

Capítulo 4

La norma IEEE 802.16e y WiMAX

4.1 Introducción.

El estándar IEEE 802.16 recoge las especificaciones de una interfaz radio para redes inalámbricas de área metropolitana. Esta interfaz radio se utiliza para dar servicios de banda ancha por lo que se considera una tecnología de acceso¹ inalámbrico de banda ancha o, por sus siglas anglosajonas, **BWA** (*Broadband Wireless Access*).

La motivación inicial con la que se empezó a desarrollar el estándar, era la de crear una tecnología que permitiera hacer llegar los servicios de banda ancha a lugares remotos donde otras tecnologías de acceso de banda ancha² tardaban en llegar. El uso del medio inalámbrico era una buena solución ya que permitía reducir el coste de la infraestructura así como llegar a lugares de difícil acceso donde las tecnologías de acceso cableadas encontraban serias dificultades.

En la actualidad, gracias al desarrollo de la norma, su uso no se limita a ofrecer servicios de banda ancha en entornos de difícil acceso, si no que su uso se ha extendido para ofrecer estos servicios incluso en entornos urbanos, entrando en competencia con otras tecnologías de acceso como las **xDSL**, el cable, o las más recientes **HSDPA** y **HSUPA**.

El estándar IEEE 802.16 trata únicamente las especificaciones correspondientes a la capa de control de acceso al medio (**MAC**) y las correspondientes a la capa física (**PHY**), como se ilustra en la figura 4.1.

4.2 Evolución histórica del estándar IEEE 802.16.

La introducción histórica aquí presentada está basada en gran parte en la recogida en la tesis [22] realizada por Shaswar Baban para la Universidad de Westminster, Londres.

En el año 1998, el IEEE formó el grupo de trabajo 802.16 para desarrollar el estándar homónimo. Sin embargo, no fue hasta diciembre de 2001 cuando la primera versión del estándar fue aprobado. En esta primera versión, el sistema usaba técnicas de modulación con una única portadora (**SC**) situada en frecuencias elevadas, entre los 10 y los 66 GHz. El uso de estas altas frecuencias, provocaba que sólo podían establecerse enlaces en entor-

¹A las tecnologías de acceso también se les suele llamar tecnologías de última milla.

²Por banda ancha entendemos, según la norma, la disponibilidad instantánea de un ancho de banda superior a 1 MHz para transmitir a tasas binarias superiores a 1.5 Mbps.

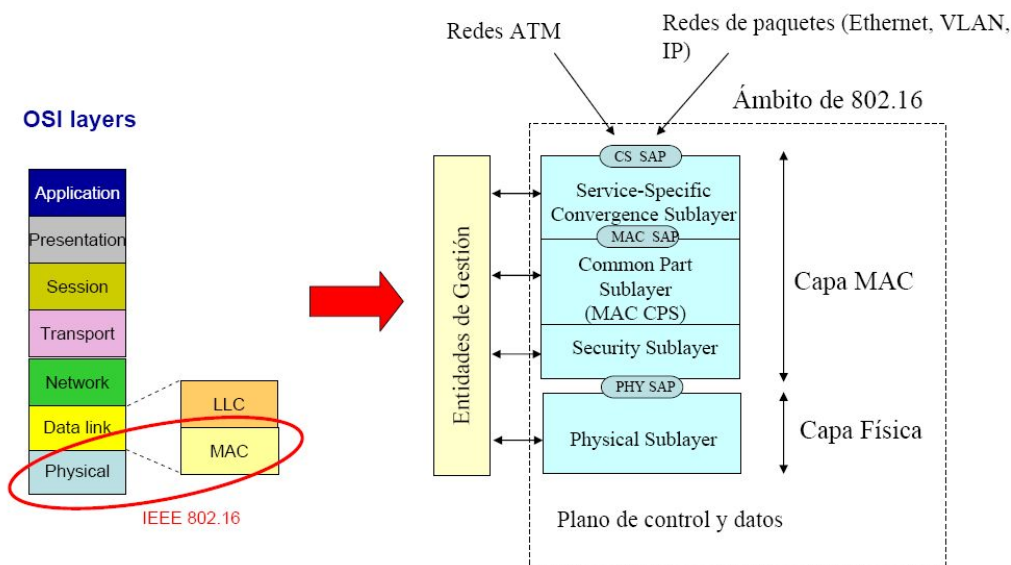


Figura 4.1 Estructura de capas de la norma IEEE 802.16

nos con visión directa³ (LOS), lo cual no era adecuado para entornos urbanos. Además, debido a las altas atenuaciones que sufre la señal a estas frecuencias, era necesario el uso de potencias de transmisión elevadas para tener suficientes alcances, lo que suponía un alto coste del terminal del usuario final. Por estos motivos se amplió el estándar para poder operar en el rango de frecuencias entre los 2 y los 11 GHz, aunque se mantenía el sistema de una única portadora. Esto permitía enlaces que no requirieran de visión directa (NLOS) y permitía reducir la potencia de transmisión, abaratando el coste del terminal.

En 2003, se desarrolló la enmienda IEEE 802.16a, que también incluía la enmienda IEEE 802.16c. En ella se modificaba el estándar inicial para incorporar el uso de OFDM como esquema de transmisión, el cual, como ya hemos visto, se caracteriza por su robustez frente a los fenómenos de multitrayecto que afectan a las comunicaciones inalámbricas. Con OFDM se mejoraban considerablemente las prestaciones del sistema, cuando se trabajaba en condiciones NLOS.

En 2004 la revisión del estándar IEEE 802.16a condujo al estándar IEEE 802.16-2004 también conocido como IEEE 802.16d. Finalmente, las investigaciones llevadas a cabo para soportar movilidad condujeron, en diciembre de 2005, a la última enmienda, la IEEE 802.16e-2005 o simplemente IEEE 802.16e.

