

# **CURSO DE TELEVISIÓN**

## **CAPÍTULO 5: SISTEMAS DE DIFUSIÓN**

### **DIFUSIÓN DIGITAL TERRENA: COFDM**

#### **1. INTRODUCCIÓN**

COFDM (Coded Orthogonal Frequency Division Multiplex) son las siglas que denotan la modulación elegida para transportar la señal de televisión digital en el estándar DVB (Digital Video Broadcasting) en el medio terrenal.

Este apartado del curso sobre COFDM se desarrollará de la siguiente manera:

- Durante la introducción se hablará primero sobre un poco de historia, a continuación se tratarán los aspectos principales que caracterizan esta modulación y, por último, se verá qué características son favorables para la utilización de esta modulación en la difusión terrenal.
- Durante el apartado llamado transmisor se hará una descripción de las partes que forman dicho elemento. Se verá cual es la motivación de la inclusión de cada bloque en la cadena transmisora explicando la función que desarrolla.
- En el apartado del receptor se desarrollará este elemento de una manera análoga a lo hecho en el transmisor explicando la función específica de cada bloque de la cadena receptora.

A lo largo de todo el trabajo se busca explicar conceptos y dar una visión global de la modulación rehuyendo de la formulación matemática por simplicidad. Dicha formulación se puede encontrar en bibliografía más específica sobre el tema.

## **1.1 UN POCO DE HISTORIA**

Esta modulación no es de nueva creación. El concepto de transmitir datos en paralelo y hacer un multiplexado por división en frecuencia es una idea aparecida ya a mediados de los años sesenta. Ya en el mes de Enero de 1970 se presentó una patente en Estados Unidos con la idea de transmitir datos en paralelo al multiplexar por división en frecuencia con solapamiento de los subcanales, de esta manera se empleaba el ancho de banda total disponible. Las primeras aplicaciones se realizaron en el campo militar.

En el caso de tener un gran número de subcanales el conjunto de generadores sinusoidales y demoduladores coherentes que se requieren para un sistema así hacían que el sistema fuese caro y complejo. Fueron Weinstein y Ebert quienes aplicaron la transformada discreta de Fourier (DFT) a la transmisión de datos en paralelo como parte del modulador y demodulador.

Los avances en la escala de integración electrónica hacen posible que se pueda disponer de chips que realizan la transformada rápida de Fourier (FFT) y, por lo tanto, hacen factible la aplicación de la modulación COFDM.

En los años 80 esta modulación se estudió para su uso en módems de alta velocidad, comunicaciones digitales para móviles, grabaciones de alta densidad y comunicaciones de datos en banda ancha sobre canales de radio FM para receptor móvil.

En esta década se debe resaltar el estudio sobre el que fue objeto la modulación para su empleo en el medio terrenal. Fue finalmente elegida como la modulación para el estándar de radio comercial digital DAB (Digital Audio Broadcasting). Los resultados obtenidos en el proyecto DAB resultaron sin duda fundamentales para la elección de esta modulación en la radiodifusión terrenal de las señales de televisión.

## **1.2 PRINCIPIOS DE LA MODULACIÓN**

La modulación tiene como fin fundamental adecuar los datos que se quieren transmitir a las características del canal empleado. Esta modulación es un sistema de transmisión en paralelo, es decir, varios datos son transmitidos en el mismo instante de tiempo por múltiples portadoras, portadoras que se eligen de forma que sean ortogonales entre sí. El principio de ortogonalidad define la separación entre portadoras de manera que sea exactamente igual al recíproco del periodo de símbolo útil. Durante este periodo de símbolo el canal deberá de ser estable, por lo tanto, la estabilidad del canal afecta tanto al espaciamiento entre portadoras como la cadencia de transmisión de datos.

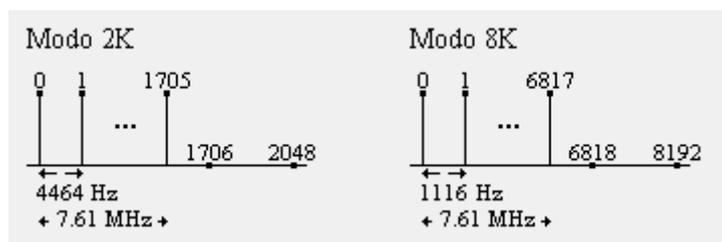
La ortogonalidad de las portadoras puede ser mantenida siempre y cuando el canal no introduzca interferencia entre símbolos (ISI). En la práctica los canales siempre introducen ISI y para prevenirla se utiliza en esta modulación el concepto de intervalo de guarda, que se explicará más adelante de forma detallada.

El concepto de lo que se hace fundamentalmente en esta modulación se puede entender de esta manera: tenemos una secuencia de símbolos que queremos transmitir; estos

símbolos se ven como puntos en frecuencia de una señal. Por esto se agrupan de  $N$  en  $N$  (a cada grupo de  $N$  símbolos se les llama supersímbolo) y se hace un FFT inversa. El número de portadoras que vamos a tener se corresponde con el número de puntos que van a ser procesados en el algoritmo de la IFFT. En recepción bastará aplicar la transformada directa de Fourier a las muestras recibidas para recuperar la secuencia de datos transmitida.

En el estándar de esta modulación hay dos modos de transmisión con 2K o 8K portadoras. En un caso se emplea una FFT de 2048 puntos mientras que en el otro caso la FFT es de 8192 puntos. Sin embargo, la información útil transmitida por segundo es igual en los dos sistemas, dado que en uno se transmite más rápido pero menos información de cada vez, y con igual ancho de banda. Hay diferencias entre el uso de un modo u otro, ya que en el modo 2K hay una mayor separación entre portadoras lo que disminuye los efectos de las interferencias y en el modo 8K el hecho de que haya un mayor número de portadoras provoca que sea más sencilla la realización de la [igualación](#).

Otro aspecto de interés de la modulación es el ancho de banda que ocupa y que vamos a ver a continuación: el estándar toma como valores para el periodo de símbolo útil  $T_0 = 224 \mu\text{s}$  para el modo 2K y  $T_0 = 896 \mu\text{s}$  para el modo 8K. Para mantener el principio de ortogonalidad se obtiene como espacio entre portadoras  $1/T_0 = 4464\text{Hz}$  (modo 2K) y  $1/T_0 = 1116\text{Hz}$  (modo 8K) con lo que se obtiene un ancho de banda para ambas modulaciones de 7.61MHz, que es lo suficientemente pequeño como para poder ser transmitido en las bandas del espectro de UHF existentes para la transmisión de señal de televisión analógica (8MHz). Nótese que el ancho de banda obtenido es fruto de multiplicar  $1/T_0$  por 1705 o 6817 y no por 2048 o 8192 como cabría esperar. El motivo de estos números reside en que en esta modulación se trabaja con tramas MPEG junto con algunos símbolos de control que dan lugar a 1705 o 6817 símbolos a transmitir. A la hora de hacer la IFFT se completa con ceros (por motivos de eficiencia), que al ser vistos en frecuencia, no afectan al ancho de banda final de la señal modulada.



### 1.3 VENTAJAS DE LA MODULACIÓN

#### **Igualación.**

Las características de esta modulación facilitan la [igualación](#) en el receptor. Esta modulación distribuye una serie de portadoras a lo largo de todo el ancho de banda que se va a usar en la transmisión, por lo tanto, es muy fácil hallar la respuesta en frecuencia del canal mediante la transmisión de una secuencia de entrenamiento o una serie de señales piloto.

