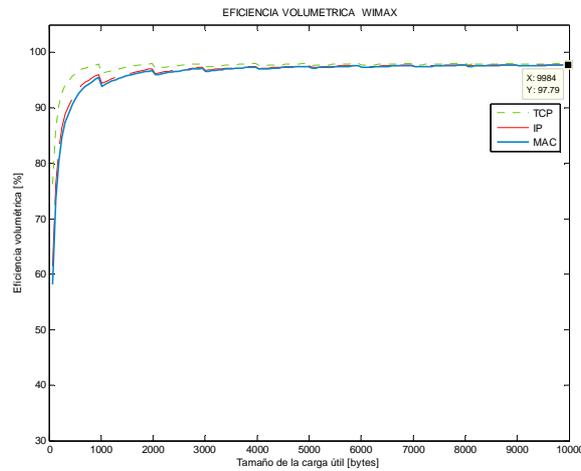
- **Eficiencia Volumétrica en capa MAC**

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

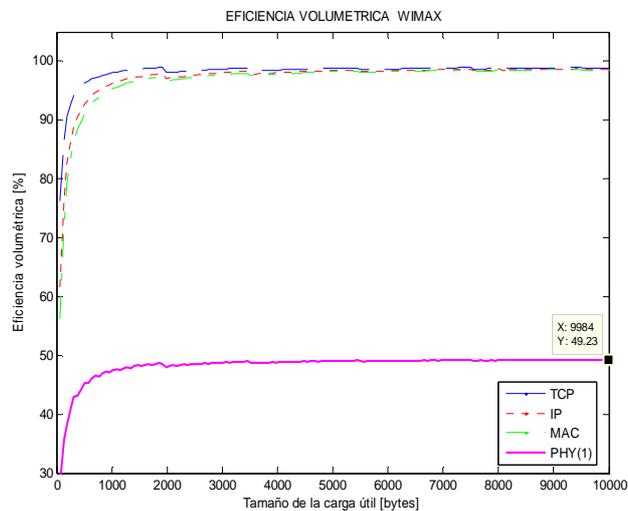
Perfil No.	Modulación	Tamaño del bloque no codificado [bytes]	Tamaño del bloque codificado [bytes]	Tasa de codificación total (OCR)	Código RS	Tasa de CC
1	BPSK	12	24	1/2	(12,12,0)	1/2
2	QPSK	24	48	1/2	(32,24,4)	2/3
3	QPSK	36	48	3/4	(40,36,2)	5/6
4	16-QAM	48	96	1/2	(64,48,8)	2/3
5	16-QAM	72	96	3/4	(80,72,4)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

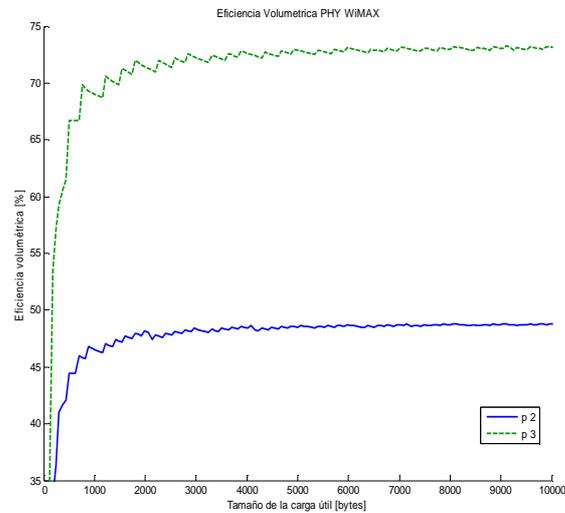
En este caso, dado que la tasa de codificación total (OCR) es igual a la tasa de codificación convolucional ($\frac{1}{2}$); sin embargo, dado que la tasa de codificación total es de $\frac{1}{2}$ significa que la información a la salida del codificador se está duplicando, por tanto, la eficiencia volumétrica 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 $\frac{1}{2}$ RS (24,48) (perfil 2) y QPSK OCR $\frac{3}{4}$ RS (36,48) (perfil 3)**