Actualmente existen múltiples proyectos en etapa de pre-borrador. Uno de los más interesantes es el denominado IEEE P802.16m, en el que se define una interfaz radio mejorada. Este proyecto está llamado a ser el estándar de próxima generación en el ámbito de las redes inalámbricas de área metropolitana [23].

A la hora de realizar nuestro estudio y simulación, únicamente nos interesan las especificaciones relativas a la capa física. Por ello, vamos a profundizar en este tema en el siguiente apartado.

³Mientras mayor es la frecuencia, mayor es la atenuación que la señal sufre al atravesar un obstáculo y por tanto menor es la capacidad de penetración.

4.3 Especificaciones de capa física (PHY).

En la norma [1] [2] se definen varias capas físicas, las cuales se diferencian por el rango de frecuencias a usar, la necesidad o no de licencia y los esquemas de transmisión empleados. A continuación analizamos las características más importantes de cada una de ellas.

- **WirelessMAN-SC.** Es la capa física del sistema original. Usa una única portadora situada entre los 10 y los 66 GHz. Debido a las altas frecuencias de trabajo se requieren condiciones de visión directa (LOS).
- **WirelessMAN-SCa.** También usa una única portadora pero situada en frecuencias menores a los 11 GHz, lo que permite su uso sin que se den condiciones de visión directa (NLOS).
- **WirelessMAN-OFDM.** En este caso se utiliza OFDM como técnica de transmisión. Las subportadoras se sitúan por debajo de los 11 GHz lo que permite el uso del sistema en entornos NLOS.
- **WirelessMAN-OFDMA.** Respecto a la WirelessMAN-OFDM, incorpora un sistema de subcanalización que permite un uso más eficiente del espectro por parte de múltiples usuarios. Sigue usando OFDM como técnica de transmisión pero aumenta el número de subportadoras que se pueden usar, las cuales siguen por debajo de los 11 GHz por lo que también se puede usar en condiciones NLOS.
- **WirelessMAN-HUMAN.** En realidad con esta denominación nos referimos al resultado de la adaptación de las capas WirelessMAN-SCa, WirelessMAN-OFDM y WirelessMAN-OFDMA para su uso en bandas sin licencia. Una diferencia importante es la obligatoriedad de usar duplexión en el tiempo (**TDD**), ya que en las demás capas se puede usar tanto duplexión en frecuencia (**FDD**) como en el tiempo (**TDD**).

En nuestro estudio del sistema utilizaremos un modelo implementado en MatLab en el que se simula la capa física WirelessMAN-OFDM. Por ello, en lo que resta de capítulo vamos a centrarnos en la descripción de esta capa física concreta, sin considerar el resto (aunque realizaremos alguna que otra comparación con la WirelessMAN-OFDMA). Esto implica que en nuestro estudio no se considerará (entre otras cosas) la subcanalización que se utiliza en la WirelessMAN-OFDMA.

4.3.1 Parámetros de la capa física.

En primer lugar es importante tener claro el uso de OFDM en el estándar. Para que esto sea posible es imprescindible analizar con detenimiento cada uno de los parámetros que definen el sistema. En este apartado tratamos de aclarar aquellos que consideramos más importantes. Para ilustrar nuestra explicación, utilizaremos la figura 4.2, donde se representa gráficamente el significado de cada uno de los parámetros en el dominio de la frecuencia.

- **Ancho de banda nominal, BW.** Ancho de banda que el sistema puede utilizar para su operación. Se relaciona con la frecuencia y factor de muestreo a través de la expresión $BW = F_s/n$. Existen distintos valores contemplados, como los que se pueden apreciar en la tabla 4.6.
- **Frecuencia de muestreo, F_s .** Frecuencia de trabajo del sistema. Esta es la frecuencia a la que se generan nuevas muestras en el convertidor D/A. En la norma

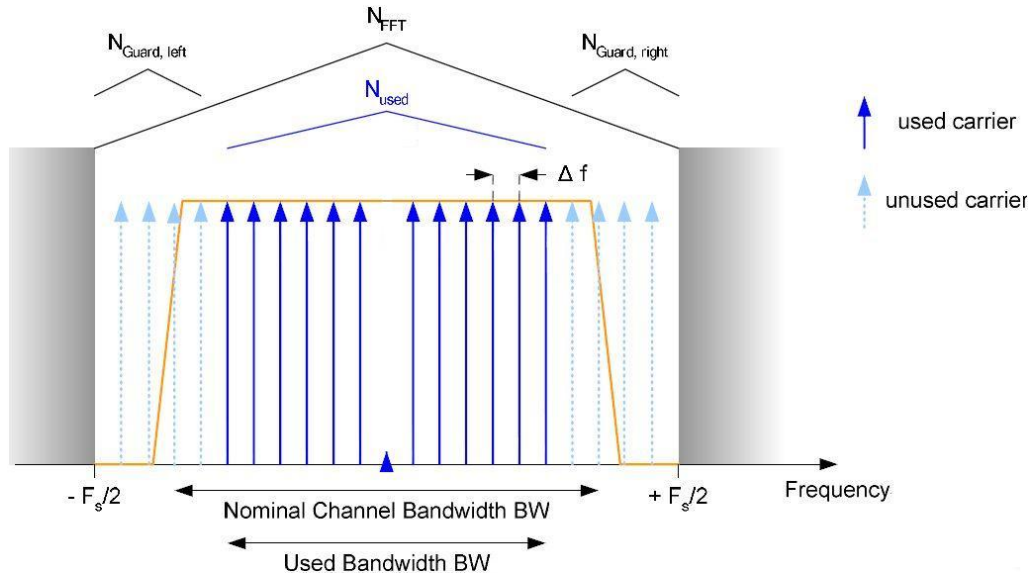


Figura 4.2 Descripción de los parámetros del sistema OFDM de la IEEE 802.16 en el dominio de la frecuencia.

se relaciona con el factor de muestreo y el ancho de banda nominal a través de la expresión $F_s = \lfloor n \cdot BW/8000 \rfloor \cdot 8000$. Como veremos, la frecuencia de muestreo es superior al ancho de banda nominal y puede tomar múltiples valores al depender de este.