#### **Protección contra desvanecimientos.**

Un desvanecimiento es una distorsión provocada por las variaciones de las características físicas del canal que tiene como resultado una disminución de la potencia recibida. Las mayores distorsiones son provocadas por los desvanecimientos profundos que son selectivos en frecuencia, afectando de manera distinta a las diferentes componentes frecuenciales de la señal enviada. De esta manera, algunas frecuencias se verán muy atenuadas mientras que otras pueden tener una ganancia en potencia. Suelen ser provocados por la existencia de [multitrayecto](#) al producirse una interferencia entre los rayos que alcanzan el receptor, teniendo como señal resultante la suma de las señales que llegan hasta él.

Como consecuencia inmediata de la atenuación soportada en las portadoras más afectadas por el desvanecimiento, se puede citar que si el nivel de ruido en el canal es suficientemente elevado, no va a ser posible recuperar la información transportada por las mismas, hecho que implicará la aparición de una ráfaga de errores en la decodificación como consecuencia de la pérdida de los símbolos que las modulan.

Lo visto hasta ahora sobre la modulación (llamada OFDM) no proporciona ninguna protección contra estos desvanecimientos. Como solución se dota a la modulación de un codificador de canal compuesto de dos elementos: un código convolucional y un barajador (por este motivo pasa a llamarse la modulación Coded-OFDM).

La intención pretendida al introducir un código convolucional es añadir cierta redundancia en los datos que se desean transmitir, redundancia que en recepción será empleada en la corrección de errores. Esa corrección de errores tiene ciertas limitaciones pues si a la entrada del decodificador apareciese una secuencia larga de errores, este elemento no sería capaz de decodificar de una manera correcta. Para acortar la longitud de estas ráfagas de errores, y que sean abordables por el código convolucional, se añade el barajador.

El barajador trata de introducir un cierto desorden de manera que las portadoras adyacentes no sean moduladas por datos consecutivos. Si se produce una pérdida de información llevada por portadoras adyacentes, al deshacer el desorden debido al barajador, el error debido a cada portadora queda aislado, acortándose la longitud de la ráfaga.

A modo de resumen se puede decir que el efecto conjunto del código convolucional y del barajador puede verse como un promediado de los desvanecimientos locales sobre todo el espectro de la señal.

### **Redes de frecuencia única.**

En un principio se podría pensar que el [multitrayecto](#) es debido a causas exclusivamente naturales, pero el hecho de tener herramientas para paliar los efectos del mismo, puede inducir a pensar que de manera artificial se introduzca un multitrayecto controlado como consecuencia del empleo de redes de frecuencia única.

El espectro para radiodifusión de televisión está muy saturado ya que con el actual sistema de modulación un canal de televisión ocupa el propio canal, los adyacentes, los canales del oscilador y el canal imagen, es decir, cinco más aparte del propio. Además, para la radiodifusión de una misma señal por parte de dos transmisores geográficamente adyacentes, se tiene que usar dos canales distintos, precisamente por culpa del multitrayecto. Usando la modulación COFDM se podría tener una red de transmisores que operen todos en la misma frecuencia, una red de frecuencia única (SFN).

COFDM se apoya en el intervalo de guarda para paliar los efectos del [multitrayecto](#), sea este natural o artificial, fruto de que un receptor reciba señales procedentes de diversos transmisores.

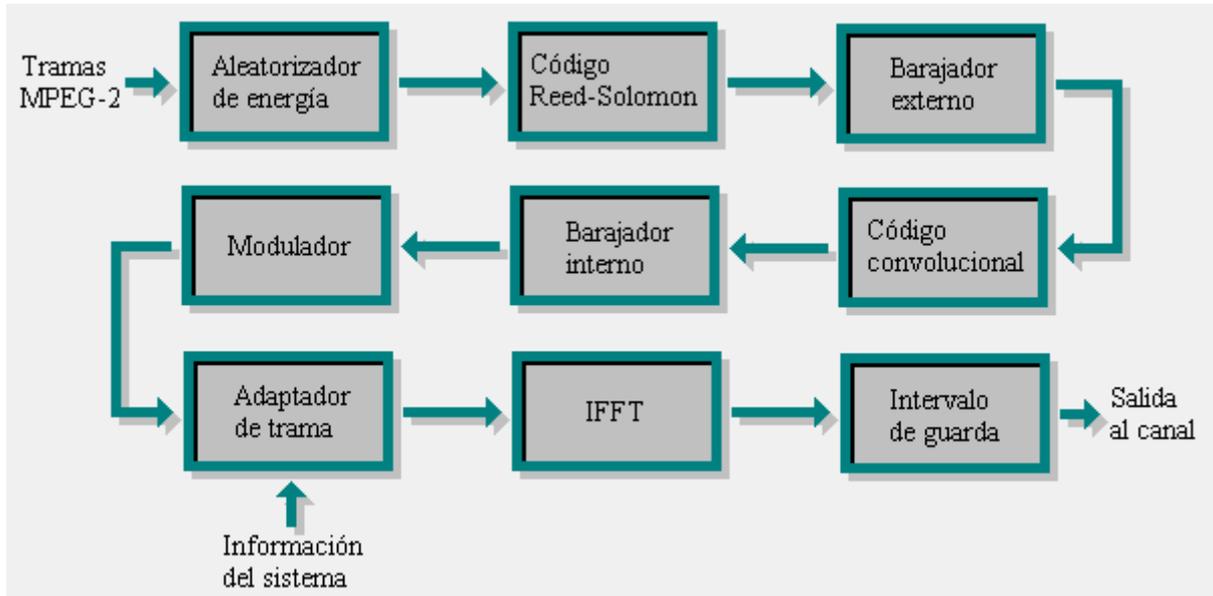
Aparte del mejor aprovechamiento del espectro, otra ventaja de las redes de frecuencia única es que debido a la adición de señales provenientes de dos transmisores cercanos pertenecientes a la red, se produce una ganancia que se denomina *ganancia de red*. Esta ganancia trae consigo múltiples ventajas: la infraestructura para la radiodifusión es más barata, ya que se necesita menos potencia en los transmisores; hacen un mejor uso de la potencia transmitida y logra una mejor cobertura.

Un inconveniente es que la división de la red no es posible; es decir, en caso de querer radiodifusión regional sería necesaria la creación de una red por ámbito de radiodifusión.

## 2. TRANSMISOR COFDM

### 2.1 DIAGRAMA DE BLOQUES

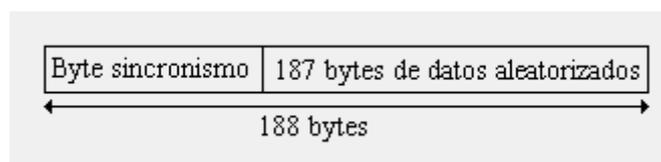
A continuación se presenta el diagrama de bloques del transmisor:



En el diagrama arriba expuesto se puede ver cada uno de los elementos que conforman la cadena emisora y su disposición. Se ha omitido la parte de radiofrecuencia y se muestra la ubicación e interconexión entre elementos tal y como viene recogido en el estándar.

Los tres primeros elementos del diagrama son comunes a otros estándares vigentes como el estándar de difusión vía satélite y difusión por cable. Estos elementos se orientan fundamentalmente a la implementación de un codificador externo que permite la corrección de errores tomando bytes como unidades de trabajo. El resto de los elementos proporcionan la modulación requerida, en el caso que nos ocupa, COFDM, y trabajan a nivel de bit.

