

# OFDMA para Sistemas de Banda Ancha Inalámbrica

Daniel Tuñón  
Ramón Ortega

Facultad de Ingeniería Eléctrica  
Universidad Tecnológica de Panamá

**Resumen** - Este artículo describe el sistema de Acceso Múltiple por División de Frecuencia Ortogonal (OFDMA), un método de modulación para la segunda generación de acceso a banda ancha inalámbrica. Se explican de manera detallada las características y se desarrollan las ventajas y desventajas que estas ofrecen y que hacen de OFDMA un sistema eficiente, siendo la base de revolucionarias tecnologías como WiMAX y WiBro.

**Palabras Claves** - OFDMA, BWS, OFDM, FDMA/TDMA.

## 1. Introducción

Banda ancha inalámbrica nace motivada por la creciente demanda de la sociedad moderna por alta velocidad e intercambio de información en cualquier momento y lugar. Para conseguir estos beneficios es necesario emplear avanzadas técnicas de acceso múltiple y tecnologías de transmisión que puedan utilizar los recursos de frecuencia más eficientemente. Los sistemas de banda ancha se prevén como el futuro de las redes de comunicaciones y se basan en OFDMA, la versión multiusuario del ampliamente reconocido esquema de modulación OFDM.

Para lograr un eficiente uso del espectro de frecuencias el acceso múltiple en OFDMA se realiza mediante el híbrido FDMA/TDMA, éste se genera mediante la combinación de TDMA (Acceso Múltiple por División de Tiempo) y FDMA (Acceso Múltiple por División de Frecuencia).

Se ha reconocido ampliamente que el sistema de banda ancha inalámbrica se enfrenta a un reto formidable debido a la frecuencia de desvanecimiento selectivo. La solución es una tecnología de capa física conocida como modulación multiportadora (MCM), preferible para BWS (Broadband Wireless Systems), ya que puede mitigar de manera eficiente la distorsión de frecuencia dependiente a través de una amplia banda de frecuencias y simplificar la ecualización en un ambiente con desvanecimiento multitrayecto.

Este artículo introduce, en primer lugar, los sistemas inalámbricos de banda ancha y el concepto de OFDMA. A continuación se discute el acceso múltiple y se desarrolla la técnica de modulación OFDM. Por último, se presenta una recopilación de las ventajas y desventajas que este sistema ofrece, así como las normas que lo rigen.

## 2. Sistemas Inalámbricos de Banda Ancha

Es indudable el crecimiento de la demanda de usuarios para tener, simultáneamente, en sus equipos, múltiples servicios, tales como voz, audio, video y especialmente datos a alta velocidad para el tráfico de Internet y el comercio electrónico. Una de las alternativas más rápidas y económicas para la conquista de este objetivo son los sistemas inalámbricos de banda ancha, BWS.

Este tipo de sistemas no sólo ofrece mayor rapidez de

navegación y la descarga de archivos más rápida, sino también permite aplicaciones multimedia como televisión de alta definición, audio en tiempo real y video streaming. Además, es la base de tecnologías con gran auge actualmente como la telefonía de voz sobre protocolo de Internet (VoIP).

Existen dos tipos diferentes de servicios inalámbricos de banda ancha. El primer tipo intenta proporcionar un conjunto de servicios similares a los de las tradicionales líneas fijas de banda ancha, pero utilizando un medio de transmisión inalámbrico. Este tipo, denominado inalámbrico fijo de banda ancha, es pensado como una alternativa competitiva a DSL o cable módem. El segundo tipo de banda ancha inalámbrica, denominada móvil de banda ancha, ofrece la funcionalidad adicional de portabilidad y movilidad. La mayoría de estos nuevos sistemas tienen un buen desempeño bajo condiciones de ausencia de línea de vista gracias al uso de técnicas como multiplexación por división de frecuencia ortogonal (OFDM), acceso múltiple por división de código (CDMA), y procesamiento multiantena.

Una de las alternativas propuestas para BWS es el acceso múltiple por división de código en banda ancha (W-CDMA), ésta es una técnica de modulación con portadora única. La mayor desventaja de esta modulación es la complejidad en la ecualización del canal. A diferencia de la modulación con portadora única, el esquema de modulación multiportadora (OFDMA) puede significativamente simplificar la ecualización del canal siendo una solución atractiva para BWS [1] [2].

## 3. OFDMA

Entre las diversas técnicas de acceso múltiple conocido hasta la fecha, el acceso múltiple por división de frecuencia ortogonal (OFDMA) es uno de los más favorecido para su utilización en los sistemas de transmisión de banda ancha. El mismo ha sido diseñado para ser capaz de superar la interferencia que ocurre entre el transmisor y el receptor y aprovechar eficientemente el espectro de frecuencias.