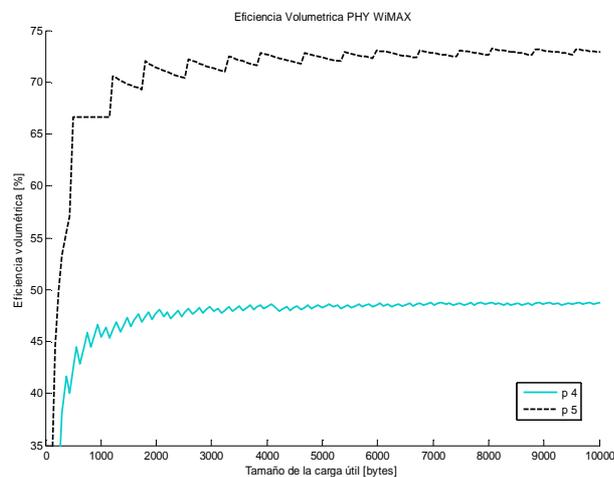
Para éste perfil, debido a que la tasa de codificación total OCR es igual a la del perfil anterior, es decir, de $\frac{1}{2}$ la eficiencia volumétrica es muy similar en su máximo valor. De forma muy parecida a como sucede en WiFi, en este caso se toma una mayor cantidad de bits a la entrada del codificador,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

En cuanto al perfil 3, debido a la tasa de codificación de $\frac{3}{4}$, 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)**

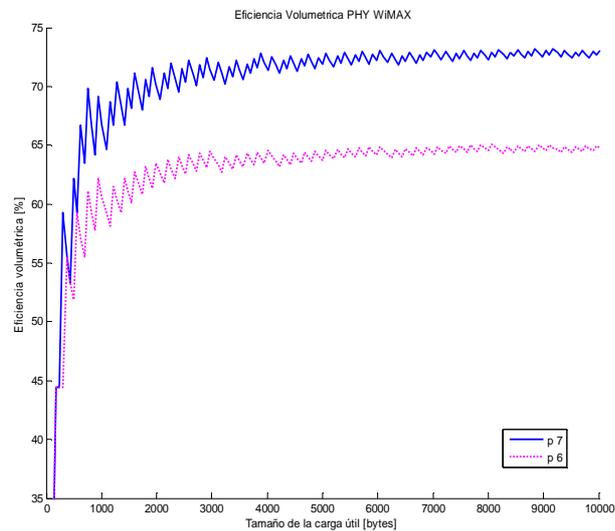
Para el perfil 4 como se ha mostrado en casos anteriores, la eficiencia volumétrica disminuye quedando en 48% aproximadamente; lo cual es esperado debido a que la tasa de codificación promedio (o total) es de 1/2. Para el perfil 5, la eficiencia volumétrica está cerca del 73% pues su tasa de codificación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

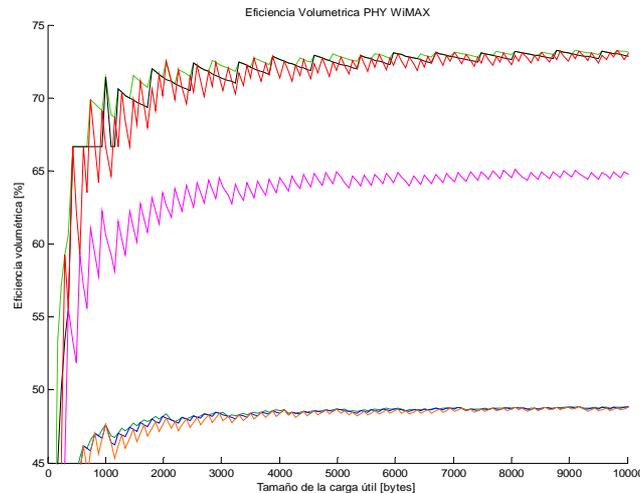
codificación promedio es 3/4 , la eficiencia volumétrica es mayor que la del perfil 6 pues agrega menos información adicional respecto de la original. Por tanto la eficiencia es mayor.



- **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.