- **Factor de muestreo, n .** Este parámetro relaciona la frecuencia de muestreo y el ancho de banda nominal, de acuerdo a la expresión $n = F_s/BW$. Su valor depende del valor que tome el ancho de banda nominal⁴, pero siempre es mayor que la unidad (de ahí que $F_s > BW$).
- **Número de subportadoras o tamaño de la FFT, N_{fft} .** En la capa física WirelessMAN-OFDM su valor es fijo e igual a 256. En la WirelessMAN-OFDMA su valor depende del ancho de banda nominal utilizado, y se elige para que la separación entre subportadoras (que analizamos a continuación) sea fija e igual a 11.94 KHz.
- **Separación entre subportadoras, Δf .** La separación frecuencial entre subportadoras se puede expresar como $\Delta f = F_s/N_{fft}$. En la WirelessMAN-OFDM su valor depende del de F_s ya que N_{fft} es fijo. Como hemos comentado anteriormente, en la WirelessMAN-OFDMA su valor es fijo e igual a 11.94 KHz.
- **Tiempo de símbolo OFDM útil (núcleo del símbolo OFDM), T_{sOFDM} .**
 $T_{sOFDM} = N_{fft}/F_s = 1/\Delta f$.
- **Razón de guarda, G .** Es la razón entre la duración del prefijo cíclico, T_g , y el tiempo de símbolo OFDM útil, T_{sOFDM} . $T_g = G \cdot T_{sOFDM}$.
- **Tiempo de símbolo OFDM (total), T_{OFDM} .**
 $T_{OFDM} = (1 + G)T_{sOFDM} = T_g + T_{sOFDM}$.

En la tabla 4.1 se resumen los valores que pueden tomar alguno de estos parámetros y se muestran los valores de otros parámetros igualmente importantes.

Como vemos, de las 256 subportadoras que especifica la norma 8 se utilizan como subportadoras piloto, 55 como subportadoras de guarda y 200 como subportadoras de

⁴En la WirelessMAN-OFDMA su valor es fijo e igual a 8/7.

Parámetro	Valor
N_{fft}	256
N_{usadas}	200
$N_{guardainf}$	28
$N_{guardasup}$	27
$G = T_g/T_{sOFDM}$	1/4, 1/8, 1/16, 1/32
$N_{pilotos}$	8

Tabla 4.1 Parámetros básicos de la capa física WirelessMAN-OFDM.

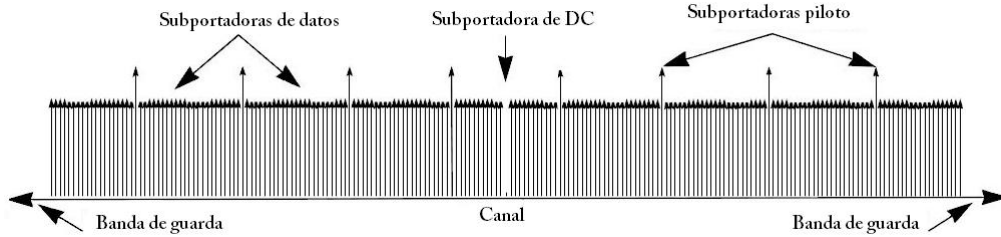


Figura 4.3 Descripción en frecuencia de la señal OFDM. Hay que aclarar que las subportadoras piloto se transmiten con el mismo nivel de potencia que las de datos [1] [2], en la figura aparecen exageradas para distinguirlas mejor.

datos, además de la subportadora de DC que no se utiliza para la transmisión de datos⁵. Las subportadoras piloto se utilizan para tareas de estimación de canal y sincronización, como analizaremos posteriormente en detalle. En la figura 4.3 se muestra el espectro de la señal OFDM.

Llegados a este punto conviene notar que el ancho de banda ocupado por la señal OFDM debe estar contenido en el ancho de banda nominal concedido para su transmisión. Se puede comprobar que esta relación, mostrada en la ecuación (4.1), siempre se cumple. En dicha ecuación hay que considerar que tanto las subportadoras piloto como la subportadora de DC contribuyen al ancho de banda ocupado.

$$(N_{usadas} + N_{pilotos} + 1) \cdot \Delta f \leq BW \quad (4.1)$$

Es importante notar que, como el número de subportadoras N_{fft} es fijo e igual a 256, al cambiar el ancho de banda nominal cambiará la separación entre dichas subportadoras así como la duración del símbolo OFDM⁶. Por ello, dependiendo del ancho de banda que utilice el sistema, la forma en la que este se ve afectado por el canal cambia al variar las relaciones entre la duración del símbolo OFDM y el tiempo de coherencia del canal, y entre el ancho de banda de coherencia y la separación entre subportadoras.

4.3.2 Estructura de la trama de nivel físico.

Para entender adecuadamente cómo se transmiten los datos, resulta conveniente estudiar la estructura de las tramas de nivel físico. Sin embargo, no nos preocuparemos de cómo la capa MAC organiza la información de niveles superiores en estas tramas.

⁵La componente de DC suele suponer un problema desde el punto de vista de la electrónica a la hora de diseñar el receptor [24]. Por ello se transmite sin modular.

⁶Como ya comentamos, en la WirelessMAN-OFDMA esto no ocurre ya que se utilizan distintos números de subportadoras en función del ancho de banda utilizado para que la separación entre ellas se mantenga constante e igual a 11.94 KHz.

