

F. OFDM

OFDM es el acrónimo de *Orthogonal Frequency Division Multiplex*, corresponde a uno de los por qué WiMAX puede ofrecer enlaces a altas velocidades y con algunas características extras, como lo son la resistencia a desvanecimientos por multitrayectorias e interferencias. OFDM no es una tecnología nueva, fue patentado en 1970 por los laboratorios Bell e incorporado a las tecnologías DSL (*Digital Subscriber Line*), así como al estándar 802.11a y 802.11g logrando aumentar la velocidad de transferencia máxima, 11 [Mbps] del 802.11b, a 54 [Mbps] teóricos.

OFDM es una técnica de comunicación que divide un canal, de frecuencia, en un número determinado de bandas de frecuencias equiespaciadas, en cada banda se transmite un subportadora que transporta una porción de la información del usuario. Cada subportadora es ortogonal al resto, dándole el nombre a esta técnica de multiplexación por división de frecuencia.

OFDM es una técnica basada en la multiplexación por división de frecuencia (FDM), pero el hecho de que cada subportadora sea ortogonal al resto permite que el espectro de cada una estén traslapadas, ver Figura F-1, y no exista interferencia, aumentando la eficiencia del uso del espectro debido a que no se utilizan bandas de separación entre subportadoras.

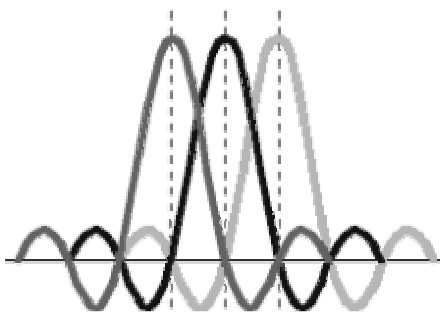


Figura F-1: Subportadoras ortogonales permiten traslape de sus espectros sin interferencias.

Un sistema OFDM toma un flujo de datos y lo divide en N flujos paralelos, cada uno a una tasa $1/N$ de la original. Luego cada flujo es mapeado a una subportadora y combinado usando la transformada rápida inversa de Fourier (IFFT), obteniendo la señal en el dominio del tiempo a transmitir. Por ejemplo, si se utiliza un sistema con 100 subportadoras y se transmite un solo flujo con una tasa de 1 [Mbps], este es convertido en 100 flujos de 10 [Kbps]. Al crear flujos de datos paralelos más lentos, provoca que la duración de cada símbolo de la modulación aumente en un factor de 100. Con una adecuada elección de los parámetros del sistema, como el número de subportadoras y la distancia entre éstas pueden reducir enormemente, o incluso eliminar, la interferencia inter-simbólica (ISI) [48].

F.1 OFDM en WiMAX

Hasta ahora se ha revisado en forma breve y general el concepto de OFDM, en los párrafos siguientes se abordará desde la perspectiva de WiMAX, con los parámetros y valores que especifican los estándares 802.16 de la IEEE.

En la capa Física del estándar 802.16-2004 se especifica la interfaz *WirelessMAN-OFDM*, en la cual se establece que se utilizan 256 subportadoras, de las cuales 192 son utilizadas para datos, 8 son pilotos y 56 son nulas. Las subportadoras pilotos son utilizadas como referencia para minimizar los desplazamientos de frecuencia y fase. Por último las 56 subportadoras nulas son utilizadas para resguardo de la banda y la frecuencia DC, que corresponde a la frecuencia central del canal (ver Figura F-2).

