

## Capítulo 3

# La norma IEEE 802.16

EN primer lugar, antes de presentar a la norma 802.16, hay que preguntarse cuál es el origen de WiMAX. Pues bien, WiMAX es un consorcio de distintas empresas que se formó en Abril del año 2001 con un objetivo muy claro: asegurarse de la interoperabilidad y mantenimiento de la norma 802.16-2001 por parte de los productos de acceso de banda ancha inalámbricos.

Las organizaciones fundadoras fueron Ensemble, CrossSpan, Harris y Nokia. Más tarde se unieron el OFDM Forum y Fujitsu, ambos en el año 2002; y no fue hasta Marzo del 2003, después de algunos esfuerzos por parte de los que ya estaban dentro, cuando se unieron a WiMAX, empresas como Aperto, Alvarion, Proxim o Intel entre otras.

Actualmente WiMAX cuenta con más de 400 miembros con una fuerte representación de Proveedores de Servicios, Manufacturadores de Sistemas, vendedores de chip e incluso a nivel medio ambiental.

Por otra parte no hay que olvidar, que WiMAX surge porque lo hizo la norma IEEE 802.16. Ésta nace en el año 2001, para encargarse del desarrollo global de las redes locales metropolitanas inalámbricas.

En palabras del grupo de trabajo IEEE 802.16, lo que hacen es desarrollar estándares y recomendaciones prácticas para dar soporte al desarrollo y uso de las redes inalámbricas de área metropolitana o WirelessMAN [28]. Por lo tanto, aunque no significan lo mismo, cuando uno se refiere a WiMAX, también se puede estar refiriendo a la norma 802.16 y sus variantes, aunque sea un uso de los conceptos erróneo.

Antes de terminar esta breve introducción no hay que olvidar el significado de WiMAX: "Worldwide Interoperability for Microwave Access", es decir, Interoperatividad mundial en el acceso a través de microondas.

### 3.1. La Familia 802.16

Hasta la fecha han surgido cada vez más versiones de la norma IEEE 802.16. Comenzaron por la 802.16a, que se aprobó en Diciembre del año 2001, la cual se centraba en definir el acceso de banda ancha fijo.

Más tarde, en Septiembre del 2003, una revisión llamada 802.16d, consiguió acercarse al estándar europeo HIPERMAN. Este proyecto concluyó con la 802.16-2004, en la cual se definía también de forma más concreta la forma de dar soporte al punto de acceso por parte del usuario, como un posible router, módem o los aparatos que entendieran la norma.

Por último, el objetivo de 802.16e (También conocida como 802.16e-2005 o Mobile WiMAX) es la de añadir movilidad al estándar actual, que estaba pensado para entornos fijos. Con esta última definición de la norma, podremos usar la tecnología mientras estamos en movimiento.

A continuación se muestra la evolución a lo largo del tiempo que ha tenido la norma 802.16.

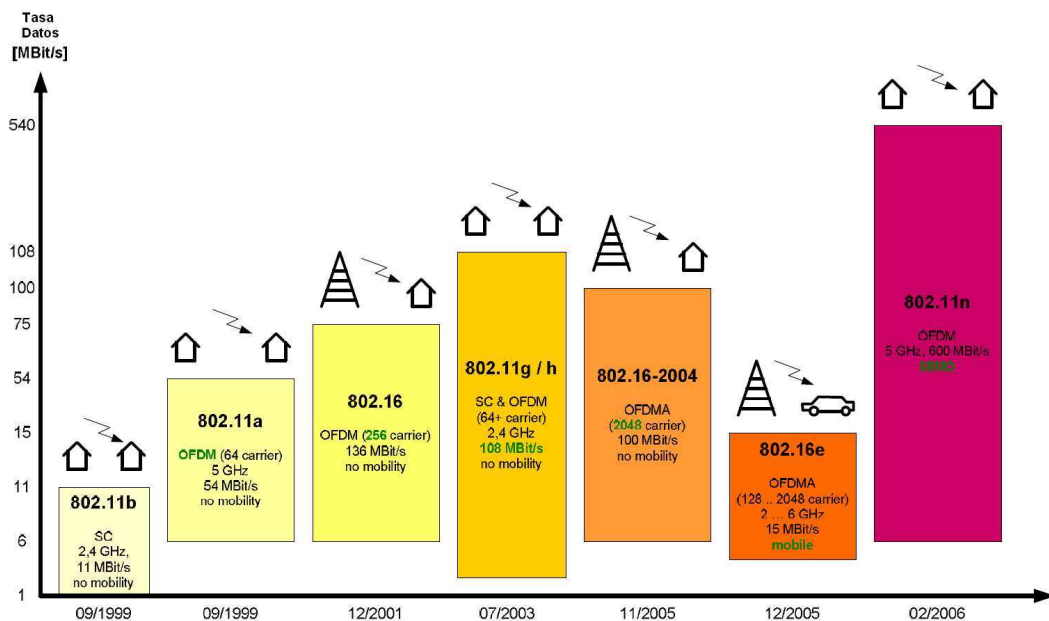


Figura 3.1: Evolución de las normas 802.16 y 802.11 a lo largo del tiempo

No hay que olvidar que las normas están en continuo crecimiento, por lo que merece la pena comentar, en lo que están trabajando actualmente:

*Normas activas:*

- 802.16f - Gestión de la Base de datos de la información (MIB)

*Normas bajo desarrollo:*

- 802.16g - Gestión de procedimientos y servicios

*Normas en la antea:*

- 802.16h - Mecanismos mejorados para la operación en frecuencias exentas de licencia.
- 802.16i - Gestión de la Base de datos de la información móvil.

## 3.2. Características

WIMAX está siendo desarrollado en la actualidad para conexiones punto a punto o punto multipunto típicas en radioenlaces de microondas (IEEE 802.16d), y como ya hemos dicho, ya está desarrollado el estándar para ofrecer movilidad al primer estándar(IEEE 802.16e).

Otra ventaja importante de WIMAX, así de como cualquier tecnología inalámbrica, es que al usar el aire como medio de transmisión, se evitan los gastos de cableado de los sistemas actuales, y gracias a esto es posible comunicar lugares muy apartados que no cuentan con la infraestructura necesaria para su comunicación.

Otro aspecto importante a tener en cuenta cuando se trabaja con WiMAX, es su localización en el espectro de frecuencias, el cual podemos ver en la figura 3.2. Como se puede observar, en la figura se encuentra también el espectro ocupado por la tecnología inalámbrica WiFi.