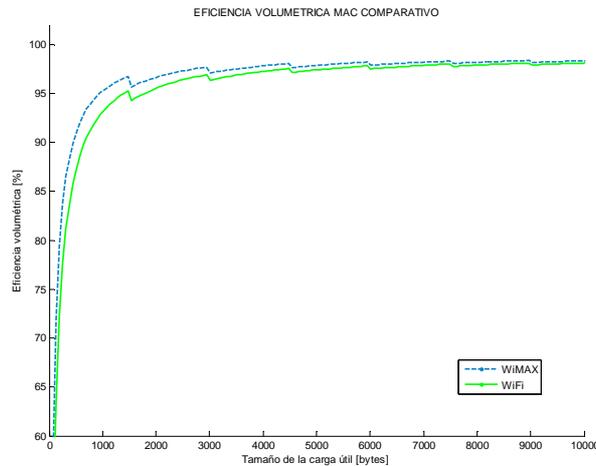


6.5 COMPARACIÓN DE LA EFICIENCIA VOLUMÉTRICA ENTRE ESTÁNDARES 802.11 Y 802.16

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

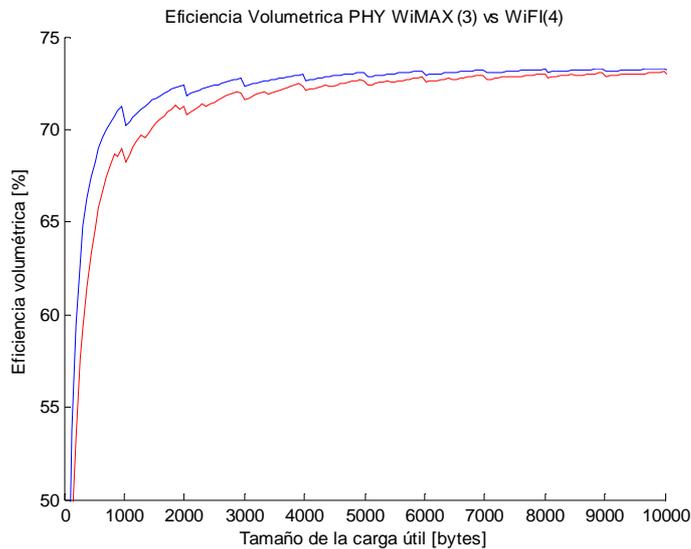
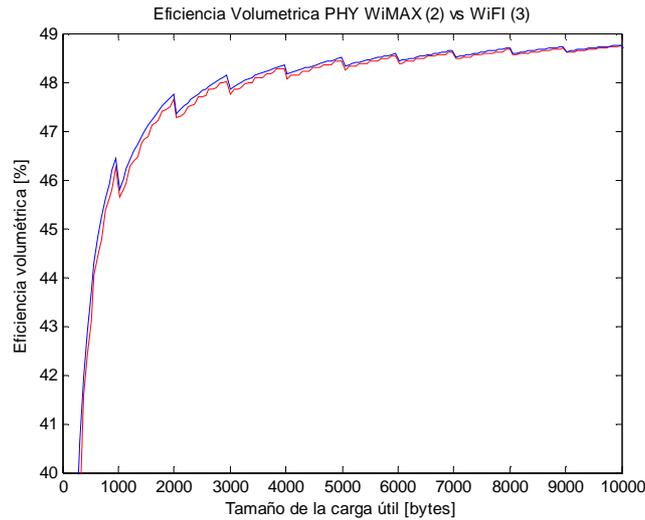
WiFi		WiMAX	
Perfil	Parámetros	Perfil	Parámetros
1	BPSK CC ½ (24,48)	1	BPSK OCRC ½ (12,24)
3	QPSK CC ½ (48,96)	2	QPSK OCR ½ (24,48)
4	QPSK CC 3/4 (72,96)	3	QPSK OCR 3/4 (36,48)
5	16-QAM CC 1/2 (96,192)	4	16-QAM OCR 1/2 (48,96)
6	16-QAM CC ¾ (144,192)	5	16-QAM OCR ¾ (72,96)
7	64-QAM CC 2/3 (192,288)	6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

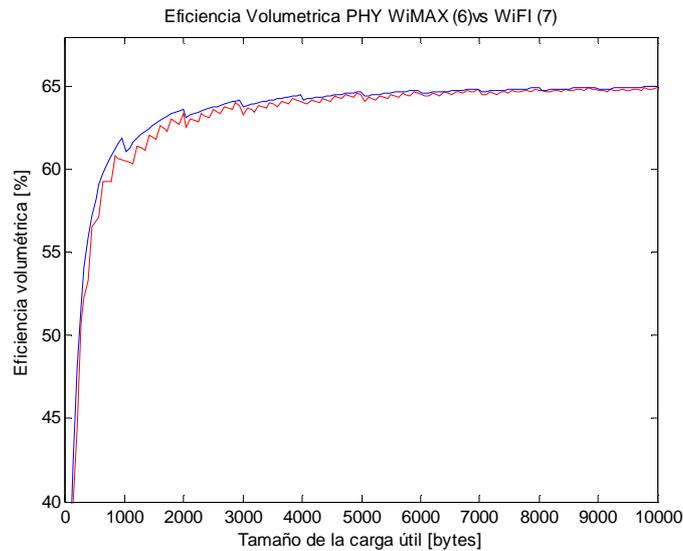
- **Capa PHY comparación Perfil 1 WiFi vs Perfil 1 WiMAX**

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.