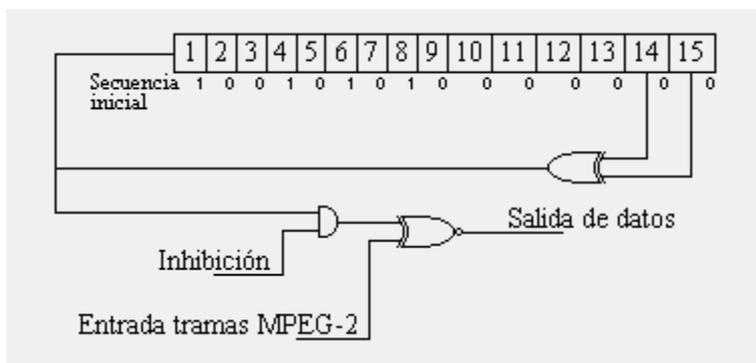
Aunque el sistema que se describe podría tener cualquier tipo de entrada binaria, la norma restringe el tipo de datos de entrada del transmisor a tramas MPEG-2. Comodato interesante con respecto a MPEG-2 diremos que son tramas de 188 bytes cuyo primer byte realiza tareas de sincronización.



## 2.2 ALEATORIZADOR DE ENERGÍA

El objetivo de este bloque consiste en evitar que en una ristra de bits haya ciertas secuencias que se repitan con mayor asiduidad, ya que esto provocaría la aparición de ciertos puntos de la constelación con mayor frecuencia. Si estos puntos coincidiesen en necesitar mayor energía para su transmisión se tendría un gran desperdicio de potencia. En definitiva, el objetivo consiste en obtener una cierta uniformidad en la transmisión de los símbolos de la constelación.

Para conseguir esto se utiliza una secuencia binaria pseudo aleatoria que se obtiene a partir del polinomio generador  $1+X^{14}+X^{15}$  y una secuencia binaria inicial. En la siguiente figura se puede observar el esquema hardware para la obtención de la secuencia pseudo aleatoria:



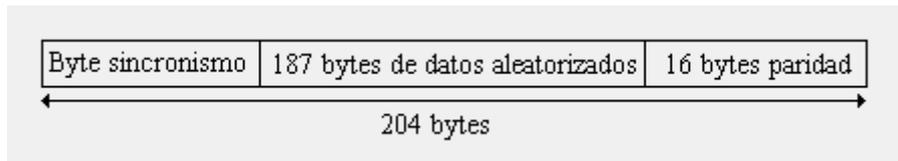
El proceso de aleatorización consiste en hacer una O-exclusiva entre los bits que componen los datos de entrada y la secuencia pseudo aleatoria obtenida. El estándar contempla ciertas consideraciones adicionales para la consecución del objetivo de este bloque, consideraciones que no serán expuestas aquí ya que no añaden nada de interés y sólo son necesarias en una implementación práctica.

## 2.3 CÓDIGO REED-SOLOMON

Este bloque va a ser el primer paso para conseguir robustez contra errores. Su inclusión viene motivada porque a la salida del decodificador de canal en el receptor se tiene una tasa de bits erróneos del orden de  $10^{-4}$  la cual es muy elevada para la transmisión de la señal de televisión. Así, la introducción de este código consigue obtener a la salida del receptor unas tasas de errores muy bajas.

Este codificador implementa un código bloque del tipo Reed-Solomon, que pertenece a una subclase de los códigos BCH en la que los elementos con los que se trabaja son grupos de bits, ocho en este caso.

En el estándar, el código Reed-Solomon definido es el sistemático RS(204,188,8) lo que quiere decir que ante una entrada de 188 bytes añade 16 bytes de paridad lo que da un total de 204 bytes, poseyendo la capacidad de corregir hasta 8 bytes erróneos arbitrarios.



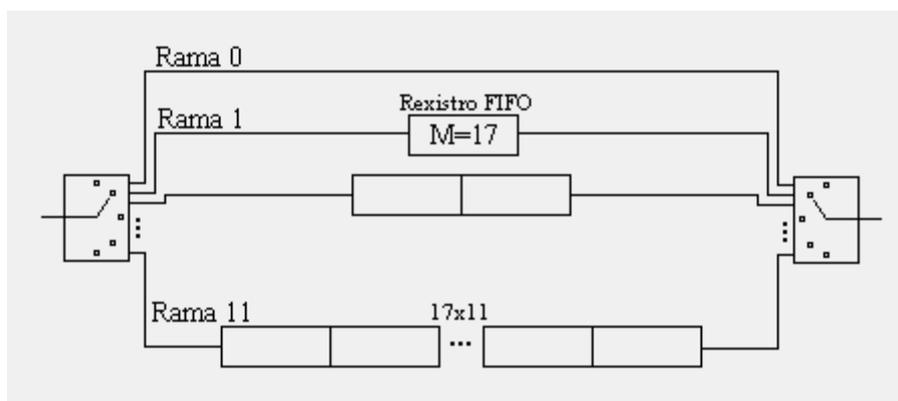
En la anterior figura se puede observar cómo queda la salida de este bloque ante una entrada MPEG-2, donde se ve que los 16 bytes de paridad aparecen al final de la trama MPEG-2 (esto es debido a que el código es sistemático).

## 2.4 BARAJADOR EXTERNO

El código Reed-Solomon tiene la capacidad de corregir un cierto número de errores consecutivos, lo cual implica que ante la aparición de una gran cantidad de errores consecutivos, el código no es efectivo. Es por lo que se acaba de ver por lo que tiene interés la introducción del barajador externo. Este bloque se encarga de introducir un cierto desorden en los bytes de entrada de forma que si hubiese una secuencia de bytes erróneos en recepción, al pasar por el elemento inverso a éste, esos bytes quedarían dispersos, con lo cual, el código Reed-Solomon podría corregirlos.

El motivo de que la unidad de trabajo sean bytes estriba en el hecho de que es la unidad de trabajo del código Reed-Solomon.

A continuación se muestra una figura que representa el funcionamiento de este bloque y que ayudará a entender cómo se produce el desorden:



El sistema está compuesto por dos conmutadores y doce ramas en las que hay intercalados un número creciente de registros. Los conmutadores siempre están sincronizados, lo que quiere decir que si el de entrada apunta a una rama el de salida coge datos de la misma rama. Cada vez que un dato entra por una rama ambos conmutadores pasan a la siguiente posición (de forma cíclica).

La aleatorización se ve reflejada en el hecho de que en cada rama exista un número determinado de registros que provoca un retardo variable entre la entrada de un dato por un conmutador y la salida por el otro.

Cada registro contiene capacidad para 17 bytes. Estos registros se comportan como colas FIFO y caracterizan el comportamiento que presenta cada rama. Partiendo de la primera rama que no posee ningún registro, el número de registros que posee cada rama se incrementa en una unidad con respecto a la anterior, llegando así a la duodécima rama, que posee once registros. Una característica que conviene resaltar es que los bytes dirigidos por la primera rama no sufren ningún retardo. Esta circunstancia se aprovecha con fines de sincronización; así, los bytes de sincronismo de las tramas MPEG-2 van siempre dirigidos por la primera rama.

Una última consideración a realizar es que al empezar a trabajar, y debido a las colas FIFO, el bloque pasa por un periodo transitorio (en este periodo se entregan a la salida bytes que no pertenecen a la estructura de datos de la entrada) que hay que tener en cuenta para su posterior eliminación.