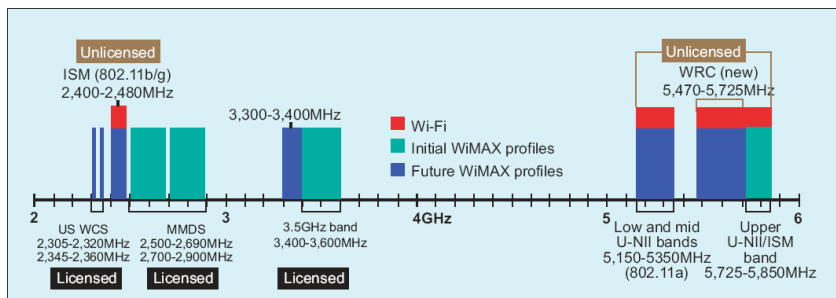


Figura 3.2: Espectro utilizado en la tecnología WiMAX

Como vemos en la figura, WiMAX puede trabajar a diferentes frecuencias. Y no hay que olvidar que para algunas frecuencias se necesita una licencia de uso ("Licensed" en la figura), mientras que para otras no es necesario(En la figura: "Unlicensed"). A continuación se detalla en qué frecuencias se necesita licencia para llevar a cabo un uso de la tecnología de WiMAX [29].

| Banda   | Frecuencias     | ¿Se requiere Licencia? |
|---------|-----------------|------------------------|
| 2.5 GHz | 2.5 - 2.69 GHz  | Sí                     |
| 3.5 GHz | 3.3 - 3.8 GHz   | Sí, en algunos países. |
| 5 GHz   | 5.25 - 5.85 GHz | No                     |

Tabla 3.1: Bandas y frecuencias disponibles en WiMAX

Podríamos preguntarnos cuáles son las ventajas o inconvenientes de usar una banda con licencia o no. A continuación podemos ver las principales ventajas de usar o no un tipo de banda.

| Ventajas del espectro con licencia                        | Ventajas del espectro libre            |
|---|--|
| Mejor calidad de servicio                                 | Productos más <i>rápidos</i> (Mercado) |
| Mejor recepción en entornos NLOS a frecuencias más bajas. | Costes más bajos.                      |
| Mayores barreras para formar parte                        | Más opciones de interoperabilidad.     |

Tabla 3.2: Beneficios de espectro con y sin licencia

No obstante no hay que olvidarse del rango de frecuencias entre 10 y 66 GHz, en las que WiMAX también puede trabajar. En esta banda, debido a una longitud de onda pequeña, es necesario que haya visión directa en la comunicación y el multicamino se puede obviar. El ancho de banda del canal suele situarse en torno a los 25-28 MHz. Como veremos, se define una capa física específicamente para estas frecuencias, denominada "WirelessMAN-SC".

Entre las características más importantes de la norma 802.16 se pueden mencionar las siguientes:

- Utiliza la multiplexación OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) la que permite la transmisión en distintas frecuencias simultáneamente. Utiliza espaciado ortogonal con lo que se puede garantizar que no exista interferencia entre estas.
- Soporta mecanismos de antenas inteligentes, los cuales mejoran la eficiencia espectral en sistemas inalámbricos y distintos tipos de antenas.
- Soporta redes punto multipunto y redes de malla.
- Presenta una calidad de servicio (QoS) para los operadores NLOS consiguiendo que la señal no se distorsione severamente por la existencia de edificios ni otras posibles causas de interferencia.
- Soporta las multiplexaciones TDM y FDM, tal que permite la interoperabilidad entre los sistemas celulares (FDM) y los inalámbricos (TDM).
- Como medidas de seguridad, incluyen mecanismos de criptografía y seguridad propios del sistema.
- Posee un ajuste dinámico del tamaño del paquete de transmisión.
- Tiene aplicaciones de voz, datos y vídeo.
- El sistema WIMAX presenta técnicas de modulación adaptativa dependiendo de las condiciones de la relación señal a ruido (SNR).

- Técnicas como FEC, códigos convolucionales, y otros algoritmos son usados para poder detectar y corregir errores, ayudando a mejorar la relación señal a ruido o SNR. Se incorpora el ARQ (Automatic repeat request), para solucionar los errores que no puede solucionar la FEC.
- En las estaciones base son implementados Algoritmos de control de potencia de tal manera que regulan los niveles de potencia en los CPE (Customer Premise Equipment), de tal forma que la potencia recibida en la estación base sea ya pre-determinada. Con esto se logra un ahorro en la potencia consumida en los CPEs.

Algunas de estas características tan importantes como pueden ser el proceso de codificación, la modulación adaptativa y, por supuesto, la multiplexación OFDM, gracias a la cual, la norma ha conseguido ser apreciada por todos, las detallaremos más adelante cuando nos centremos en el nivel físico, objetivo de nuestra simulación.

Algunos autores, buscando el juego de palabras, se autoconvencen que el MAX de WiMAX significa GRANDE y, de serlo, sería gracias a la utilización de la técnica OFDM para la transmisión de los datos [30].

### 3.3. Capa Física

#### 3.3.1. Introducción

Realmente lo que a nosotros nos interesa es la capa física de WiMAX, sus características más importantes y el modo en que funciona. Por ello, vamos a hacer un estudio de dicha capa, tal y como se muestra en la norma [2] para comprender posteriormente cómo se ha llevado a cabo cada uno de los pasos de la simulación.

No obstante, al considerar el sistema OFDM tan importante en WiMAX, no se merece una simple mención, por lo que se le ha dedicado un capítulo completo, para poder explicar cómo funciona el sistema a nivel matemático y cómo se maneja en la norma.

Por lo tanto, en esta sección tan sólo vamos a hacer una pequeña introducción de OFDM, para estudiarlo con más profundidad en el siguiente capítulo.

#### 3.3.2. Especificaciones

Como bien se puede ver en la norma 802.16-2004[2], se definen 4 especificaciones de capas físicas diferentes, 5 si contamos la que está exenta de licencia, a saber:

| Nombre            | ¿Dónde se aplica?                 |
|-------------------|-----------------------------------|
| WirelessMAN-SC    | 10-66 GHz                         |
| WirelessMAN-SCa   | <11 GHz, Banda con Licencia       |
| WirelessMAN-OFDM  | <11 GHz, Banda con Licencia       |
| WirelessMAN-OFDMA | <11 GHz, Banda con Licencia       |
| WirelessHUMAN     | <11 GHz, Banda exenta de Licencia |

Tabla 3.3: Distintos modos de funcionamiento de la capa física

Como vemos, en el estándar se ha definido una capa física para cada uno de los tipos de modulaciones que hay, teniendo en cuenta a su vez, si la banda de frecuencias de trabajo necesita licencia o no. Por una parte se encuentran las especificaciones para trabajar con una única portadora (SC y SCa) y por otra las que trabajan con OFDM. Por último, si hablamos de situaciones donde no se necesita licencia, se encuentra la estandarización que han denominado WirelessHUMAN.