OFDMA es una combinación de un sistema de modulación que se asemeja a OFDM y un sistema de acceso múltiple que combina TDMA y FDMA. Esta técnica normalmente utiliza una FFT (Transformada Rápida de Fourier) de tamaño muy superior a OFDM, y divide las subportadoras disponibles en grupos lógicos llamados subcanales, como se puede observar en la Figura 1. A diferencia de OFDM que transmite la misma cantidad de energía en cada subportadora, OFDMA puede transmitir diferentes cantidades de energía en cada subcanal.

En un sistema de portadora única, el desvanecimiento o la interferencia pueden causar una falla en cualquier aplicación. Pero en sistemas de varias portadoras, sólo un pequeño porcentaje de esas subportadoras, desaparecerá. Se utilizan códigos de corrección de error para corregir las pequeñas subportadoras que vienen con información errónea.

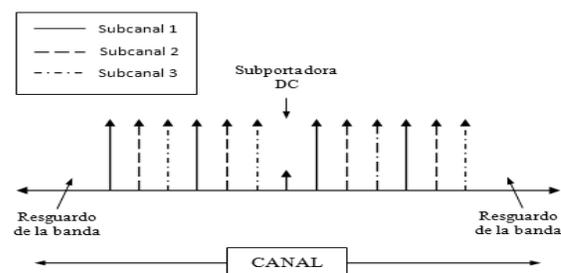


Figura 1. Subcanalización utilizada en OFDMA

Para implementar el acceso múltiple (OFDMA) se asignan subconjuntos de portadoras a cada usuario. Se puede variar la asignación de subportadoras por usuario de acuerdo a información realimentada sobre las condiciones del canal utilizado o en base a la Calidad de Servicio (QoS) requerida por cada uno [2].

#### 4. Acceso Múltiple

OFDMA se basa en un sistema híbrido conocido como FDMA/TDMA (Figura 2). El esquema de FDMA consiste en dividir el espectro disponible en varios canales de frecuencia de manera que cada usuario utiliza a la vez dos canales para su comunicación, uno para el enlace de subida (con el que transmite información hacia la red) y el otro para el enlace de bajada (con el que recibe información desde la red).

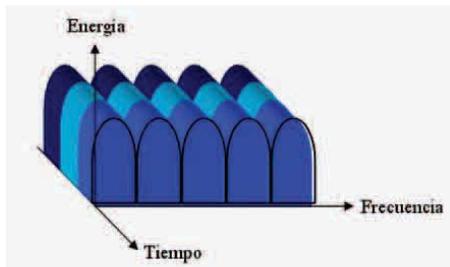


Figura 2. Híbrido FDMA/TDMA

Esta asignación de canales es exclusiva, de manera que los canales no pueden ser utilizados simultáneamente por más de un cliente y cada uno de estos canales está bordeado por pequeñas bandas de frecuencia que evitan solapamientos.

En un sistema TDMA un usuario ocupa el ancho de banda disponible total pero sólo por un corto período de tiempo. El canal de radio frecuencia se divide en intervalos de tiempo y estos son asignados periódicamente al mismo usuario; cada uno de estos intervalos es subdividido en otros dos: uno para el enlace de subida y otro para el enlace de bajada. Todos los intervalos de tiempo están bordeados por intervalos de protección.

En el híbrido FDMA/TDMA, el ancho de banda total del recurso  $W$ , se reparte en forma equitativa en  $M$  grupos de usuarios o clases. De esta forma,  $M$  bandas de frecuencias de  $W/M$  Hertz están disponibles para los grupos asignados. De forma similar, el eje temporal es particionado en tramas de duración  $T$ , las cuales a su vez son particionadas en  $N$  ranuras de duración  $T/N$  segundos, fraccionando el recurso  $W$  en partes más pequeñas. Esto posibilita que muchas estaciones de poco tráfico, que no justificarían un canal completo, puedan compartir el recurso [1] [2].

#### 5. Modulación OFDM

En una comunicación inalámbrica a alta tasa de bits, se requiere un gran ancho de banda. En estos casos el canal es susceptible a ser selectivo en frecuencia. Dividir el ancho de banda total en canales paralelos más angostos, cada uno en diferente frecuencia (FDM), reduce la posibilidad de desvanecimiento por respuesta en cada subportadora [3].

OFDM es un método de transmisión que usa frecuencias portadoras múltiples. Su principio básico es convertir una señal de datos de alta velocidad a varias señales de datos de baja velocidad, dividiendo un canal, de frecuencia, en un número determinado de

bandas de frecuencias equiespaciadas (ver Figura 3). En cada banda se transmite una 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 ortogonal [4].