## 2.5 CÓDIGO CONVOLUCIONAL

Este elemento constituye el primer bloque que forma parte del codificador de canal. La función que va a desarrollar va a ser la codificación de los bits que se presentan a la entrada mediante la introducción de bits de redundancia que habilitarán la corrección de errores en recepción.

El funcionamiento del convolucional está basado en registros de memoria (de capacidad un bit) y sumas módulo dos. La codificación de los bits se realiza a partir del valor del bit presente a la entrada y los valores de los  $m$  bits anteriores que están guardados en los registros.

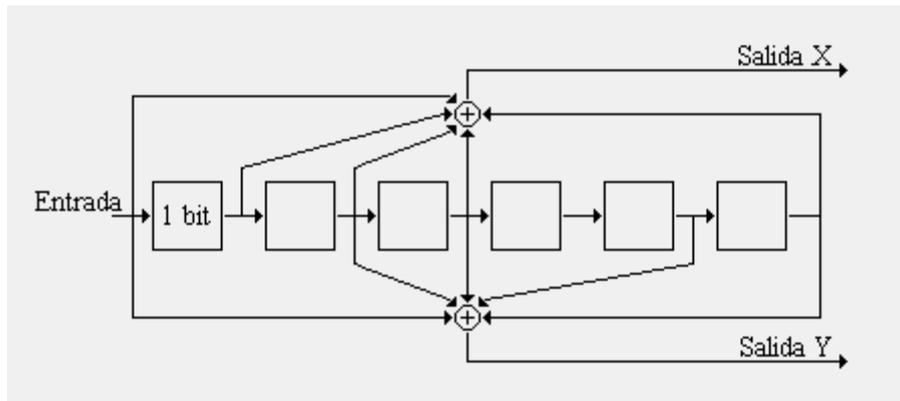
El codificador convolucional que define el estándar se construye a partir de un código convolucional que denominaremos como código base. Por lo tanto, se definirá este código en primer lugar, para posteriormente, obtener las distintas tasas que el estándar contempla en función del código base.

El código convolucional base está formado por seis registros de memoria y dos bits de salida por cada bit de entrada.

Los polinomios que generan el código son:

$$\begin{aligned}g_1(D) &= 1 + D + D^2 + D^3 + D^6 \\g_2(D) &= 1 + D^2 + D^3 + D^5 + D^6\end{aligned}$$

Estos polinomios se pueden ver representados en la siguiente figura sin más que tener en cuenta que  $D$  indica un retardo unidad.



Como se indicó anteriormente, el estándar contempla diversas tasas para el codificador convolucional. La tasa 1/2 viene aportada por el propio código base, mientras que las restantes tasas se consiguen a partir de estrategias de perforado. Estas estrategias consisten en descartar salidas del código convolucional base siguiendo ciertos patrones predeterminados que no se van a presentar.

## 2.6 BARAJADOR INTERNO

El barajador interno tiene como misión limitar en lo posible la longitud de las ráfagas de errores que se puedan producir durante la transmisión para que estas no desborden la longitud máxima soportada por el código corrector intentando conseguir así una decodificación libre de errores.

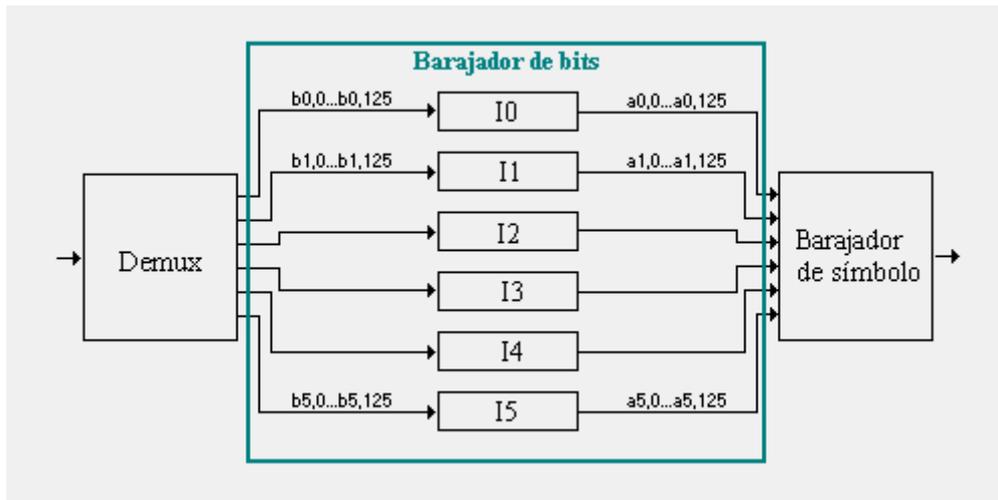
Para conseguir esta limitación se implantan dos barajadores, uno que trabaja a nivel de bits y otro que trabaja a nivel de grupos de bits (símbolos).

El barajador de bits consigue que los grupos de bits que dan lugar a un símbolo no estén formados por bits consecutivos de la entrada. Esto se consigue barajando los bits siguiendo un patrón fijo que se basa en una rotación cíclica.

Los bits serializados que provienen del bloque anterior se agrupan de 126 en 126 y cada grupo se introduce en los registros de cada una de las ramas que conforman el barajador. El número de ramas depende de la modulación empleada, así, para la QPSK y la 16-QAM habrá cuatro ramas y para la 64-QAM seis ramas.

Una vez que tenemos cada registro lleno con los 126 bits, se les aplica una rotación que depende de la rama con la que se esté trabajando. Después de aplicar dicha rotación los bits de cada rama pasan a alimentar la entrada del barajador de símbolo.

En la figura se puede observar un diagrama de bloques del barajador interno:



El último bloque de la figura es el barajador de símbolo que como se observa agrupa los bits de 4 en 4 (QPSK o 16-QAM) o de 6 en 6 (64-QAM) cogiendo uno de cada rama.

Ahora que ya se han formado los símbolos el barajador de símbolo será el encargado de desordenarlos. El barajador de símbolo es el primer bloque que se ve afectado por el modo de transmisión. Dependiendo del modo utilizado la profundidad de trabajo de este barajador será de 1512 posiciones en el modo 2K o 6048 en el modo 8K; con profundidad de trabajo se quiere decir la cantidad de símbolos que se cogen cada vez para desordenar.

Debe observarse que, puesto que en el barajador de bits, en cada ejecución, se crean 126 grupos de bits (símbolos) hacen falta 12 ejecuciones de este barajador para cubrir las 1512 posiciones en el caso de trabajar en el modo 2K, mientras que para cubrir las 6048 posiciones del modo 8K hacen falta 48 ejecuciones.

Para finalizar cabe destacar que al desordenar símbolos lo que se está consiguiendo es separar portadoras (cada símbolo modula una portadora) que estén correladas entre sí de forma que ante un desvanecimiento profundo la posibilidad de que símbolos contiguos se vean afectados sea pequeña. Así, una portadora atenuada puede ser recuperada a partir de la correlación que existe con otras portadoras que no han sido atenuadas.

## 2.7 MODULADOR

En el segundo bloque del barajador interno, la unidad de trabajo ya eran los símbolos. Realmente se trabajaba con grupos de bits que posteriormente iban a dar origen a los símbolos. Justamente este elemento, el modulador, será el que se encargue de hacer la conversión de grupos de bits a símbolos.