A partir de ahora, cada vez que hablemos de OFDM refiriéndonos a nuestra simulación, nos referiremos a WirelessOFDM y no a WirelessOFDMa, ya que ésta última utiliza canalización y esta característica no la hemos simulado.

### 3.3.3. Parámetros más relevantes

Cuando se trabaja con OFDM no es difícil perderse si no se sabe bien con qué parámetros se está tratando y cómo influyen unos con otros. Veamos una explicación de los parámetros más importantes que forman parte del proceso de la transmisión de la información con OFDM [31].

De la parte teórica ya podríamos decir que sabemos cómo funciona un sistema multiportadora. A continuación se muestra un ejemplo del espectro en frecuencia de lo que sería un símbolo OFDM. A continuación detallaremos los valores que se definen en la norma 802.16.

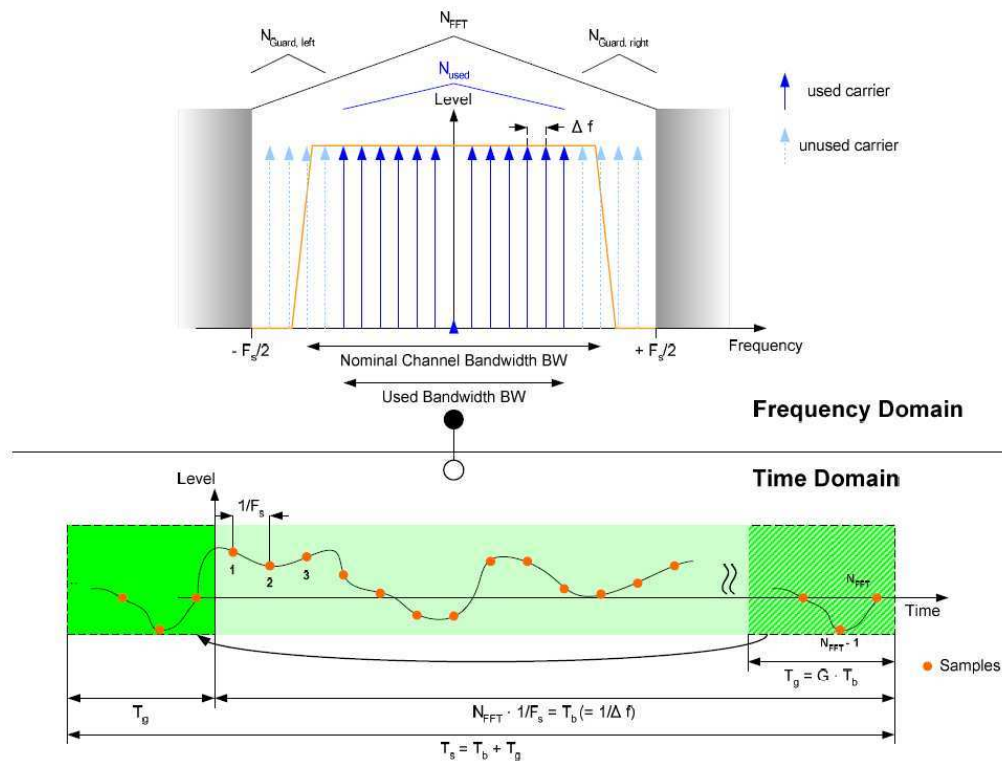


Figura 3.3: Esquema con los principales parámetros a tener en cuenta en un sistema OFDM

**Ancho de banda nominal del canal BW[Hz]**

El ancho de banda que ha sido cedido, por ejemplo por el gobierno.  $BW = F_s/n$ .  
 Valores típicos: 1.5 MHz, 5 MHz ó 20MHz.

**Ancho de banda usado BW[Hz]**

El ancho de banda es el área que es físicamente ocupada por la señal en el dominio de la frecuencia.  $BW = N_{usad} \cdot \delta f$   
 El ancho de banda usado debe ser menor que el nominal.

**Frecuencia de muestreo  $F_s$  [Hz]**

La frecuencia de muestreo es la frecuencia de trabajo del sistema de transmisión, es decir, la frecuencia a la que se generan nuevas muestras.  $F_s = \text{floor}(n \cdot BW/8000) \cdot 8000$ .  
 $F_s$  es siempre mayor que BW

**Factor de muestreo n**

Este factor es igual a la relación de la frecuencia de muestreo con el ancho de banda del canal.  $n = F_s/BW$ .  
 Valores típicos son  $\frac{8}{7}$ ,  $\frac{28}{25}$ ,  $\frac{86}{75}$ , ...

**Tamaño de la FFT.  $N_{FFT}$** 

En OFDM, las señales son procesadas usando la transformada rápida de Fourier (FFT).  $N_{FFT}$  especifica el número de muestras para este proceso y es siempre potencia de 2.

Valores típicos son 256, 512 ó 1024.

**Distancia entre sub-portadoras  $\delta f$ [Hz]**

La distancia entre 2 portadoras OFDM físicamente adyacentes entre ellas. El valor se calcula con la expresión  $\delta f = F_s/N_{FFT}$ .  
 Al depender de la frecuencia de muestreo y de  $N_{FFT}$  este valor es muy variable.

**Duración del símbolo útil  $T_b$  [s]**

La duración en la que un símbolo es válido, es decir, el intervalo de tiempo en el que se encuentran los datos transmitidos.

En el análisis FFT, se refiere a la longitud del intervalo analizado.

**Periodo de Guarda o Duración del prefijo cíclico  $T_g$** 

Para que no empeore mucho la señal a causa del multitrayecto, una porción del símbolo útil (el que lleva la información) se añade al símbolo OFDM final. Todo este proceso lo estudiaremos para entenderlo mejor a la hora de realizar la simulación.

A la relación de ambos tiempos ( $T_g/T_b$ ) se le denomina periodo de guarda y, en el dominio del tiempo, prefijo cíclico ( $T_g = G \cdot T_b$ ).

Valores típicos son  $G = \frac{1}{4}$ ,  $\frac{1}{8}$ ,  $\frac{1}{16}$  ó  $\frac{1}{32}$

**Tiempo (total) del símbolo  $T_s$** 

La duración del símbolo OFDM completo con el tiempo de símbolo útil y el prefijo cíclico ( $T_s = T_b + T_g$ ).