El hecho de que las subportadoras sean ortogonales entre sí permite que sus espectros estén traslapados, ver Figura 4, y no exista interferencia, aumentando la eficiencia del uso del espectro debido a que no se utilizan bandas de separación entre subportadoras.

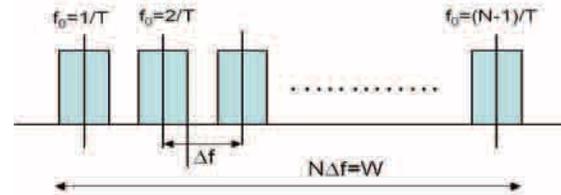


Figura 3: OFDM subdivide la banda total asignada  $W$  en  $N$  sub-bandas.

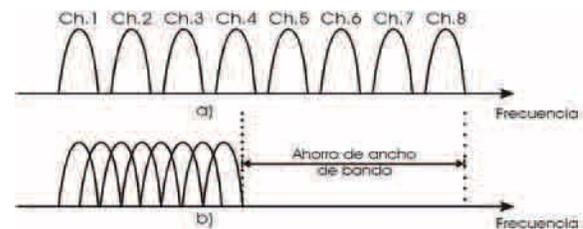


Figura 4. Subportadoras ortogonales permiten traslape de sus espectros sin interferencias.

#### Transmisión OFDM

En la Figura 5 se ilustra un diagrama a bloques de un proceso de transmisión y recepción de una señal en OFDM.

Primero se generan los datos binarios que incluyen la información. Dichos datos son introducidos al transmisor de forma serial. El siguiente proceso es convertir esos datos a paralelo; como ya se dijo anteriormente, los datos en paralelo permiten al transmisor de OFDM crear simultáneamente varias frecuencias de señales portadoras, he aquí el concepto de la multiportadora. Después, cada grupo de símbolos puede ser modulado digitalmente de manera individual (es posible modular cada símbolo con un tipo de modulación diferente). El siguiente paso es que estos símbolos entren a un integrado a gran escala que realice varios cálculos de transformación del dominio de la frecuencia al dominio del tiempo.

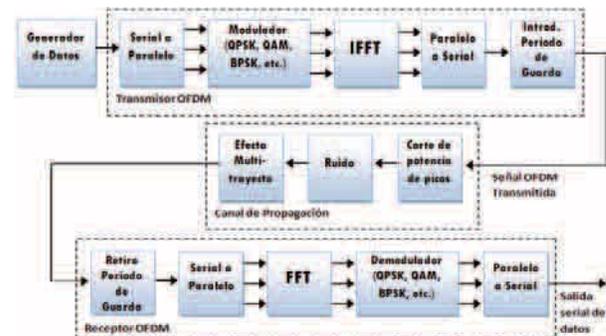


Figura 5. Diagrama a bloques de un proceso de comunicación en OFDM.

Es en este bloque que el concepto de multiportadora tiene origen, ya que la IFFT genera un conjunto de sub-portadoras, cada una espaciada de forma específica. El paso siguiente es generar los periodos de guarda que le van a servir a las portadoras para darle un cierto tiempo de arriba al receptor y así combatir los efectos de la propagación retardada. Después de que los datos son enviados, una serie de ruidos e interferencias, producto de las características de propagación de las comunicaciones inalámbricas, serán adheridos a la señal. Por último, en el receptor, se realiza el proceso contrario [5].

**Generación de subportadoras utilizando IFFT**

Una señal OFDM, consiste en una suma de subportadoras moduladas vía PSK (*Phase Shift Keying*) o QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*). Si  $d_j$  es un símbolo complejo,  $N_s$  es el número de subportadoras,  $T$  la duración del símbolo y  $f_c$  la frecuencia de la portadora, un símbolo OFDM que empiece en el instante  $t = t_s$  se puede escribir como:

$$s(t) = \text{Re} \left\{ \sum_{i=-\frac{N_s}{2}}^{\frac{N_s}{2}-1} d_{i+N_s/2} e^{j2\pi f_c \frac{i+0.5}{T} (t-t_s)} \right\} \quad t_s \leq t \leq t_s + T \quad (1)$$

$$s(t) = 0, \quad t_s + T < t < t_s$$

La notación equivalente en banda base compleja está dada por la ec.(2). En esta representación, la parte real y la imaginaria corresponden a las partes en fase y cuadratura de la señal OFDM, la cual debe ser multiplicada por un coseno y un seno de la frecuencia portadora deseada para producir la señal de OFDM final.

$$s(t) = \text{Re} \left\{ \sum_{i=-\frac{N_s}{2}}^{\frac{N_s}{2}-1} d_{i+N_s/2} e^{j2\pi \frac{i}{T} (t-t_s)} \right\} \quad t_s \leq t \leq t_s + T \quad (2)$$

$$s(t) = 0, \quad t_s + T < t < t_s$$

En la Figura 7(a) se muestra la transformada de Fourier de una señal binaria modulada con cinco subportadoras ortogonales. En la figura se puede ver que los lóbulos laterales de cada una de las señales tienden a coincidir en fases opuestas y se anulan. La figura 7(b) muestra la misma señal en el dominio del tiempo.