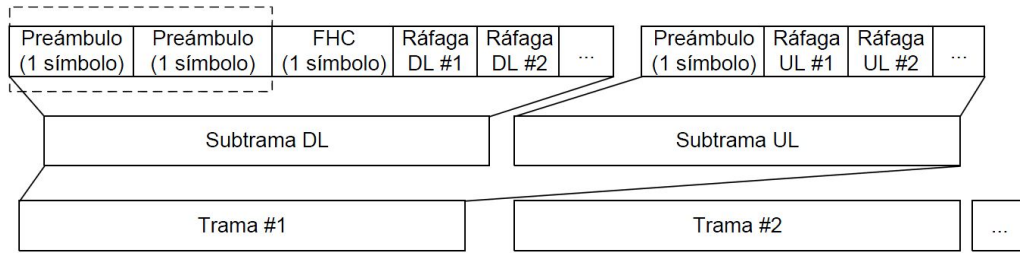


Figura 4.4 Estructura de la trama OFDM.

En la mayor parte de aplicaciones basadas en la norma se utiliza TDD como modo de duplexión. En este caso, la trama de nivel físico se divide en dos subtramas, siendo primera la correspondiente al enlace descendente (DL) y la segunda la correspondiente al enlace ascendente (UL) que se transmiten una a continuación de la otra tal y como se muestra en la figura 4.4. Entre ambas subtramas se deja un intervalo de guarda denominado **TTG** (*Transmit Transition Gap*) para el existente entre subtrama DL y UL y **RTG** (*Receive Transition Gap*) para el que separa la subtrama UL de una trama y la DL de la trama siguiente.

En la tabla 4.2 se recogen las duraciones temporales que se contemplan en la norma para las tramas. En el capítulo 6 analizaremos cómo nos influye esta duración desde el punto de vista de la estimación de canal.

Código	Duración de trama [ms]	Tramas por segundo
0	2.5	400
1	4	250
2	5	200
3	8	125
4	10	100
5	12.5	80
6	20	50

Tabla 4.2 Duraciones temporales de trama recogidas en la norma.

Los preámbulos.

En dicha figura, se puede observar como cada subtrama empieza por un preámbulo, el cual es conocido tanto por el transmisor como por el receptor. Estos preámbulos se utiliza para diversas tareas como sincronización de trama, estimación de canal, identificación de estación base, ... El preámbulo de la subtrama descendente se denomina preámbulo largo ya que se compone de dos símbolos OFDM. Por su parte, el preámbulo de la subtrama ascendente se denomina preámbulo corto por estar compuesto únicamente por un símbolo OFDM. En el preámbulo largo, el primer símbolo utiliza sólo las subportadoras cuyos índices son múltiplo de cuatro (el resto de subportadoras, incluidas las de guarda y DC, se mantienen a cero). Esto da lugar a un símbolo OFDM que, en el dominio del tiempo (tras la IFFT), está compuesto por 4 fragmentos de 64 muestras. El segundo símbolo, por su parte, utiliza solo las subportadoras cuyos índices son pares, dando lugar a un símbolo OFDM que, en el dominio del tiempo, está compuesto por 2 fragmentos de 128 muestras. El preámbulo corto solo presenta un símbolo OFDM cuya estructura es la misma que la del segundo símbolo OFDM del preámbulo largo, esto es, únicamente utiliza las subportadoras cuyos índices son pares. En la figura 4.5, se muestran ambos preámbulos en el dominio del tiempo.

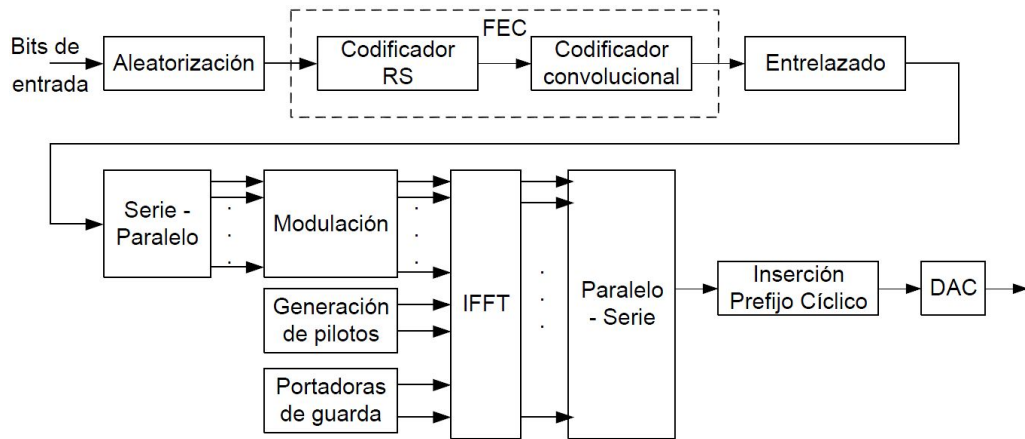


Figura 4.7 Diagrama de bloques del transmisor IEEE 802.16 en banda base.

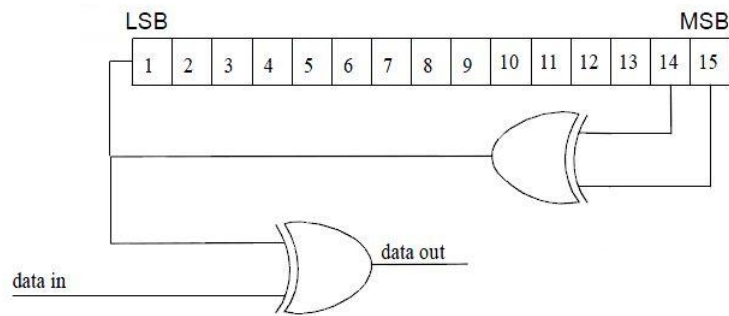


Figura 4.8 Generador de PRBS para el proceso de aleatorización.

pérdida de eficiencia espectral y energética que debida al uso de codificación de canal es menor que la que se experimentaría al tener que retransmitir (en las aplicaciones que lo permitan) las tramas de datos que lleguen erróneas al receptor.