**Número de portadoras usadas  $N_{uso}$** 

Debido a la forma del filtro de transmisión, las portadoras de una señal OFDM pue-

den verse atenuadas. Tampoco se puede usar la portadora de continua.

Consecuentemente algunas portadoras de salida no llevan consigo ningún tipo de datos.

$N_{uso}$  puede variar dependiendo de los modos de transferencia. En nuestra simulación los valores son  $N_{FFT} = 256$  y  $N_{uso} = 200$

#### Portadora de continua

Es la portadora de la frecuencia de transmisión y no se utiliza para la transmisión de datos.

#### Portadoras Piloto

Estas portadoras son usadas para sincronización y estimación del canal en el receptor. En nuestros ejemplos usaremos 8 portadoras.

#### Subportadoras de guarda, $N_{Guarda,derecha}$ y $N_{Guarda,izquierda}$

Dichas portadoras no se usan para la transmisión, en la figura anterior se puede ver dónde se sitúan.

$$N_{FFT} = N_{uso} + N_{Guarda,dcha} + N_{Guarda,izq} + 1(\text{PortadoraDC})$$

### 3.3.4. Trama del nivel físico

Respecto al envío de las tramas, no nos vamos a detener en cómo la capa de enlace (MAC) distribuye la información en las distintas ráfagas de dichas tramas.

Sólo nos interesa comentar un par de detalles, y para ello nos vamos a ayudar de la siguiente figura:

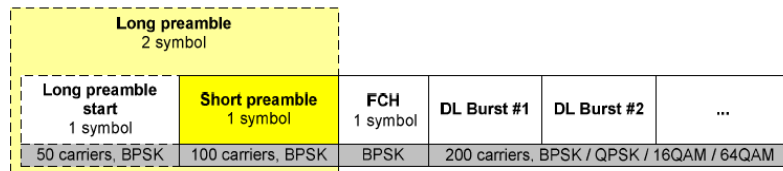


Figura 3.4: Esquema de cómo se construye la trama OFDM

Si nos damos cuenta, antes de las ráfagas de datos, se forma un preámbulo, que nos servirá para hacer una estimación del canal, pues sabemos de forma previa a la transmisión cómo se ha formado dicho preámbulo. Como se puede ver, para formar el preámbulo se utilizan 2 símbolos OFDM. Respecto a la estimación del canal, se puede hacer de varias formas: Haciendo una estimación inicial cada vez que llegue un preámbulo al receptor, que servirá para todas las ráfagas de datos que vengan después; O bien haciendo la estimación utilizando las portadoras piloto de cada ráfaga, que ya sabemos que hay 8 repartidas a lo largo del espectro. En [32, 33] se explica cómo se lleva a cabo la estimación del canal a través de estas portadoras.

Posteriormente se forma la secuencia que da lugar al símbolo FCH (*Frame Control Header*), el cuál se modula con una modulación y una codificación preestablecida (BPSK,



Tasa 1/2).

Por último se envían las ráfagas de datos, que se pueden modular y codificar, como veremos, de diferentes maneras. Cada ráfaga estará formada por un número entero, variable, de símbolos OFDM.

### 3.4. Codificación OFDM

Una vez hemos visto cuáles son los parámetros más básicos que definen un sistema OFDM, tenemos que dar un paso más y dar a conocer cuál es la codificación que sigue la especificación 802.16.

Como veremos, el sistema OFDM tiene multitud de variables que se pueden ir variando para mejorar la calidad del servicio, el número de portadoras que contienen datos, el ancho de banda a utilizar o la forma de mapear los símbolos entre otras cosas.

En este capítulo vamos a ver la forma en la que se tiene que codificar la información tal y como se explica en la norma 802.16-2004 y la siguiente imagen nos muestra, de forma global, cómo es dicho proceso de codificación. Seguidamente vamos a dar una explicación de cada etapa.

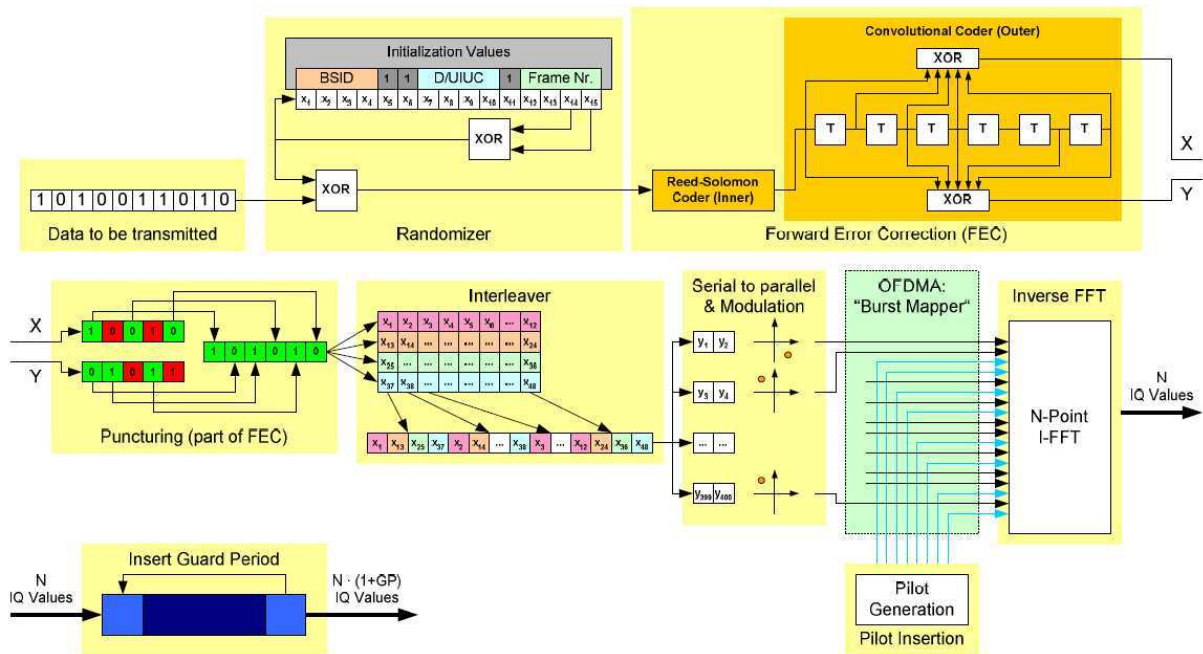


Figura 3.5: Diagrama de bloques de un sistema completo de codificación en OFDM

Como podemos observar, la codificación se puede agrupar en tres etapas principales: Aleatorización de los datos, FEC compuesta de una concatenación de códigos e interlea-

ving, denominando así al proceso de *barajar* las muestras para que los datos de un mismo símbolo no esté en portadoras adyacentes y evitar así las ráfagas de errores.