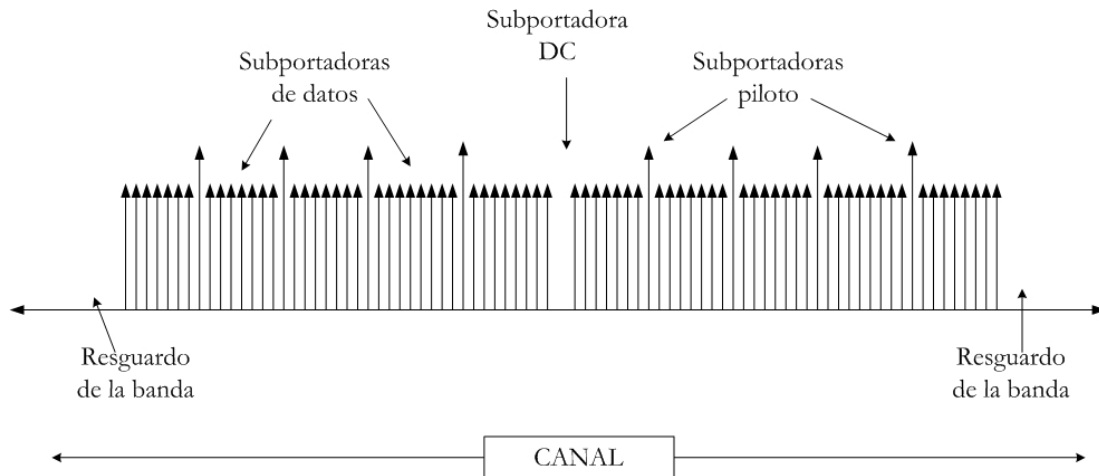


Figura F-2: Diagrama con las subportadoras de OFDM.

Lo que se muestra en la Figura F-2 corresponde a OFDM en el dominio de la frecuencia, en el dominio del tiempo se puede establecer el tiempo de duración de un símbolo OFDM, así como el uso de un prefijo cíclico (CP: *Cyclic Prefix*) que corresponde a la última muestra, T_g , del periodo útil del símbolo (ver Figura F-3).

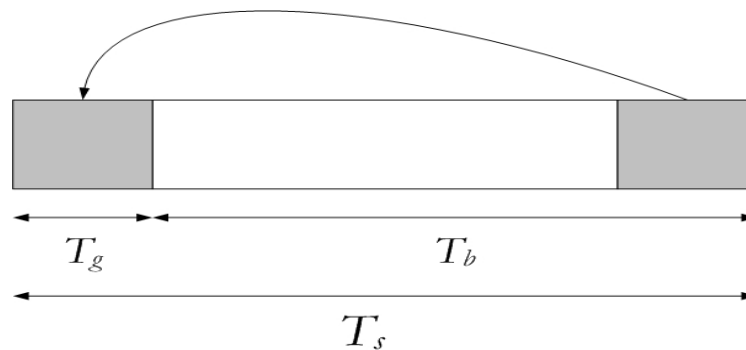


Figura F-3: Estructura del símbolo OFDM en el dominio del tiempo[30]

F.1.1 Parámetros del Símbolo OFDM y de la Señal Transmitida [30]

A continuación se presentan los parámetros definidos en el estándar 802.16-2004 de la IEEE, Tabla F-1, para caracterizar los símbolos OFDM.

Tabla F-1: Parámetros primarios del símbolo OFDM.

Parámetros	Descripción
BW	Es el ancho de banda nominal del canal.
N_{used}	Número de subportadoras utilizadas.
n	Factor de muestreo. Este parámetro, en conjunto con BW y N_{used} determinan la distancia entre subportadoras, y el tiempo útil del símbolo.
G	Es la razón entre el tiempo del CP y el tiempo útil del símbolo.

A partir de los parámetros de la Tabla F-1 se derivan una serie de parámetros que son listados en la Tabla F-2. Entre los parámetros está la frecuencia de muestreo, la cual depende del factor de muestreo y el ancho de banda, en la expresión se utiliza la función *floor* que entrega como resultado el número entero menor o igual al argumento. Cabe mencionar que se debe utilizar el ancho de banda, BW , en Hertz.

Tabla F-2: Parámetros derivados del símbolo OFDM.

Parámetros	Descripción
N_{FFT}	Es la potencia de dos más pequeña, pero mayor a N_{used} .
F_s	Frecuencia de muestreo: $F_s = \text{floor}(n \cdot BW/8000) \times 8000$
Δf	Espacio entre subportadoras: $\Delta f = F_s / N_{FFT}$
T_b	Tiempo útil del símbolo: $T_b = 1 / \Delta f$
T_g	Tiempo del prefijo cíclico (CP): $T_g = G \cdot T_b$
T_s	Tiempo del símbolo OFDM: $T_s = T_b + T_g$
$T_{sampling}$	Tiempo de muestreo: $T_{sampling} = T_b / N_{FFT}$

En la Tabla F-3 se muestran algunos de los valores especificados para la interfaz *WirelessMAN-OFDM* en la transmisión de la señal OFDM, en el estándar 802.16-2004 de la IEEE.