En la capa WirelessMAN-OFDM, la codificación de canal se compone de tres etapas bien diferenciadas, a saber, la aleatorización, la FEC y el interleaving. Estas operaciones se deben efectuar en este orden en transmisión y las operaciones complementarias se deben llevar a cabo en el orden inverso en el receptor. A continuación pasamos a describir cada una de ellas.

Aleatorización.

La primera etapa de la codificación consiste en la aleatorización de los bits. El objetivo de este proceso es el de maximizar la entropía de la fuente, esto es, igualar la probabilidad de transmisión de unos y ceros. Gracias a ello, el detector ML (de máxima verosimilitud) utilizado en el receptor será equivalente a un detector MAP (de máxima probabilidad a posteriori) y, por tanto, óptimo. Como consecuencia del proceso, las largas cadenas de unos y ceros consecutivos que pudieran existir en la secuencia binaria a transmitir se eliminan.

Para realizar el proceso de aleatorización se utiliza un generador de secuencia binaria pseudoaleatoria o PRBS (*Pseudo Random Bit Sequence*), como el mostrado en la figura 4.8, el cual queda descrito por el polinomio $1 + X^{14} + X^{15}$. La secuencia de inicialización que se utiliza está formada por el identificador de la estación base (BSID), el DIUC o DIUC (según estemos en el enlace ascendente o descentente) y el número de trama que se esté transmitiendo. En la figura 4.9 se detalla la formación de las secuencias de

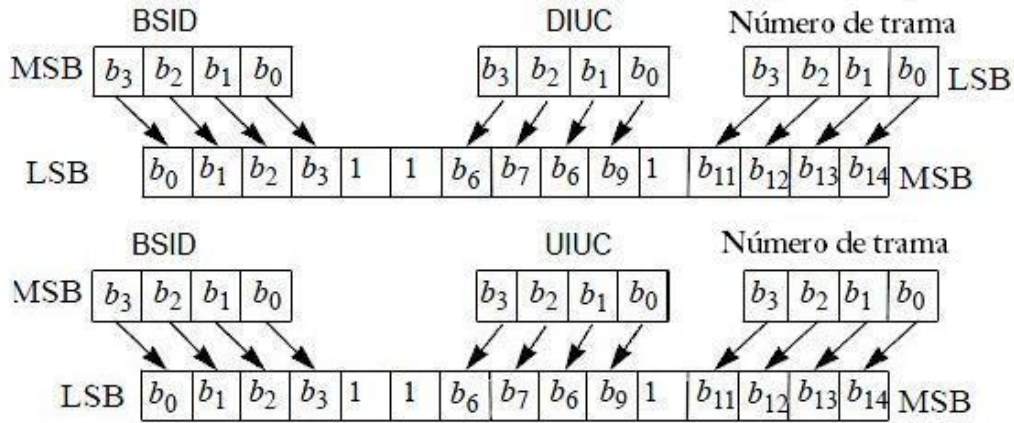


Figura 4.9 Formación de las secuencias de inicialización para el aleatorizador en el enlace descendente (arriba) y el ascendente (abajo).

inicialización para ambos enlaces.

Es importante recalcar que sólo los datos son aleatorizados, por lo que los preámbulos no sufren ningún proceso de aleatorización. Para un mayor detalle sobre esta etapa se remite al lector interesado consultar la norma [1].

Codificación FEC.

Una vez realizado el proceso de aleatorización, el codificador FEC protege los datos aleatorizados añadiéndoles redundancia de forma controlada. Esto permitirá al receptor corregir algunos errores que haya introducido el canal. El codificador se compone de un código Reed-Solomon (RS) como código interno seguido de un código convolucional como código externo. Este código incorpora un proceso de puncturing para obtener distintas tasas de código. La norma también contempla el uso opcional de turbo códigos (BTC y CTC)⁷, los cuales no vamos a analizar en este trabajo.

El código RS es un código de bloque que debe derivarse de un código RS sistemático⁸ ($N=255, K=239, T=8$) que utilice un campo de Galois $GF(2^8)$, donde N es el número de bytes del bloque de salida, K es el número de bytes del bloque de entrada y T representa el número máximo de bytes de datos erróneos que pueden ser corregidos en un bloque. Como se puede observar, el codificador trabaja la tasa del código es $\frac{K}{N} = \frac{239}{255}$. En la norma [1] se explica cómo acortar este código (reducir la redundancia obtenida) para obtener códigos RS de tasas mayores a la original. Para la generación del código se utilizan los siguientes polinomios:

Polinomio generador del código: $g(x) = (x+\lambda^0)(x+\lambda^1)(x+\lambda^2) \dots (x+\lambda^{2T-1}), \lambda = 02_{HEX}$
 Polinomio generador del campo: $p(x) = x^8 + x^4 + x^3 + x^2 + 1$

Una vez los datos atraviesan el codificador RS, el siguiente proceso a llevar a cabo es el de la codificación convolucional. El codificador convolucional utilizado es binario, de tasa 1/2 y longitud de restricción 7, como el mostrado en la figura 4.10.

En la norma se contempla el uso de *puncturing* para conseguir distintas tasas de código. Este proceso consiste en eliminar ciertos bits del flujo de salida codificado, de acuerdo a alguno de los patrones que se recogen en la tabla 4.3. En dicha tabla, un 1

⁷En la WirelessMAN-OFDMA también se contempla el uso de códigos LDPC (Low Density Parity Check).

⁸Los códigos de bloque sistemáticos son aquellos en los que los bits de redundancia son perfectamente distinguibles de los de información (se mantiene el bloque de información original y se le añade el bloque de bits de redundancia antes o después del bloque de información).