### 3.4.1. Aleatorización

La aleatorización de los datos se lleva a cabo en cada secuencia de los datos, tanto en el enlace ascendente como descendente. El proceso se realiza independientemente en cada enlace, es decir, que para cada secuencia de cada enlace se comienza la aleatorización con una semilla determinada, sin influir un enlace con otro. Hay que tener en cuenta que si la cantidad de información a aleatorizar no es exactamente la que se necesita en ese enlace, se rellenará con 0xFF (Todo "1") al final de bloque de transmisión.

Hay que tener en cuenta que, si usamos las codificaciones RS-CC y CC (Reed-Solomon-Código Convolutivo o sólo Código Convolutivo), se rellenará con 1s hasta completar la secuencia, pero esta vez, se dejará un último byte sin rellenar a 1s porque el proceso de FEC le añade un 0x00 al final de cada secuencia.

Para realizar este proceso utilizaremos, como ya hemos visto en la figura anterior, un registro que detallamos a continuación. El generador para la obtención de la secuencia binaria que nos interesa es  $1 + X^{14} + X^{15}$  tal y como se indica en la siguiente figura.

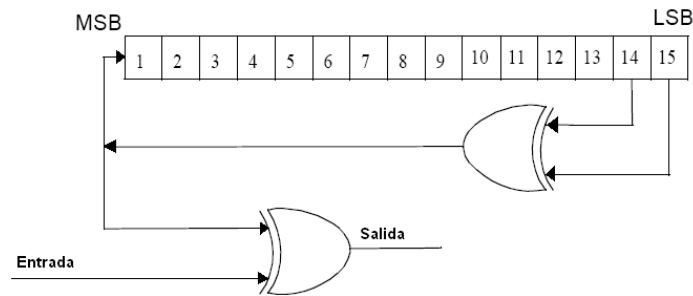


Figura 3.6: Registro de aleatorización de los datos

Cada byte de información que se vaya a transmitir, pasará secuencialmente por el generador empezando por el MSB. No hay que olvidar que los preámbulos de la trama no se aleatorizan. Sólo se aplica a los bits de información.

Como decíamos, tanto el enlace ascendente como el descendente, se codifican de forma independiente, cada uno comienza el proceso de aleatorización con una semilla diferente que detallamos a continuación.

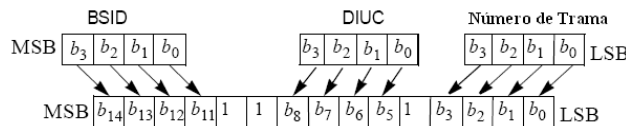


Figura 3.7: Vector de inicialización en el enlace de bajada.

El enlace descendente se reinizará al comienzo de cada trama con la secuencia:1 0 0 1 0 1 0 1 0 0 0 0 0 0. No se reiniciará cuando comience la primera ráfaga. Pero al comienzo de las siguientes ráfagas se debe reiniciar con el vector de la siguiente figura. El número de trama se refiere a la trama en la que va dicha ráfaga que queremos transmitir.

En el enlace ascendente, el registro se inicializa con el vector de la figura 3.8. De la misma forma, el número de trama usada es para indicar en qué trama se encuentra la ráfaga de información.

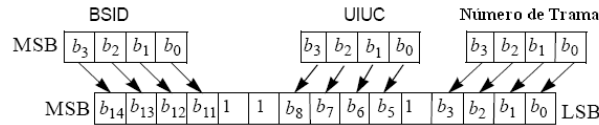


Figura 3.8: Vector de inicialización en el enlace de subida.

De igual forma los términos BSID, UIUC y DIUC, hacen referencia a la estación base en la que está teniendo lugar la comunicación y al intervalo de uso en el enlace ascendente y descendente respectivamente, es decir, la porción de la trama que se utiliza para cada uno de los enlaces.

### 3.4.2. FEC

Consiste en una unión de códigos. Por una parte, un código Reed-Solomon y por otra, un código convolucional adaptado convenientemente a la tasa que se necesite en cada caso. Esta codificación es variable excepto en dos casos: en el de pedir acceso a la red y en el de la transmisión de la ráfaga FCH. En estos dos casos, la tasa que se utiliza es de  $1/2$ .

#### Código Reed-Solomon-Convolucional (RS-CC)

El código de RS a usar deriva de un código RS sistemático con parámetros  $N=255$ ,  $K=239$  y  $T=8$  usando un  $GF(2^8)$ . Donde  $N$  es el número de bytes después de la codificación,  $K$  es el número de bytes de datos antes de la misma y  $T$  es el número de bytes de datos que se pueden llegar a corregir.

Para realizar el código sistemático se usan los siguientes polinomios: (Con  $\lambda = 02_{HEX}$ )

$$\text{Polinomio generador del código: } g(x) = (x + \lambda^0)(x + \lambda^1)(x + \lambda^2) \dots (x + \lambda^{2T-1})$$

$$\text{Polinomio generador de } GF(2^8): p(x) = x^8 + x^4 + x^3 + x^2 + 1$$

El código puede tener longitudes distintas para permitir diferentes tamaños de ráfagas y capacidad de corrección variables. Cuando un bloque contiene  $K'$  bytes de datos, se le añaden  $239-K'$  bytes a  $0x00$  como prefijo. Una vez se codifica estos bytes incluidos se descartan.

Como ya hemos dicho, posterior a la codificación de RS, cada bloque resultante se codifica a través de un código convolucional que tendrá una tasa de 1/2 si no la modificamos. Para ello se utilizan los siguientes generadores:

$$G_1 = 171_{OCT} \quad \text{Para } X$$

$$G_2 = 133_{OCT} \quad \text{Para } Y$$

En la siguiente figura podemos ver el generador de dicho código.