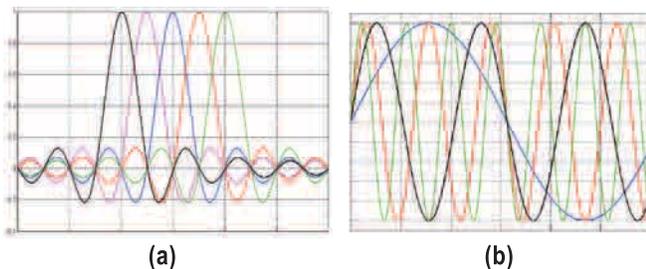


Figura 7. Subportadoras ortogonales, (a) en la frecuencia y (b) en el tiempo respectivamente.

Como se mencionó anteriormente la banda base compleja de la señal OFDM está definida por la ec.(2). Ésta es de hecho la transformada inversa de Fourier de  $N_s$  símbolos de entrada. El equivalente en tiempo discreto es la transformada inversa de Fourier discreta (IDTF), que viene dada por la ec.(3), donde el tiempo es sustituido por un número  $n$ . Esta transformación puede ser implementada en forma eficiente por la transformada inversa rápida de Fourier (IFFT), reduciendo drásticamente la cantidad de cálculos, aprovechando la regularidad de las operaciones en la IDFT [5].

$$s(n) = \sum_{i=0}^{N-1} d_i e^{j2\pi \frac{in}{N}} \quad (3)$$

**6. Periodo de Guarda y Extensión Cíclica**

El principal problema que enfrentan las comunicaciones inalámbricas es la presencia del efecto multitrayecto durante su transmisión (generado en el canal de transmisión). En un ambiente de multitrayecto, la señal transmitida es reflejada por un sin número de objetos. Como resultado de esto, múltiples versiones de la señal transmitida llegan hasta el receptor con un retardo en la información, esto se conoce hoy en día como interferencia entre símbolos, ISI (*Inter-Symbol Interference*).

OFDM fue creado para eliminar, casi por completo este problema, introduciendo un intervalo de guarda a cada símbolo de OFDM. La longitud de dicho intervalo es seleccionada de modo que sea mayor a la propagación retardada esperada. De modo que, si un símbolo de OFDM llega con cierto retraso, el periodo de guarda generará un espacio suficiente para que este símbolo no vaya a interferir con uno subsiguiente. La Figura 8 ilustra un típico caso de la interferencia entre símbolos (ISI)

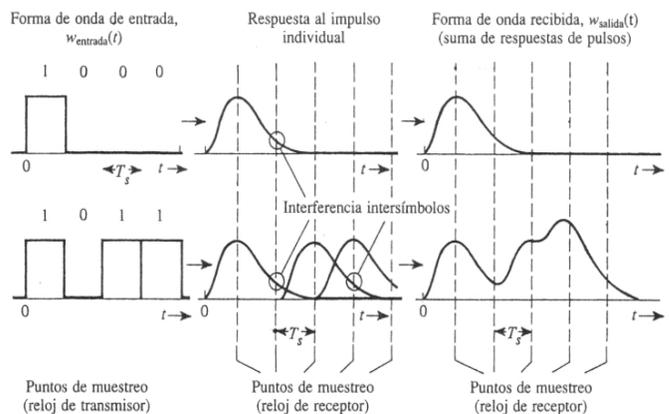


Figura 8. Ejemplos de interferencia entre símbolos (ISI).

El intervalo de guarda, puede consistir de información nula, es decir, de ausencia de señal. En ese caso, sin embargo, es posible que se genere el problema de una interferencia entre portadoras, ICI (*Inter-Carrier Interference*). La ICI es una cierta interferencia que se genera entre varias portadoras, la cual, significaría que la señal de OFDM perdería su principio de ortogonalidad. Para eliminar la ICI, el símbolo de OFDM es extendido cíclicamente en el periodo de guarda, como se muestra en la Figura 9.