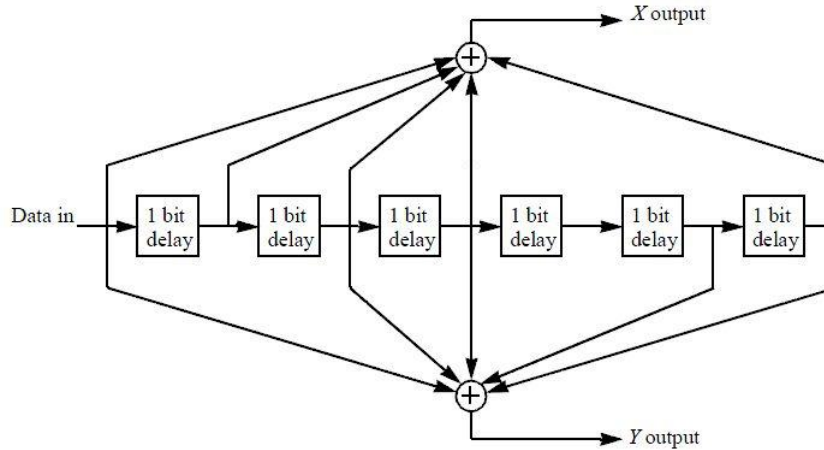


Figura 4.10 Codificador convolucional de tasa 1/2.

denota un bit transmitido mientras que un 0 denota un bit eliminado, y X e Y son las salidas del codificador convolucional en referencia a la figura 4.10.

	Tasas de código			
Tasa	1/2	2/3	3/4	5/6
d_{libre}	10	6	5	4
X	1	10	101	10101
Y	1	11	110	11010
XY	X_1Y_1	$X_1Y_1Y_2$	$X_1Y_1Y_2X_3$	$X_1Y_1Y_2X_3Y_4X_5$

Tabla 4.3 Patrones de puncturing especificados en la norma.

Entrelazado (Interleaving).

Los bits a la salida del codificador son a continuación entrelazados. El entrelazado que se describe en el estándar difiere en cierta forma al que se suele realizar en los sistemas de portadora única a los que estamos habituados, aunque la idea subyacente es la misma.

En los sistemas de portadora única, el entrelazado se realiza para mitigar el efecto que los desvanecimientos selectivos en el tiempo tienen sobre la señal. Estos harán que durante cierto tiempo el canal introduzca una fuerte atenuación que afectará a los símbolos consecutivos que se transmitan por el canal durante ese tiempo. Como consecuencia, en el receptor aparecerán largas ráfagas de bits erróneos que sobrepasarían la capacidad de corrección del código corrector de errores (RS y convolucional), y por tanto este no podrá subsanarlos. El proceso de entrelazado trabaja sobre un bloque de bits realizando un barajado temporal de los mismos en el transmisor para que, al desbarajarlos en el receptor, se dispersen los errores de la ráfaga de modo que los códigos correctores de errores sean capaces de corregirlos.

Como ya sabemos, en los sistemas multiportadora una secuencia de bits consecutivos se transmitirán en el mismo instante de tiempo por distintas subportadoras. En este caso, las ráfagas de errores en el receptor no estarán provocadas por el desvanecimiento selectivo en el tiempo sino por el desvanecimiento selectivo en frecuencia. De esta forma, símbolos que se transmitan por subportadoras adyacentes podrían sufrir una gran atenuación y esto traducirse en una ráfaga de errores en el receptor.

El proceso de entrelazado especificado en la norma se divide en dos etapas o permutaciones:

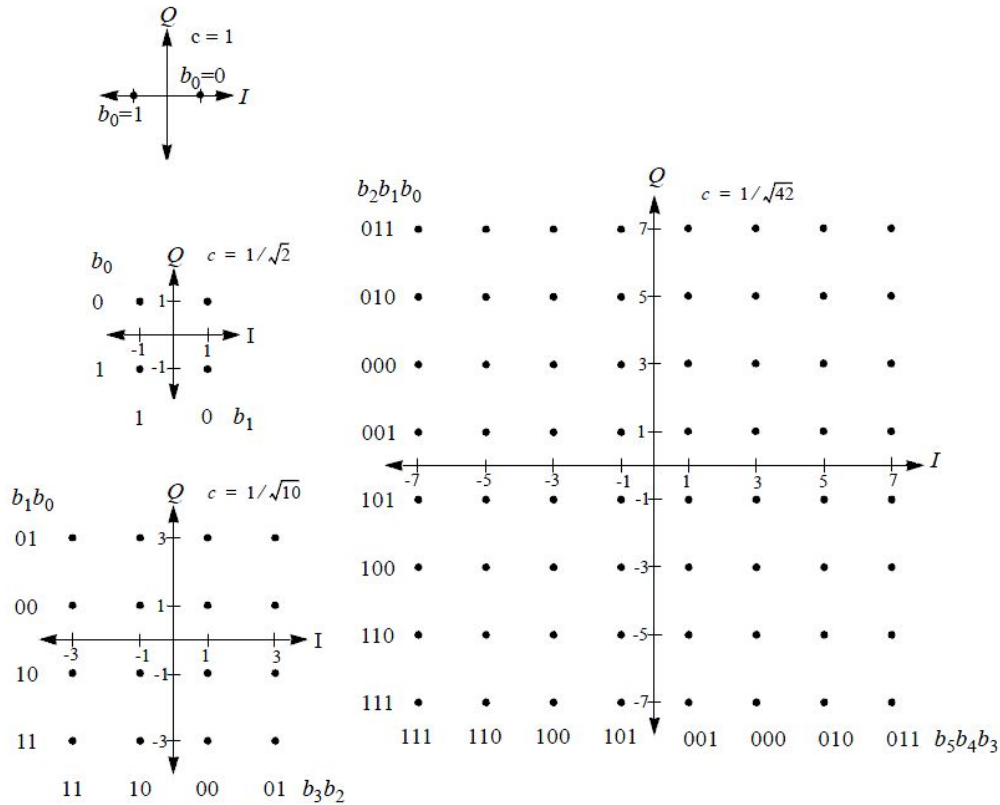


Figura 4.11 Constelaciones BPSK, QPSK, 16-QAM y 64-QAM.