Tabla F-3: Valores para los parámetros de la señal OFDM transmitida.

Parámetros	Valor
N_{FFT}	256
N_{used}	200
n	8/7 para canales con ancho de banda múltiplos de 1.75 MHz. 86/75 para canales con ancho de banda múltiplos de 1.5 MHz. 144/125 para canales con ancho de banda múltiplos de 1.25 MHz. 316/275 para canales con ancho de banda múltiplos de 2.75 MHz. 57/50 para canales con ancho de banda múltiplos de 2.0 MHz. 8/7 para canales con ancho de banda no especificados acá.
G	1/4, 1/8, 1/16, 1/32
Nº de subportadoras utilizadas como resguardo en el límite inferior	28
Nº de subportadoras utilizadas como resguardo en el límite superior	27

Cabe mencionar que en la enmienda 802.16e, que incorpora la movilidad al estándar 802.16, sólo se hace una modificación a los parámetros de la señal OFDM a transmitir, y este no se muestra en la Tabla F-3. La modificación se realiza a un valor de los índices de las subportadoras, página 320 del estándar 802.16e de la IEEE [12].

F.2 OFDMA en WiMAX

OFDMA consiste en una técnica de acceso múltiple basado en OFDM, en el cual a cada usuario se le asigna una o más subportadoras, con lo cual los usuarios comparten un determinado ancho de banda. La forma en que las subportadoras son asignadas dependerá de la estrategia de despliegue del operador, ya que tienen directa relación con la calidad de servicio y la tasa de transferencia de éstos.

En la Figura F-4 se muestra un diagrama donde se ejemplifica cómo se agrupan subportadoras para formar un subcanal, el cual es asignado a un usuario.

Para OFDMA se definen los mismos parámetros primarios, Tabla F-1, pero con la diferencia que se especifica los valores a utilizar [12] [30]. Se hace explícito que N_{used} incluye la subportadora DC, el factor de muestreo, n , en [30] era fijado en 8/7 pero en [12] se hace una corrección, exigiendo lo siguiente: para canales con ancho de banda múltiplo de 1.75 [MHz] se utilizará $n = 8/7$; para múltiplos de 1.25, 1.5, 2 o 2.75 [MHz] se utilizará $n = 28/25$; y en el caso que el ancho de banda del canal no sea múltiplo de ninguna de las opciones antes mencionadas se utilizará $n = 8/7$. Finalmente para la razón entre el tiempo del prefijo cíclico y el útil, G , se deben soportar los siguientes valores: 1/32, 1/16, 1/8 y 1/4.

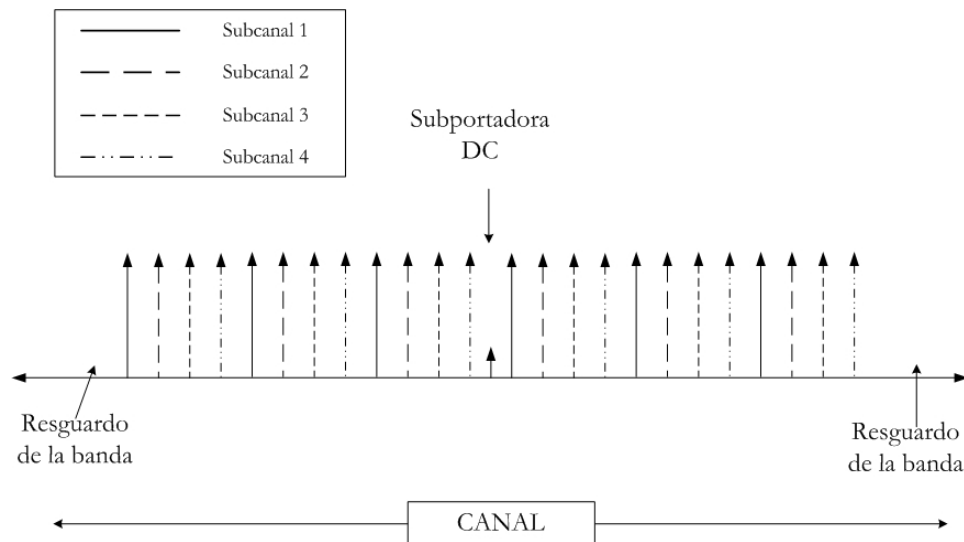


Figura F-4: Diagrama con la subcanalización utilizada en OFDMA.