Las constelaciones recogidas en el estándar son las siguientes: QPSK, 16-QAM y 64-QAM. Todas estas constelaciones tienen en común que la asignación binaria de los elementos se corresponde a un código Gray. Un código Gray se caracteriza por tener una diferencia de un solo bit entre dos símbolos que estén a distancia mínima. Si la relación señal a ruido es suficientemente alta es mucho más probable que un símbolo sea confundido con un símbolo vecino que con otros que disten mucho del símbolo inicialmente transmitido.

De los bits que forman parte de la asignación binaria de un símbolo, algunos de ellos están relacionados con la parte real del mismo y otros con la parte imaginaria. Por ejemplo, en el caso de emplear una 64-QAM (6 bits), los bits 0, 2 y 4 están relacionados con la parte real de los símbolos y los bits 1, 3 y 5 con la imaginaria.

Para finalizar hay que decir que los símbolos de la constelación deben de ser multiplicados por unos valores para conseguir que estén normalizados en energía.

## **2.8 ADAPTADOR DE TRAMA**

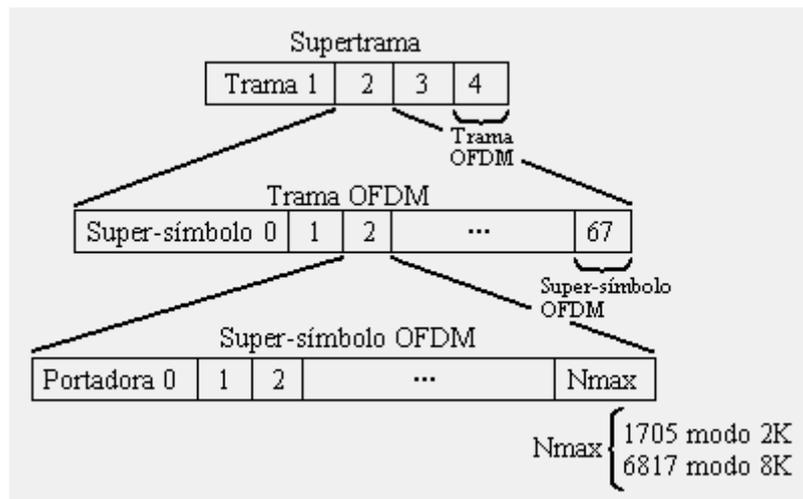
Llegados a este punto ya tenemos una representación en forma compleja de los datos que se desean transmitir. Además estos datos llevan incorporadas técnicas de protección contra errores que han sido implementadas en bloques descritos anteriormente. Pero aunque ya tenemos los datos preparados para ser transmitidos es necesario enviar alguna información adicional para que el receptor pueda realizar una correcta decodificación de los datos.

Como se vio anteriormente, en el modo 2K se tenían 1512 símbolos cada uno de los cuales va a modular una portadora, sin embargo se van a transmitir 1705 portadoras, es decir 193 portadoras llevarán esta información adicional. En el modo 8K se dispondrá de 769 portadoras.

La información adicional que va a ser transmitida es:

- Señales piloto: van a servir para conseguir sincronización y una estimación del comportamiento del canal.
  
- Señales de información del sistema: se utilizarán para indicar en el receptor cuales son los parámetros empleados en transmisión, como puede ser el modo usado, el valor del intervalo de guarda,...

La señal que se va a transmitir soporta una estructura de trama como la mostrada en la siguiente figura:



El elemento básico es la trama OFDM; cada trama se divide en 68 supersímbolos y, por último, cuatro tramas constituyen una supertrama. Esta estructura que se acaba de presentar y el número de portadoras de datos en los dos modos vienen determinados por la intención de que, al final de una supertrama, el número de salidas del codificador Reed-Solomon sea un número entero.

### Las Señales Piloto

Hay dos tipos de señales piloto atendiendo a su disposición dentro del supersímbolo. Diferenciamos entre aquellas señales que siempre modulan las mismas portadoras y aquellas otras que modulan distinta portadora en función de la posición del supersímbolo dentro de la trama COFDM.

La característica diferenciadora entre las portadoras de las señales piloto y el resto de las portadoras es que las primeras son transmitidas con una potencia mayor. De hecho se cumple que para los símbolos de datos la energía vale 1 mientras que para las portadoras de las señales piloto esta energía vale 16/9.

Como habíamos dicho hay dos tipos de señales piloto, las de posición fija que ocupan 45 portadoras en el modo 2K y 177 en el modo 8K y las de posición variable que cambian su posición de supersímbolo a supersímbolo siguiendo un patrón que se repite cada cuatro supersímbolos.

### Las Señales de Información del Sistema

La función de esta señalización es llevar los parámetros con los que está trabajando el esquema transmisor hasta el receptor para que éste pueda hacer una correcta decodificación de la señal que le llega. En concreto la información que se transmite es:

- La constelación empleada.
- El valor del intervalo de guarda empleado.

- La tasa del codificador convolucional.
- Otros parámetros que se aplican en caso de transmisión jerárquica y que aquí no hemos tratado.

La información del sistema siempre modula las mismas portadoras dentro de un supersímbolo OFDM. El número de portadoras usadas es de 17 en el modo 2K y 68 en el modo 8K. Las portadoras de información del sistema emplean la modulación DBPSK.

## 2.9 IFFT

Una vez que se tienen todos los datos distribuidos en frecuencia, el siguiente paso que establece el estándar es la aplicación de la IFFT con lo cual, a partir de este punto, se pasa a trabajar en el dominio temporal.

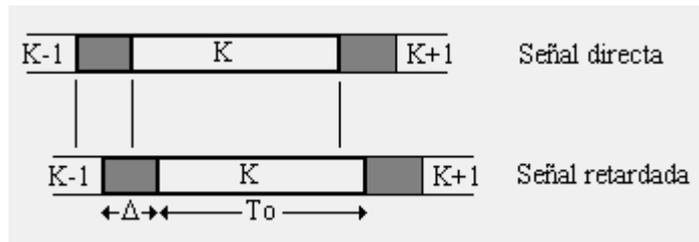
La realización del algoritmo de la IFFT no es de interés en este trabajo; sólo cabe destacar que para que sea eficiente el algoritmo, el número de puntos con los que debe trabajar tiene que ser potencia de dos, por lo que en el modo 2K se trabaja con 2048 puntos y en el modo 8K con 8192.

## 2.10 INTERVALO DE GUARDA

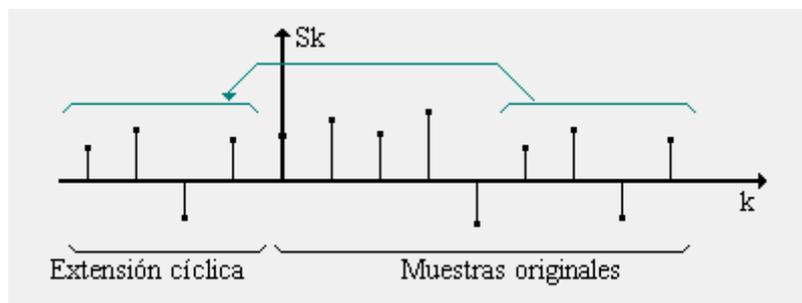
Este es el último bloque del transmisor y trata de combatir el [multitrayecto](#), ya que ésta es una característica habitual en el tipo de canal para el que está destinada esta modulación (medio terrenal).