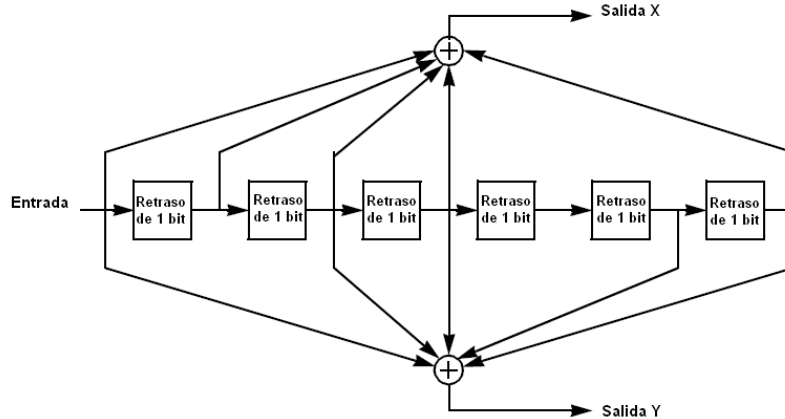


Figura 3.9: Generador del Código Convolucional.

Aunque originalmente se consigue una tasa de 1/2 (salen el doble de bits), se pueden conseguir diferentes tasas para el código con tan sólo extraer ciertos bits del resultado original. Este proceso se denomina *puncturing* y el patrón de los bits a eliminar se encuentra en la tabla que se muestra a continuación.

|      | Tasa del código |             |                |                      |
|------|-----------------|-------------|----------------|----------------------|
| Tasa | 1/2             | 2/3         | 3/4            | 5/6                  |
| 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 3.4: Diversos tipos de *puncturing* en el código convolucional

En la norma, nos dicen que, opcionalmente, se pueden usar códigos BTC y CTC (Turbo Coding). No obstante, como en la simulación no se han llevado a cabo, no vamos a profundizar en su estudio.

### Códigos de baja densidad - LDPC

Los códigos LDPC (Low Density Parity Check) fueron inventados por Robert G. Gallager [34] en los años '60. No obstante se quedaron en el olvido; quizás por la imposibilidad de realizarlos físicamente en aquellos años; y fueron de nuevo *re-inventados* a mediados de los años '90 por MacKay [35] y a partir de entonces hay multitud de artículos

e incluso tesis muy actuales [36] que profundizan sobre la utilidad de este tipo de códigos.

Una de las mejores características de estos códigos es que son capaces de acercarse mucho al límite impuesto por Shannon [37]. En la siguiente imagen vemos una comparativa de diversos códigos y cómo se acercan éstos a dicho límite.

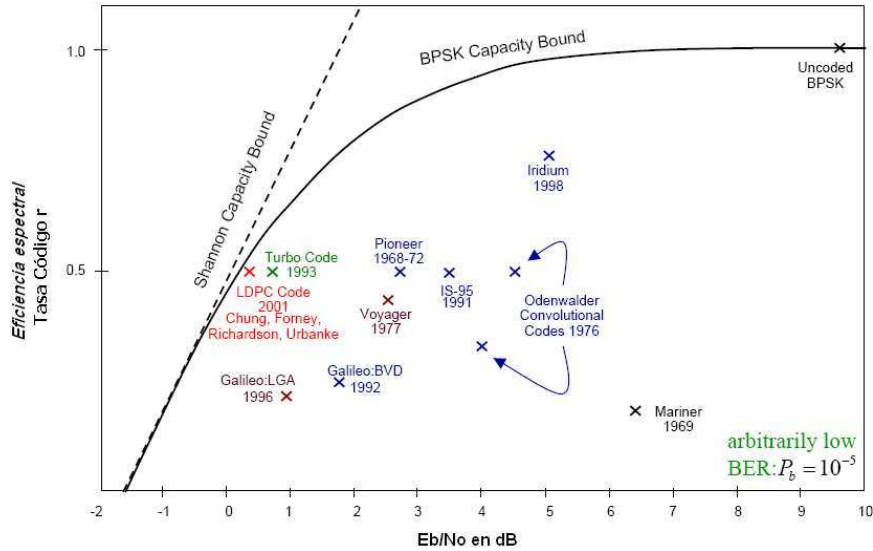


Figura 3.10: Comparativa de diversos códigos respecto al límite de Shannon [1]

En nuestro estudio nos interesan estos códigos porque, aunque opcionales en la norma 802.16d, son los que se utilizan en la recomendación 802.16e-2005 o WiMAX móvil [38]. Nos centraremos en cómo se maneja en la norma esta codificación. No obstante, en el documento [39], existen algunas correcciones a la norma respecto a este tipo de códigos.

La forma de codificar se basa en un conjunto de uno o más códigos LDPC fundamentales. Cada uno de los códigos fundamentales es un código de bloques sistemático y lineal. Dichos códigos fundamentales se pueden acomodar a diferentes tasas y a diferentes tamaños de paquetes. Todo esto se hace usando unas tablas definidas en la norma [38] en el apartado "8.4.9.2.5.2 Code rate and block size adjustment".

Cada código LDPC se define con una matriz  $\mathbf{H}$  de tamaño  $m \times n$ , donde  $n$  es la longitud del código y  $m$  el número de bits de paridad en el código. El número de bits sistemáticos es de  $k = n - m$ .

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \mathbf{P}_{0,0} & \mathbf{P}_{0,1} & \mathbf{P}_{0,2} & \dots & \mathbf{P}_{0,n_b-2} & \mathbf{P}_{0,n_b-1} \\ \mathbf{P}_{1,0} & \mathbf{P}_{1,1} & \mathbf{P}_{1,2} & \dots & \mathbf{P}_{1,n_b-2} & \mathbf{P}_{1,n_b-1} \\ \mathbf{P}_{2,0} & \mathbf{P}_{2,1} & \mathbf{P}_{2,2} & \dots & \mathbf{P}_{2,n_b-2} & \mathbf{P}_{2,n_b-1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \mathbf{P}_{m_b-1,0} & \mathbf{P}_{m_b-1,1} & \mathbf{P}_{m_b-1,2} & \dots & \mathbf{P}_{m_b-1,n_b-2} & \mathbf{P}_{m_b-1,n_b-1} \end{bmatrix} = \mathbf{P}^{\mathbf{H}_b}$$

Figura 3.11: Matriz  $\mathbf{H}$  necesaria para la codificación con el código LDPC

No hay que olvidar que toda esta codificación forma parte de la etapa de codificación de la señal. Por tanto, al igual que ocurre con los códigos de Reed-Solomon y Convulsional, se debe respetar la tasa de codificación. En este aspecto, gracias a un factor de expansión, los códigos LDPC son bastantes flexibles ya que soportan diferentes tamaños de bloques para cada tasa de código.

Como es de esperar, el número de bits de información es igual a la tasa del código multiplicada por la longitud de los bits ya codificados. Como decía anteriormente, en uno de los apartados de la norma aparece una tabla con las tasas y longitudes del código necesarias [38].