Con respecto a los parámetros derivados, se conservan las expresiones especificadas para OFDM en la Tabla F-2, con la excepción que en la enmienda 802.16e se hace explícito que se deben soportar más tamaños de la FFT: 2048, 1024, 512 y 128. Por otro lado se establece que el MS deberá poseer un mecanismo de escaneo y búsqueda de la señal del enlace DL, reconociendo el tamaño de la FFT y el ancho de banda del canal que se está utilizando.

A partir del hecho que el parámetro N_{FFT} variará, nace la necesidad de utilizar OFDMA pero en forma flexible y así el uso de SOFDMA, el cual permite usar los diferentes tamaños de la FFT dependiendo del ancho de banda del canal.

F.2.1 SOFDMA

Es el acrónimo para *Scalable OFDMA* y es el concepto en el cual está basada la enmienda 802.16e de la interfaz *WirelessMAN-OFDMA*. SOFDMA entrega la flexibilidad necesaria para todo tipo de despliegues y servicios, permitiendo a los operadores desplegar redes con capacidades de acuerdo a su plan de negocios. Esto gracias a que el número de subportadoras, tamaño de la FFT, depende del ancho de banda que se utilice, pudiendo así realizar despliegues más eficientes. En la Tabla F-4 se muestra la relación entre el ancho de banda y el tamaño de la FFT, además de otros parámetros. Debido a que la separación entre subportadoras y el tiempo de duración del símbolo es el mismo, el impacto en las capas superiores cuando se escala el ancho de banda es mínimo.

Intel en una de sus revistas de publicaciones tecnológicas dio a conocer el documento [49], donde se realizó un estudio más detallado de SOFDMA. Los valores de la Tabla F-4 no coinciden con los publicados en este documento, esto por las modificaciones que ha tenido en el transcurso el estándar 802.16e, además los valores de la tabla han sido tomados de un documento del *WiMAX Forum* [18].

Tabla F-4: Parámetros y valores que se obtienen utilizando distintos tamaños de la FFT. [18]

Parámetros	Valor			
Ancho de Banda del canal en MHz	1.25	5	10	20
Frecuencia de muestreo en MHz	1.4	5.6	11.2	22.4
Tamaño de la FFT	128	512	1024	2048
Número de subcanales	2	8	16	32
Distancia entre subportadoras	10.94 KHz			
Tiempo útil del símbolo	91.4 μ s			
Tiempo del CP	11.4 μ s			
Duración del símbolo OFDMA	102.9 μ s			
Nº de símbolos OFDMA (Cuadro de 5 ms.)	48			

En la Tabla F-5 se muestra el desglose de las subportadoras para el caso de bandas de 5 y 10 MHz, se cita estos tamaños porque el *WiMAX Forum* está trabajando para la certificación de equipos en estas bandas. El *WiMAX Forum* además está trabajando para el uso de bandas de 7 y 8.75 [MHz], con una FFT de 1024 puntos.

Tabla F-5: Desglose de las subportadoras para los casos de 5 y 10 MHz. [18]

Parámetros	Valor			
Ancho de Banda del canal en MHz	5		10	
Tamaño de la FFT	512		1024	
Subportadoras Nulas	92	104	184	184
Subportadoras Piloto	60	136	120	280
Subportadoras de Datos	360	272	720	560
Subcanales	15	17	30	35

G. WCDMA [50]

WCDMA es el acrónimo para *Wideband Code-Division Multiple-Access* es la principal tecnología para la implementación de 3G en los sistemas celulares ya que será el *upgrade* para las redes GSM/GPRS/EDGE que existen hoy. WCDMA está basado en una técnica de acceso de radio propuesto por el grupo alfa de la ETSI cuya especificación finalizó en 1999.