Para la consecución de este objetivo, la modulación emplea una técnica que consiste en habilitar un cierto intervalo temporal que se añade al intervalo de tiempo necesario para la transmisión de un supersímbolo. Con esto se evita que unos símbolos se vean afectados por otros (interferencia inter-símbolo), aunque un símbolo siempre puede ser afectado por una versión retardada de sí mismo (interferencia intrasímbolo).

Los efectos anteriormente mencionados se pueden ver en la figura de abajo, en donde el símbolo K de la señal directa se ve afectado por la versión retardada de sí mismo. Ahora bien, si la duración del intervalo de guarda ( $\Delta$ ) está bien dimensionada, el símbolo K de la señal directa no se ve afectado por el símbolo K-1 de la señal retardada, cosa que sí ocurriría en caso de no existir el intervalo de guarda.



La realización de este bloque se lleva a cabo mediante una extensión cíclica de la salida de la IFFT. Esto nos lleva a que la duración total del periodo de símbolo será  $T_{\text{símbolo}} = T_0 + \Delta$ , siendo  $T_0$  la parte que denominábamos como parte de símbolo útil pues en ese intervalo se concentra toda la información transmitida, y  $\Delta$  la duración del intervalo de guarda. Esta extensión cíclica no es más que la copia de un determinado número de las últimas muestras de salida de la IFFT, y la colocación al principio a modo de prefijo, como se muestra en la figura de abajo.



La desventaja de la introducción del intervalo de guarda estriba en una reducción de la eficiencia espectral, ya que hay que transmitir muestras duplicadas que no aportan nueva información.

El estándar considera cuatro posibles valores para la duración del intervalo de guarda. Estos cuatro valores son 1/4, 1/8, 1/16 y 1/32 de la duración de la parte útil del periodo de símbolo de cada uno de los dos modos posibles.

En la siguiente tabla se muestra el número de muestras de las que se componen el intervalo de guarda atendiendo al valor de su duración y al modo de transmisión utilizado:

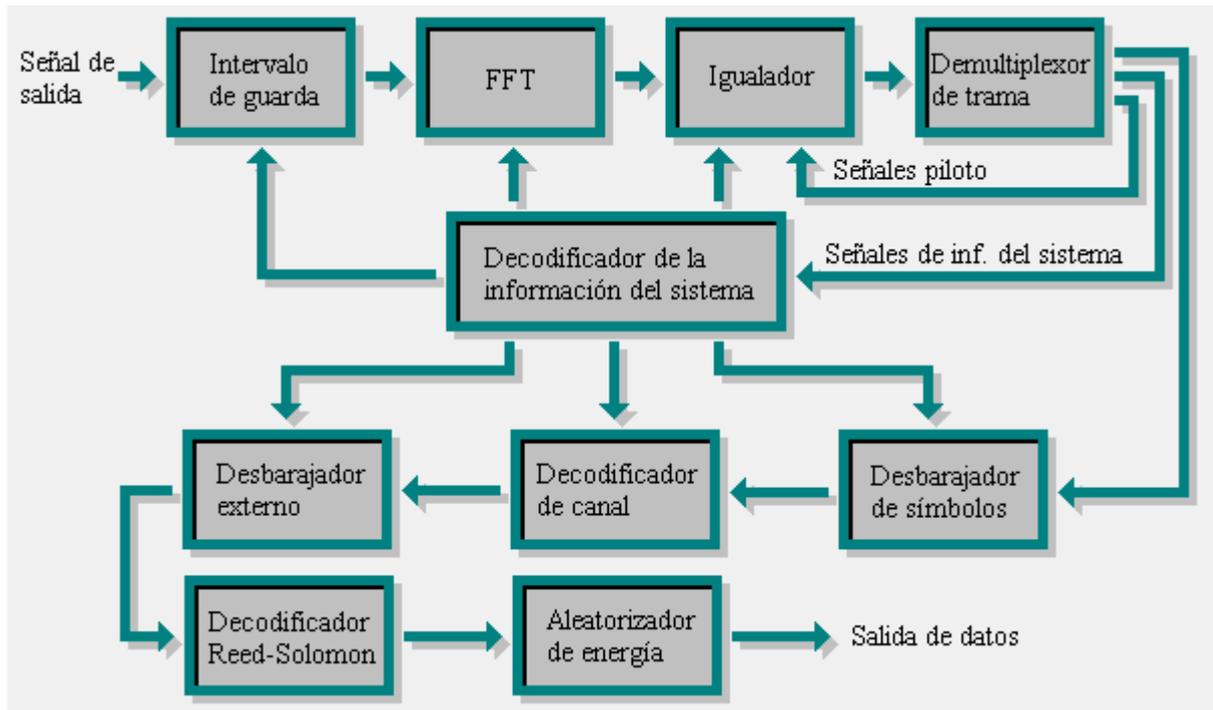
	$\Delta/T_0=1/4$	$\Delta/T_0=1/8$	$\Delta/T_0=1/16$	$\Delta/T_0=1/32$
Modo 2K	512	256	128	64
Modo 8K	2048	1024	512	256

Nótese que el envío de un mayor número de muestras en el intervalo de guarda tiene repercusión directa en las tasas binarias que se logran transmitir.

### 3. RECEPTOR COFDM

#### 3.1 DIAGRAMA DE BLOQUES

A continuación se pasa a presentar un esquema donde se puede ver la disposición de los distintos bloques que componen la cadena receptora de un receptor COFDM:



Las especificaciones dadas en el estándar no condicionan la realización del receptor, ya que únicamente imponen un límite temporal, que restringe el retardo máximo permitido para que el receptor entregue tanto imágenes como sonido. En consecuencia, las especificaciones recogidas en el estándar dejan una total libertad a la hora de implementar el sistema receptor ya que no establece restricciones para poner en práctica cualquier tipo de solución.

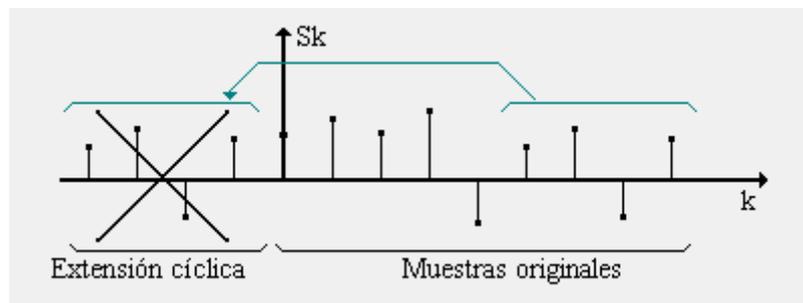
A pesar de esta libertad para implementar el receptor, en muchos casos la mejor solución es implementar un bloque que realice la función inversa del correspondiente bloque del transmisor.

De igual forma que en el transmisor, se puede hacer una división del dominio de trabajo antes y después de la realización de la FFT que son el temporal y frecuencial, respectivamente.

### 3.2 INTERVALO DE GUARDA

Este primer bloque del receptor tiene como misión la eliminación del intervalo de guarda en transmisión, introducido justo antes de la salida al canal con el objetivo de evitar los efectos del [multitrayecto](#) con respecto a la interferencia *intersímbolo*, de forma que la única interferencia posible sea la denominada como *intrasímbolo*.

La señal recibida se muestrea con un periodo de muestreo de  $T = 7/64 \mu s$ , y se toman un número determinado de muestras según el modo de transmisión y el valor de la duración del intervalo de guarda. La eliminación del intervalo de guarda consiste en no tener en consideración las M primeras muestras de cada periodo de símbolo, como se muestra en la figura siguiente:



El valor que ha de tomar M se puede ver en la tabla siguiente en función del modo de transmisión y de la duración del intervalo guarda.