### 3.4.3. Interleaving

Todos los bits de datos deben sufrir este proceso. Dependiendo de la modulación usada, tendremos distintos tamaños del bloque a usar en el proceso, puesto que necesitamos un bloque de un determinado tamaño,  $N_{cbps}$ , para aplicarle el algoritmo correspondiente.

El interleaving consta de dos pasos de permutación. Con el primero nos aseguramos que bits adyacentes se mapeen en portadoras que no sean adyacentes. Por otra parte, con la segunda permutación, se consigue que bits adyacentes se mapeen alternativamente en bits más o menos significativos de la constelación.

En las siguientes ecuaciones se deben tener en cuenta los siguientes subíndices:  $k$  es el índice de cada bit codificado antes de la siguiente permutación;  $m_k$  es el índice de ese bit codificado después de la primera permutación y antes de la segunda; Por último  $j_k$  será el índice después de la segunda permutación, justo antes del mapeo oportuno.

La forma que tienen las dos permutaciones es la siguiente:

$$\begin{aligned} m_k &= (N_{cbps}/12) \cdot k_{mod12} + floor(k/12) \\ con \ k &= 0, 1, \dots, N_{cbps} - 1 \end{aligned} \quad (3.1)$$

$$\begin{aligned} j_k &= s \cdot floor(m_k/s) + (m_k + N_{cbps} - floor(12 \cdot m_k/N_{cbps}))_{mod(s)} \\ con \ k &= 0, 1, \dots, N_{cbps} - 1 \end{aligned} \quad (3.2)$$

El *de-interleaver*, el cual hace la operación inversa, también se define con dos permutaciones. Esta vez los subíndices serán  $j$  para el indicar cada bit recibido y justo antes de aplicarle la primera permutación;  $m_j$  indica dicho bit después de la primera permutación y antes de la última; y  $k_j$  el índice del bit después de la segunda permutación, justo antes de entregar el bloque de bits al decodificador.

De nuevo vemos las ecuaciones necesarias para llevar a cabo este proceso:

$$\begin{aligned}
 m_j &= s \cdot \text{floor}(j/s) + (j + \text{floor}(12 \cdot j/N_{cbps}))_{\text{mod}(s)} \\
 \text{con } j &= 0, 1, \dots, N_{cbps} - 1
 \end{aligned}
 \tag{3.3}$$

$$\begin{aligned}
 k_j &= 12 \cdot m_j - (N_{cbps} - 1) \cdot \text{floor}(12 \cdot m_j/N_{cbps}) \\
 \text{con } j &= 0, 1, \dots, N_{cbps} - 1
 \end{aligned}
 \tag{3.4}$$

Dependiendo de la modulación requerida y de si tenemos o no varios subcanales, el número de bits a introducir en el proceso de interleaving puede variar. A continuación se detalla una tabla que relaciona estos parámetros:

|        | Por defecto<br>(16 Canales) | 8<br>Subcanales | 4<br>Subcanales | 2<br>Subcanales | 1<br>Subcanal |
|--------|-----------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|---------------|
|        | $N_{cbps}$                  |                 |                 |                 |               |
| BPSK   | 192                         | 96              | 48              | 24              | 12            |
| QPSK   | 384                         | 192             | 96              | 48              | 24            |
| 16-QAM | 768                         | 384             | 192             | 96              | 48            |
| 64-QAM | 1152                        | 576             | 288             | 144             | 72            |

Tabla 3.5: Tamaño del bloque en el mezclador o *interleaving*

### 3.4.4. Modulación

#### Modulación de datos

Después del proceso de interleaving descrito anteriormente, los bits son introducidos en las constelaciones correspondientes para mapearlas convenientemente. Las modulaciones que podemos escoger son BPSK, QPSK, 16-QAM y 64-QAM (Teniendo en cuenta una codificación de Gray). No obstante el soporte del mapeo 64-QAM es opcional en las bandas exentas de licencias. Las constelaciones deben quedar normalizadas para conseguir tener la misma potencia media. Este factor se indica como "c" en la siguiente figura en la que se detalla cómo debe ser cada constelación.

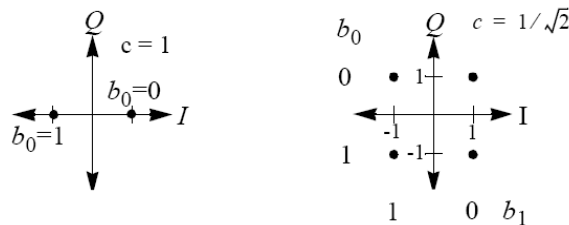


Figura 3.12: Esquema de las modulaciones BPSK, QPSK

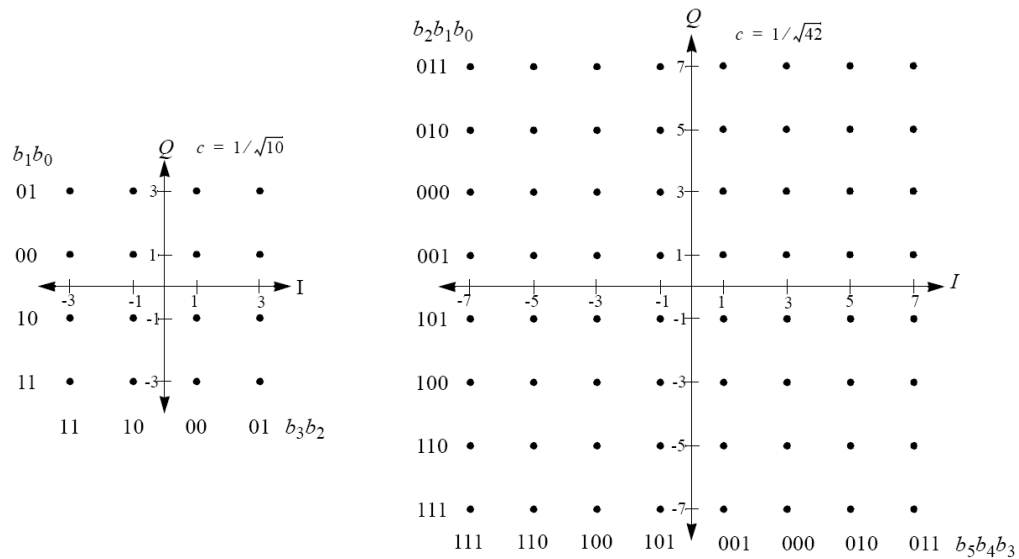


Figura 3.13: Esquema de las modulaciones 16-QAM y 64-QAM

La información ya mapeada debe modularse en las portadoras correspondientes en orden de menor a mayor, es decir, el primer símbolo que sale del proceso de mapeo debe modularse en la subportadora que tenga la menor frecuencia u *offset*.