WCDMA es una de las tecnologías que impulsa la UITT para la implementación de 3G, que está enmarcada dentro de la iniciativa conocida como IMT-2000. Corresponde a una técnica de multiplexación basada en *Code Division Multiple Access* (CDMA), la cual consiste en la asignación de un código digital diferente para cada usuario. Estos códigos son compartidos por el emisor y receptor. La diferencia entre WCDMA y CDMA es que en WCDMA utiliza códigos con una velocidad mucho mayor que la señal a transmitir.

En el transmisor el código se utiliza para transformar la señal de usuario en una señal de banda ancha (espectro expandido). Mientras que en el receptor el código se utiliza para separar las diferentes comunicaciones que comparten una misma portadora.

A los bits que componen el código WCDMA se les llama chips para diferenciarlos de los bits de usuario.

WCDMA es un sistema *Direct-Sequence Code Division Multiple Access* (DS-SS-CDMA), es decir, la información del usuario, bits, son ‘esparcidos’ en todo el ancho de la banda, a través de la multiplicación de los datos del usuario por una secuencia de bits pseudo-aleatoria, llamada chips, derivada de los códigos de esparcimiento de CDMA.

WCDMA soporta la operación de estaciones bases asíncronas, al contrario de los sistemas IS-95, por lo cual no es necesario una referencia global de tiempo, como por ejemplo GPS. El despliegue de micro estaciones bases es más fácil cuando no es necesario recibir una señal GPS.

G.1 Modos WCDMA

Existen dos modos de funcionamiento para WCDMA en UMTS, uno es el *Frequency Division Duplex* (FDD) y el *Time Division Duplex* (TDD). Las características de cada uno de ellos son:

Modo FDD. Cada transmisión se identifica por la portadora y por el código pseudo aleatorio WCDMA. Se utiliza una portadora diferente para cada enlace, el UL y el DL, dentro de una banda ‘apareada’.

Modo TDD. Cada transmisión se identifica por la frecuencia de la portadora, el código WCDMA y uno de los 15 intervalos de tiempo de la trama TDMA (*Time Division Multiple Access*). Se utiliza una misma portadora para ambos enlaces, tanto ascendente como descendente, dentro de la banda “desapareada”. Los intervalos de tiempo pueden ser repartidos de forma dinámica entre el enlace descendente y el ascendente. Este modo es idóneo para aplicaciones de tráfico asimétrico como puede ser el acceso a Internet.

G.2 Bandas de Frecuencia

Normalmente se reconocen tres frecuencias de operación para UMTS, dos de ellas para la comunicación FDD, y la tercera para el enlace TDD. Originalmente se concibieron para FDD las bandas de 1920 – 1980 [MHz] para el *uplink* y 2110 – 2170 para el *downlink*, y para el modo TDD las bandas de 1900 – 1920 [MHz] y 2010 – 2025 [MHz]. Pero como cada país ha tenido un plan propio para la distribución del espectro de frecuencias, y sólo en las últimas décadas se ha estandarizado este proceso ha sido necesario agregar otras, llegando actualmente a nueve bandas emparejadas para FDD y seis bandas para TDD. En la Tabla G-1 se muestran las bandas para FDD.

Tabla G-1: Bandas de Frecuencias para FDD.

Banda	Enlace Ascendente [MHz]	Enlace Descendente [MHz]	Separación entre portadoras [MHz]
I	1920 – 1980	2110 – 2170	190
II	1850 – 1910	1930 – 1990	80
III	1710-1785	1805-1880	95
IV	1710-1755	2110-2155	400
V	824 – 849	869-894	45
VI	830-840	875-885	45
VII	2500-2570	2620-2690	120
VIII	880 – 915	925 – 960	45
IX	1749.9-1784.9	1844.9-1879.9	95

Las bandas definidas para TDD son las siguientes:

- 1900 – 1920 [MHz] y 2010 – 2025 [MHz].
- 1850 – 1910 [MHz] y 1930 – 1990 [MHz].
- 1910 – 1930 [MHz].
- 2570 – 2620 [MHz].