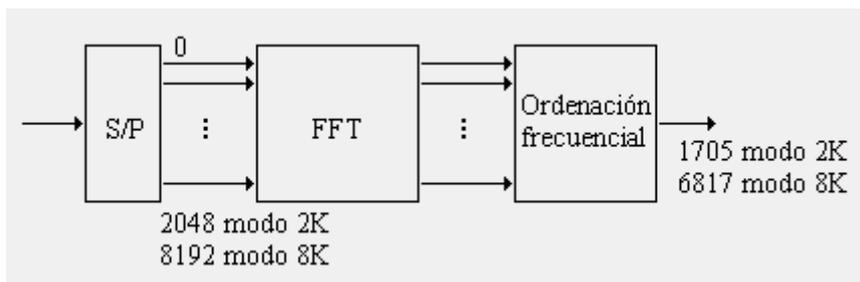
	$\Delta/T_0=1/4$	$\Delta/T_0=1/8$	$\Delta/T_0=1/16$	$\Delta/T_0=1/32$
Modo 2K	512	256	128	64
Modo 8K	2048	1024	512	256

Una vez eliminado el intervalo de guarda, las muestras restantes llevan toda la información necesaria para una correcta demodulación y constituirán la entrada del siguiente elemento.

### 3.3 FFT

Este bloque tiene como objetivo realizar la operación inversa a la IFFT de la cadena transmisora, por lo que ahora se realizará la transformada de Fourier directa (FFT).

En la siguiente figura se muestran los pasos a realizar en este bloque para obtener la información adecuada que espera el siguiente elemento de la cadena receptora (el igualador).



El número de puntos que se utilizarán en el algoritmo de la FFT dependerá del modo de transmisión usado, 2048 puntos para el modo 2K y 8192 puntos para el modo 8K.

Como ya se vio en el transmisor, para poder realizar el algoritmo de la IFFT había que completar con ceros las muestras de entrada hasta obtener 2048 o 8192 puntos, según el caso. Por lo tanto, en el receptor, después de realizar la FFT es necesaria una ordenación frecuencial para eliminar los puntos correspondientes a las altas frecuencias y que no llevan información ya que valen cero. Esta ordenación frecuencial consiste en descartar esos valores nulos y serializar solamente 1705 o 6817 valores dependiendo del modo de transmisión.

### 3.4 IGUALADOR

Una vez hecho el paso del dominio temporal al frecuencial, el igualador tiene como misión mitigar en lo posible las distorsiones inherentes al canal.

Debido a que no existen canales perfectos, el receptor será alcanzado por diversas señales que serán versiones retardadas del rayo directo. Como ya se ha visto, el intervalo de guarda elimina la interferencia intersímbolo, y la misión del igualador será la de eliminar la interferencia *intrasímbolo* intentando compensar la acción del canal.

Si el número de portadoras transmitidas es suficientemente grande, el comportamiento frecuencial del canal no será selectivo, es decir, se puede considerar que la influencia del canal para cada portadora se reduce a una atenuación y una fase, siempre que el canal sea estable durante el periodo de tiempo que dura un supersímbolo.

Si denominamos  $H_k$  al valor con el que el canal afecta al ancho de banda ocupado por la portadora k-ésima, la igualación, según el criterio de *cero forzado* se realiza multiplicando la portadora k-ésima por  $1/H_k$ . Este criterio no tiene en cuenta el ruido presente, por lo que ante nulos espectrales,  $H_k$  será un valor alto y el ruido que acompaña a la señal en esas frecuencias se verá tremendamente amplificado.

Si se quiere tener en cuenta el efecto combinado del ruido y de la interferencia, se puede optimizar según el criterio del *mínimo error cuadrático*, en la que la portadora k-ésima se ve multiplicada por el coeficiente

$$I_k = \frac{H_k^*}{|H_k|^2 + \sigma_n^2 / \sigma_a^2}$$

Donde  $\sigma_n^2$  es la varianza de ruido aditivo y  $\sigma_a^2$  es la varianza de los símbolos transmitidos.

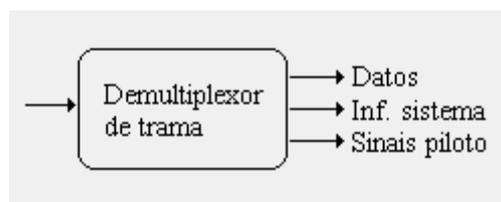
Para obtener los valores de  $H_k$  se usan las señales piloto insertadas en todos los supersímbolos. Así, se hace una buena estimación en las frecuencias donde están situadas las señales piloto, mientras que el resto de los  $H_k$  se calculan mediante interpolación.

### 3.5 DEMULTIPLEXOR DE TRAMA

En un supersímbolo OFDM no sólo se transmiten datos, sino que ciertas portadoras son moduladas con otro tipo de señales que sirven para facilitar el trabajo del receptor. Estas otras señales son:

- Las señales piloto, tanto de posición fija como variable, son las encargadas de llevar al receptor información del comportamiento del canal.
- Las señales de información del sistema, que son de posición fija, llevan parámetros que son necesarios en el receptor para poder realizar una correcta decodificación de los datos recibidos.

Debido a que, como se ha visto, cada portadora lleva información de distintos tipos, se hace necesario realizar una separación entre los distintos tipos de información; este es el objetivo del demultiplexor de trama. Este bloque se encarga de sacar por tres canales distintos los datos, la información del sistema y las señales piloto. En la siguiente figura se observa dicha separación de canales:



Cabe destacar que en el caso de las señales piloto también saca la posición de la portadora que modula cada señal (es decir, la frecuencia de cada señal piloto), lo cual es muy útil para el trabajo del igualador.

Otro aspecto importante de este bloque es que tiene que haber una buena sincronización para realizar un buen desentramado. Esto se hace en un principio con las portadoras de las señales piloto, ya que éstas fueron transmitidas con una potencia mayor que el resto. Además, como el patrón que siguen estas portadoras al ser moduladas es conocido, el trabajo de sincronización se ve facilitado.

### 3.6 DECODIFICADOR DE LA INFORMACIÓN DEL SISTEMA

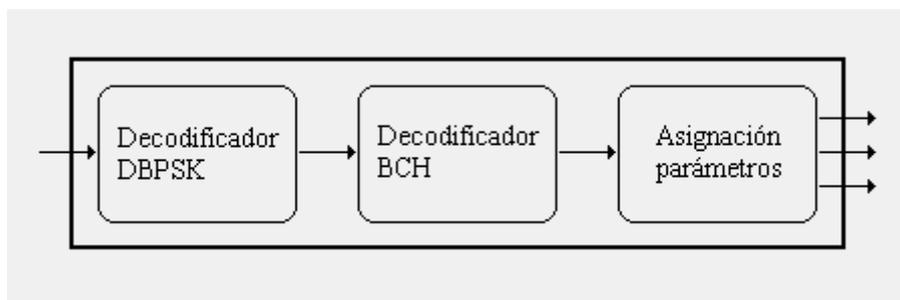
La información del sistema es importante para un correcto funcionamiento del receptor. De su decodificación depende que el receptor elija de forma adecuada los parámetros para realizar una correcta decodificación de los datos.

Este bloque se encargará de la decodificación de la información transportada por las portadoras asignadas a tal fin. Las muestras correspondientes a estas portadoras se encuentran a la entrada de este elemento a partir de la entrega realizada por el demultiplexor de trama.