### Modulación de las frecuencias piloto

Las portadoras piloto deben insertarse en cada ráfaga para formar el símbolo que necesitamos y deben modularse de acuerdo con la localización de su portadora correspondiente en el símbolo OFDM. Aparte de la norma, hay un documento en el que se hace un estudio de la capa física de 802.16, en la que haya un estudio de cómo se mapean las portadoras piloto [40].

El proceso de la modulación de las portadoras piloto no es difícil. Mediante el generador que se muestra a continuación se genera la secuencia  $w_k$ .

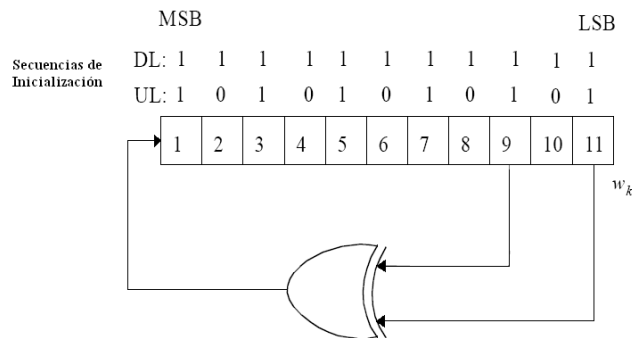


Figura 3.14: El registro utilizado y el vector de inicialización para modular las portadoras piloto



El polinomio generador como vemos es  $X^{11} + X^9 + 1$ . El valor a modular en cada frecuencia piloto para el símbolo  $k$  se obtiene de la secuencia  $w_k$ . En el enlace de bajada el índice  $k$  representa el índice del símbolo respecto al comienzo de la subtrama con la que estemos tratando. Por su parte, en el enlace ascendente el índice representa el índice del símbolo relativo al comienzo de la ráfaga. En ambos enlaces el primer símbolo del preámbulo se denota con el índice  $k = 0$ .

Teniendo en cuenta la secuencia de inicialización que hemos mostrado en la figura 3.14, el resultado comienza por 1111111111000... Por lo tanto para el enlace de bajada, el tercer 1, es decir  $w_2 = 1$ , deberá usarse para el primer símbolo que llegue después del preámbulo. Para cada frecuencia piloto, la modulación BPSK se hace tal y como se muestra a continuación:

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

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

En la norma [2] hay un apartado (8.3.3.5) en el que se muestran varios ejemplos de todo el proceso de codificación y son de gran ayuda a la hora de simular todas las etapas, ya que se puede saber si se está haciendo de forma correcta.

### 3.4.5. Estructura del preámbulo y modulación

Todos los preámbulos se estructuran como lo harían dos símbolos OFDM. Los símbolos OFDM del preámbulo se definen por los valores de las subportadoras. Cada uno de estos símbolos contiene un prefijo cíclico, cuya longitud es la misma que el prefijo cíclico de los símbolos OFDM que contienen datos.

El primer preámbulo en el enlace de bajada consiste en 2 símbolos OFDM consecutivos. El primer símbolo usa sólo las subportadoras cuyos índices son múltiplos de 4. De esta forma resulta, en el dominio temporal, una forma de onda formada por 4 repeticiones de 64 muestras, precedidas por el prefijo cíclico.

En segundo lugar el símbolo OFDM se forma utilizando tan sólo las subportadoras pares, dando lugar, en el dominio del tiempo, a una estructura formada por 2 repeticiones de un fragmento de 128 muestras, precedidas por el prefijo correspondiente. La siguiente figura muestra cómo es el preámbulo en el dominio del tiempo. A la unión de los dos símbolos se le denomina "Preámbulo Largo".

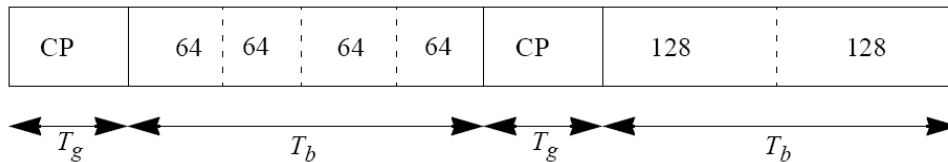


Figura 3.15: Estructura del preámbulo

Al no incluir estos preámbulos en la simulación, no voy a seguir desarrollando la forma de obtener los valores correspondientes para cada frecuencia, para cada símbolo explica-

do anteriormente. En la norma [2] se encuentra un estudio detallado de cómo conseguir dichos valores.

En cambio, sí merece la pena destacar, que los preámbulos en cada enlaces son distintos, ya que el preámbulo en el enlace ascendente, cuando se usan los 16 subcanales, es idéntico al segundo símbolo OFDM usado en el Preámbulo largo, es decir, sólo toma las subportadoras pares.

### 3.4.6. Diversidad

Como es sabido, en las comunicaciones a través del aire, se recurre a la utilización de técnicas de diversidad para superar los efectos adversos del desvanecimiento selectivo. Estas técnicas consisten en la transmisión de la misma información por dos "camino radioeléctricos" diferentes, que se vean afectados de forma diferente por el desvanecimiento. Al hablar de caminos radioeléctricos, nos referimos a cualesquiera de los parámetros de un vano (recorrido, frecuencia, ángulo, polarización), que configuran otros tantos sistemas de diversidad [41].

Hay muchos tipos de diversidad y diferentes formas de clasificarlas. Por una parte se pueden ordenar según los parámetros del camino (Diversidad de espacio, de frecuencia o de trayecto entre otros); o según el tipo de procesamiento de la señal (conmutación o combinación).

Por el simple hecho de cómo trabaja la transformada de Fourier, podríamos decir que tenemos diversidad en frecuencia de los datos, ya que, los mismos bits de información, se reparten entre las distintas frecuencias entremezclados. No obstante, también nos podríamos aprovechar de la diversidad espacial si trabajáramos con varias antenas receptoras y/o transmisoras. En la simulación de los canales SUI [18] se hace mención a cómo afecta el hecho de tener un par de antenas en la comunicación, teniendo en cuenta la correlación entre ellas.

Por último comentar que, aunque no vamos a realizar un estudio teórico de cómo afecta la diversidad espacial en la probabilidad de error, la relación SNR u otros parámetros de interés, se ha demostrado ser una herramienta efectiva para la propagación NLOS [42].