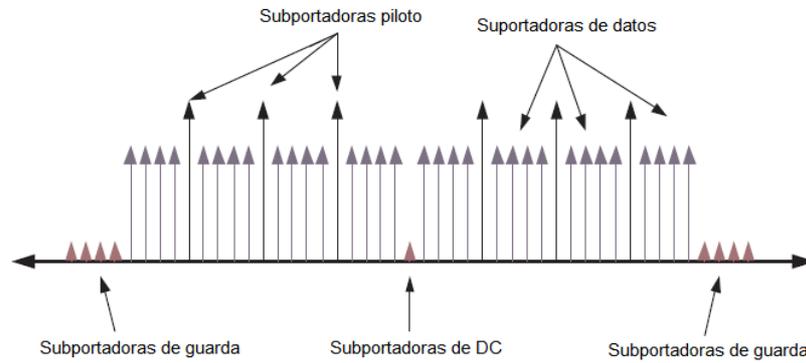


Figura 6.1. Estructura de un símbolo OFDM

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:

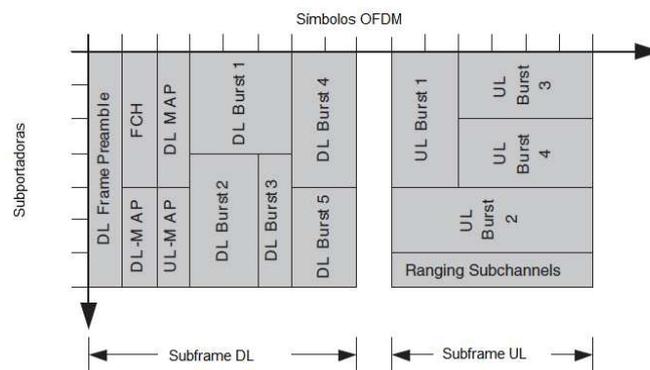


Figura 6.2. Frame TDD

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:

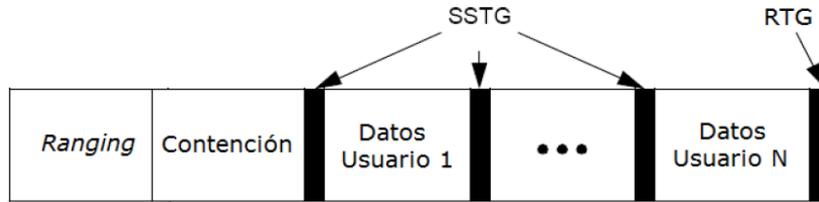


Figura 6.3. Subframe UL TDD

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.

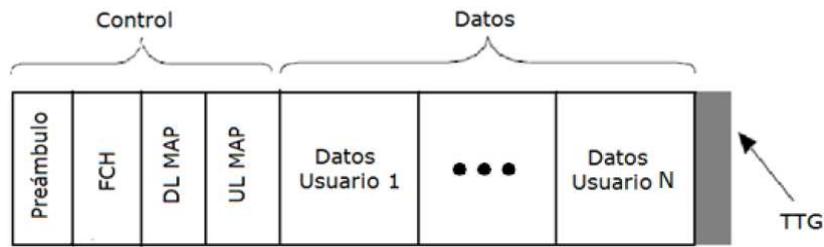


Figura 6.4. Subframe DL TDD

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 + 35 μ s + Tp ¹⁷
RTG	4 símbolos + 35 μ s + 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:

$$f_s = n \cdot \Delta f = \frac{8}{7} \cdot 27.35 \text{ [KHz]} = 31.25 \text{ [kHz]} \quad (29)$$

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:

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

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 1/2 RS (24,48)	6	5.76
2. QPSK CC 1/2 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 3/4 RS (144,192)	36	28.71
6. 64-QAM CC 2/3 RS (192,288)	48	35.93
7. 64-QAM CC 3/4 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 3/4**, 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]	Throughput 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.