- En la primera se distribuyen la salida de bits del codificador convolucional entre las distintas subportadoras, de modo que bits consecutivos no se transmitan por subportadoras adyacentes.
- En la segunda se asegura que bits adyacentes se mapean de forma alternativo en los bits más y menos significativos (MSb y LSb) de la constelación, para de esta forma evitar largas cadenas de bits de baja fiabilidad.

Se remite al lector a la norma [1] para un mayor detalle de cómo se lleva a cabo este proceso. Ya por último, tras el entrelazado se realiza la modulación de los bits, proceso que pasamos a describir a continuación.

Esquemas de modulación.

El proceso de modulación consiste en mapear un conjunto de k bits entrantes en el modulador en uno de los $M = 2^k$ símbolos complejos de una constelación, la cual depende del esquema de modulación empleado. En el estándar IEEE 802.16 se proponen cuatro esquemas que se pueden utilizar para la modulación de los datos: BPSK, QPSK, 16-QAM y 64-QAM. Cualquiera que sea el esquema de modulación utilizado, el mapeo de los bits se realiza utilizando una codificación de Gray, lo que permite minimizar la probabilidad de error de bit para una probabilidad de error de símbolo dada. En la figura 4.11 se representan los esquemas de modulación propuestos en el estándar.

Como se puede observar, se especifica un factor (“c.” en la figura 4.11), con el que se deben normalizar los símbolos para que todas las constelaciones tengan una energía media igual a la unidad.

Los símbolos mapeados modulan a continuación cada una de las subportadoras del esquema OFDM, para lo cual se utiliza un bloque que implementa la IFFT, como vimos en el capítulo 3.

En el receptor se realizarán los procesos complementarios en el orden inverso, esto es, una vez se ha realizado la FFT y se se hayan decidido los símbolos, se realizará la demodulación de los mismos, el desentrelazado de los bits resultantes, su decodificación (utilizando un decodificador de Viterbi para la etapa de codificación convolucional) y por último la desaleatorización.

Sin embargo, existen otros procesos que se tienen que realizar en el receptor y que no se especifican en los documentos del estándar [1] y [2]. De alguna forma, esto implica que se deja libertad a los fabricantes a la hora de desarrollar el diseño de ciertos procesos del receptor. Uno de estos procesos no especificados es el de la estimación de canal necesaria para la ecualización de la señal recibida. En la norma se definen unos símbolos piloto que modulan determinadas subportadoras del símbolo OFDM y que se destinan a realizar la estimación de canal. En el apartado 4.3.4 se analizan los aspectos que se contemplan en la norma acerca de estos símbolos piloto. Conviene aclarar que en la norma no se detalla cómo hacer uso de los símbolos piloto para realizar la estimación de canal (se podría decir que define las herramientas pero no especifica cómo utilizarlas). Por ello, el objetivo de este trabajo consiste en comparar las técnicas existentes (desde los puntos de vista teórico y práctico) para, a partir de los símbolos piloto realizar la estimación de canal.

A continuación, nos centramos en describir los aspectos contemplados en la norma para, posteriormente en el capítulo 5, abordar el estudio de las técnicas de estimación que constituyen el interés central del presente trabajo.

4.3.4 Estimación de canal en la norma IEEE 802.16.

En la norma [2] únicamente se define la forma en la que deben generarse e insertarse los símbolos pilotos, dejando libertad a la hora de elegir un estimador y método de interpolación concretos. El estudio de estos dos últimos constituye el principal objetivo de este trabajo y se analizarán con mayor detalle en el capítulo 5.

Las subportadoras piloto se insertan en determinadas posiciones para formar el símbolo OFDM. Como veremos en el capítulo 5, el insertar las subportadoras piloto en determinadas posiciones de todos los símbolos OFDM significa que se está utilizando un patrón de pilotos tipo peine. Los símbolos piloto insertados deben tener valores conocidos tanto por el transmisor como por el receptor. Estos valores se obtienen a partir de una secuencia binaria pseudoaleatoria, w_k , la cual se genera utilizando un generador de secuencia binaria pseudoaleatoria o PRBS, como el mostrado en la figura 4.12. Como se observa en la misma, el generador PRBS utilizado se puede describir a través de su polinomio generador $1 + X^9 + X^{11}$.

Tal y como se recoge en la norma, los símbolos piloto que se insertan en el símbolo OFDM de índice k se obtienen a partir del bit w_k utilizando una modulación BPSK sin amplificar⁹ de acuerdo a las ecuaciones (4.4) y (4.5).

$$DL : c_{-88} = c_{-38} = c_{63} = c_{88} = 1 - 2w_k \text{ y } c_{-63} = c_{-13} = c_{13} = c_{38} = 1 - 2\bar{w}_k \quad (4.4)$$

$$UL : c_{-88} = c_{-38} = c_{13} = c_{38} = c_{63} = c_{88} = 1 - 2w_k \text{ y } c_{-63} = c_{-13} = 1 - 2\bar{w}_k \quad (4.5)$$

⁹En el capítulo 5 veremos que los símbolos pilotos se pueden transmitir amplificados respecto a los símbolos de datos para tener una mayor robustez frente al ruido.