De esta manera se asegura que las réplicas retardadas del símbolo de OFDM siempre tengan un número entero de ciclos dentro del intervalo de la FFT. Como resultado de esto, mientras el retraso sea menor al intervalo de guarda, no existirá la ICI [4] [5].

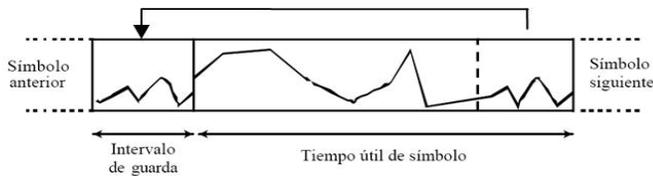


Figura 9. Extensión Cíclica – (CP: Cyclic Prefix)

### 7. Desarrollo Normativo

La norma IEEE 802.16, con su *WirelessMAN™ air interface*, establece las bases para un amplio y eficaz despliegue en todo el mundo sobre las estándares a ser utilizados con OFDMA.

El estándar IEEE 802.16 *WirelessMAN* se creó con el objetivo de agilizar la expansión de los servicios de banda ancha y garantizar la interoperabilidad entre diferentes equipos. IEEE 802.16-2004 establece las características de los sistemas de línea fija con esquemas de modulación OFDM añadidos como parte de la capa física para apoyar el despliegue en entornos multirrayecto.

Posteriormente, el grupo 802.16 comenzó a trabajar sobre mejoras en las especificaciones para permitir la movilidad vehicular. Esta revisión se completó y se publicó formalmente como IEEE 802.16e-2005. En esta se especifica OFDM escalable para la capa física como la capacidad del sistema de cambiar su configuración para adaptarse a los diferentes entornos sin perder la calidad de servicio y se hacen nuevas modificaciones a la capa MAC para dar cabida a la movilidad de alta velocidad.

La norma incluye requisitos para la transmisión de datos a altas velocidades con una conexión de línea de vista (LOS) que operan en un rango de frecuencia de 10-66 GHz para redes inalámbricas fijas, los requisitos para enlaces sin línea de vista (NLOS) para estaciones fijas, portátiles o sistemas móviles que operan en frecuencias menores a 11 GHz, tanto para bandas libres como comerciales, así como también el concepto de escalabilidad que ofrece a la tecnología de banda ancha operar óptimamente en diferentes escenarios que van de 1,25 MHz a 20 MHz, tanto en

sistemas fijos como móviles manteniendo el bajo costo del producto [1][6]. También es compatible con otras características como modulación y codificación avanzada de subcanales, alta eficiencia en estructuras de enlace ascendente, diversidad de múltiples entradas múltiples salidas (MIMO), cobertura y mejoras en la seguridad de canales, así como otras características por defecto de OFDMA entre las que podemos mencionar diferentes asignaciones de portadora y la diversidad de esquemas [7].

### 8. Ventajas / Desventajas de OFDMA

Una ventaja significativa de OFDMA en relación con OFDM es su potencial para reducir la potencia de transmisión, ya que en lugar de tener una explosión de gran potencia a lo largo de todo el ancho de banda, OFDMA permite la misma velocidad de transmisión de datos a través de una más largo período de tiempo utilizando la misma potencia total.

El principal punto débil de la implementación práctica del sistema está en el diseño de los amplificadores para el enlace ascendente. Esto es debido a las variaciones de la envolvente de la señal, que complica la obtención de amplificadores lineales eficientes [5].

### Referencias

- [1] J. Andrews, A. Ghosh y R. Muhamed, *Fundamentals of WiMAX: understanding broadband wireless networking*, 1st Ed., Prentice Hall, Feb. USA, 2007.
- [2] C. Zhongren, *Orthogonal Frequency Division Multiple Access for Broadband Wireless Systems: Algorithms and Implementation*, Castle Point on Hudson, Hoboken, NJ 07030. Ap. 2004.
- [3] ETSI TS 101 475 v1.1.1 (2000-04), *Broadband Radio Access Networks (BRAN); HIPERLAN type 2; Physical (PHY) layer*.
- [4] Intini, Aníbal. *Orthogonal Frequency Division Multiplexing for Wireless Networks*. University of California Santa Barbara. December 2000.
- [5] R. van Nee y R. Prasad, *OFDM for Wireless Multimedia Communications*, 1st Ed., Artech House Publishers Boston–London, USA, 2000.
- [6] IEEE Standard 802.16-2004, Parte 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems, October 2004.
- [7] H. Yaghoobi, "Scalable OFDMA Physical Layer in IEEE 802.16 *WirelessMAN*", Intel Technology Journal, Vol. 8, Issue 3, Aug. 2004.