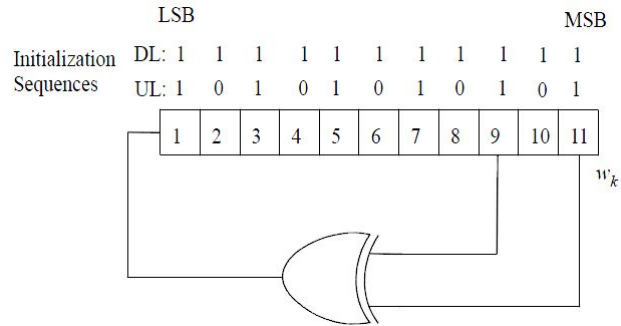


Figura 4.12 Generador de PRBS para los símbolos piloto y secuencias de inicialización.

En el downlink, el índice k representa el índice del símbolo OFDM respecto al comienzo de la subtrama con la que estamos trabajando. En el uplink, el índice k representa el índice del símbolo relativo al comienzo de la ráfaga actual. En ambos enlaces el índice $k = 0$ representa al primer símbolo del preámbulo, por lo que el primer bit a utilizar en la secuencia será el w_2 .

En la tabla 4.4 se resumen los índices de las subportadoras utilizadas como pilotos, subportadoras de guarda y subportadoras de datos.

Subportadoras de guarda	Subportadoras de datos	Subportadoras piloto
-128:-101 101:127	-100: -89, -87 : -39, -37 : -14, -12 : 1 39 : 62, 64 : 87 89 : 100	-88, -63, -38, -13, 13, 38, 63, 88

Tabla 4.4 Posiciones de las distintas subportadoras. La subportadora de índice 0 es la subportadora de DC y se transmite sin modular.

4.4 La tecnología WiMAX.

Como ya se habrá podido apreciar, en numerosas ocasiones se utiliza el término **WiMAX** (*Wireless Interoperability for Microwave Access*) para hacer referencia a la tecnología basada en el estándar IEEE 802.16. Sin embargo, conviene resaltar las diferencias existentes entre ambos, las cuales pasamos a describir a continuación.

El WiMAX Forum es un consorcio de empresas de todo el mundo (fabricantes de chips, desarrolladores de software, fabricantes de equipos, proveedores de servicio,...), cuyo objetivo es el fomento de la interoperabilidad de productos basados en el estándar armonizado IEEE 802.16/ETSI HiperMAN. El garantizar la interoperabilidad de productos permite la práctica de economías de escala, lo que permite la introducción de productos de altas prestaciones a un precio competitivo. De esta forma, el WiMAX Forum contribuye a acelerar el uso de la tecnología WiMAX en el mundo [23]. Para este fin, el WiMAX Forum dispone de laboratorios de certificación en todo el mundo¹⁰, los cuales realizan pruebas de interoperabilidad y adecuación al estándar y conceden a los productos que las pasan con éxito la designación “*WiMAX Forum Certified*”.

Llegados a este punto, conviene aclarar las diferencias existentes entre las especificaciones del estándar IEEE 802.16 y las que definen la tecnología WiMAX. En el estándar

¹⁰En España, la compañía AT4 Wireless, con sede en Málaga, lleva a cabo tareas de certificación del WiMAX Forum.

IEEE 802.16 existen multitud de posibilidades y características opcionales tanto para la capa PHY como para la capa MAC, lo cual dificulta la interoperabilidad entre productos de distintos fabricantes basados en dicho estándar. Es por ello por lo que el WiMAX Forum reduce el conjunto de características opcionales para facilitar dicha interoperabilidad. Las especificaciones expedidas por este consorcio se agrupan en dos grupos:

- Perfiles del sistema. Recogen el conjunto de características y parámetros de las capas MAC y PHY del IEEE 802.16 que constituyen las especificaciones del sistema WiMAX, dando lugar a los perfiles mostrados en la tabla 4.5. Como se puede observar, de entre las 4 tecnologías de capa física definidas en el 802.16, el WiMAX Forum solo contempla el uso de dos de ellas (OFDM y OFDMA).
- Perfiles de certificación. No son más que subconjuntos de las especificaciones de los perfiles del sistema que recogen las características a las que se deben acoger los productos para obtener el certificado de interoperabilidad del WiMAX Forum. Como podemos ver en la tabla 4.6, estas características dependen de la banda de frecuencias de operación, ancho de banda utilizado y modo de duplexión.

Perfiles de Sistema	WiMAX Fijo	WiMAX Evolucionado	WiMAX Móvil
Estándar base	IEEE 802.16-2004	IEEE 802.16e-2005	IEEE 802.16e-2005
Multiplexión	OFDM	OFDM	OFDMA
FFT	256	256	512, 1024, 2048 ¹¹
Duplexión	TDD, FDD, HFDD ¹²	TDD	TDD
Modulación	BPSK, QPSK 16QAM, 64QAM	BPSK, QPSK 16QAM, 64QAM (opcional)	BPSK, QPSK 16QAM, 64QAM (opcional en UL)

Tabla 4.5 Perfiles de Sistema del WiMAX Forum.

Perfiles de Certificación	Bandas de frecuencia	Duplexión	BW del canal
WiMAX Fijo	3.4 - 3.6 GHz	TDD	3.5 MHz 7 MHz
		FDD	3.5 MHz 7 MHz
	5.725 - 5.850 GHz	TDD	10 MHz
WiMAX Evolucionado	4.935 - 4.990 GHz	TDD	10 MHz
WiMAX Móvil	2.3 - 2.4 GHz	TDD	5.10 MHz (dual) 8.75 MHz
			5.10 MHz (dual) 5 MHz
	2.496 - 2.690 GHz		7 MHz

Tabla 4.6 Perfiles de Certificación del WiMAX Forum.

Como comentamos en el apartado de introducción, el estándar IEEE 802.16 únicamente trata los aspectos concernientes a las capas PHY y MAC. Los aspectos relativos a las capas superiores son competencia del grupo de trabajo de red (*Network Working Group*) del WiMAX Forum. Este grupo define la arquitectura de red necesaria para dar servicio mediante WiMAX a los usuarios finales.