En el proceso de decodificación de la información del sistema podemos distinguir tres etapas diferenciadas:

- En la primera etapa se intentará deshacer la modulación DBPSK obteniendo una secuencia que puede no estar libre de errores, por lo que en el transmisor se empleó un código bloque para su corrección.
- Por consiguiente la segunda etapa consistirá en pasar los bits decididos por el decodificador con el código BCH.
- La última etapa consistirá en obtener los valores de los parámetros de transmisión en función de los bits obtenidos en la etapa anterior.

La siguiente figura muestra estas tres etapas:



La modulación DBPSK se emplea para determinar los valores correspondientes a las portadoras encargadas de transportar la información del sistema. Para obtener esta información es necesario tomar un bit de cada supersímbolo de una trama OFDM. Para realizar la demodulación es necesario tener guardados en memoria los valores de las muestras correspondientes a los supersímbolos anteriores (17 para el modo 2K y 68 para el modo 8K).

El siguiente elemento hace uso de la redundancia añadida en transmisión para la protección contra errores. El código sistemático BCH(67,53,t=2) proporciona esta protección.

De no detectarse ningún error, se informa a aquellos elementos del receptor que lo necesiten de los parámetros recibidos.

### 3.7 DESBARAJADOR DE SÍMBOLOS

Como se vio con anterioridad el demultiplexor de trama tiene tres salidas: las señales piloto, que son usadas por el igualador de canal; la información del sistema, que ya ha sido tratada en el bloque anterior y los datos, que son los que se van a tratar en este bloque y los siguientes.

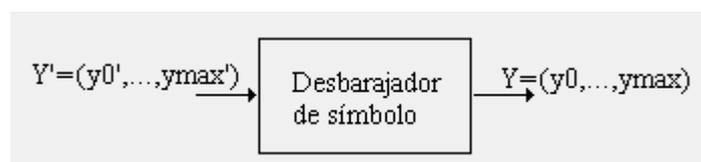
A la entrada del desbarajador de símbolos, los datos son valores complejos y en este bloque se va a implementar la función inversa de la segunda parte del barajador interno implementado en transmisión. Como se había dicho, en el barajador interno, las unidades de trabajo son grupos de bits que conforman los símbolos.

En el transmisor lo que se hacía era alejar los símbolos correlados entre sí para que, en el caso de que hubiese un desvanecimiento, no se vieses afectados todos a la vez y así ayudar a la recuperación de la información. Por lo tanto aquí, en el desbarajador de símbolo, lo que se hará será deshacer lo barajado en el transmisor (agrupar las portadoras correladas).

Es importante señalar que, en este bloque, no se toma ninguna decisión sobre los valores recibidos, simplemente se reubican los datos.

Para realizar su tarea, este bloque usa la misma permutación que la empleada por el transmisor. Así, a la entrada se tienen 1512 valores complejos (en el modo 2K) o 6048 (en el modo 8K), y después de aplicar la permutación se obtienen a la salida la misma cantidad de valores complejos. Se consigue así que los símbolos recuperen la ordenación primitiva que tendrían de no haber barajador de símbolo.

La figura da una idea de cómo funciona la permutación:



### 3.8 DECODIFICADOR DE CANAL

El decodificador de canal es el bloque del que van a depender en mayor medida las prestaciones del receptor. En transmisión el codificador de canal está formado por el código convolucional, el barajador interno y la constelación.

En teoría el decodificador de canal debería de ser el bloque que deshiciere las acciones realizadas por los bloques anteriormente mencionados del transmisor, sólo que ahora hay que tomar decisiones sobre la señal recibida. Como en el bloque anterior (el desbarajador de símbolo) no se han tomado estas decisiones, se tienen que tomar ahora.

El estándar da libertad para la realización del receptor, y es en este bloque donde se puede hacer uso de esta libertad para crear receptores con diferentes esquemas.

Esta parte del receptor es muy amplia y densa por lo que no tiene gran interés para esta introducción a COFDM considerar las distintas implementaciones, los problemas que se presentan en su realización, etc. Con lo dicho se da por zanjada la explicación de este bloque. Se puede obtener más información sobre esta parte en cualquier libro que hable sobre OFDM.

### 3.9 DESBARAJADOR EXTERNO

Después de las decisiones tomadas en el decodificador de canal lo que obtenemos es una secuencia binaria que no está libre de errores de transmisión. El estándar pone como límite superior aceptable a la salida del bloque anterior una tasa de errores de  $2 \times 10^{-4}$ . Esta tasa de errores es muy elevada para esta aplicación, por lo que se introduce el barajador externo en el transmisor y el equivalente en el receptor para así poder bajar la tasa de errores hasta un límite que hace que se pueda considerar que se ha realizado una comunicación libre de errores.

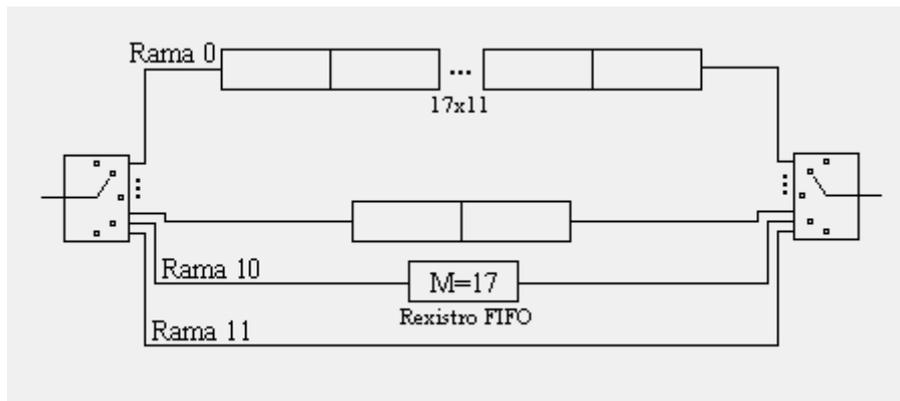
La misión que tiene el desbarajador externo es la de limitar las longitudes de las posibles ráfagas de errores que se puedan producir, para que los errores estén lo más dispersos posible. Con esto se logra que su detección y corrección sea más fácil de realizar.

Este elemento trabaja a nivel de bytes ya que el código externo está diseñado para dar protección a estas unidades. El funcionamiento de este bloque es el siguiente:

- Los bytes son paralelizados por el conmutador de entrada. El conmutador funciona de forma cíclica: cada vez que dirige un byte por una rama, conmuta a la siguiente posición.
- A la salida hay otro conmutador que siempre está apuntando a la misma rama que el conmutador de entrada y que recoge un byte de la [cola FIFO](#) situada en esa rama.

- Las colas FIFO que forman parte de cada rama disminuyen su número de registros a medida que vamos aumentando el número de la rama. Así, llegamos a que la última rama no tiene ningún registro.
- Cada registro tiene una capacidad de 17 bytes, lo cual concuerda con el sistema equivalente en transmisión.

Las características explicadas anteriormente se ven representadas gráficamente en la siguiente figura:



La única característica que diferencia el barajador en transmisión del desbarajador en recepción es que los registros crecen de forma contraria, lo cual tiene como objetivo compensar los retardos introducidos en transmisión, de forma que todos los bytes sufran el mismo retardo.

Al igual que en el barajador, al principio hay un estado transitorio mientras los registros no se llenan con bytes y esto ha de ser tenido en cuenta para eliminar los bytes que sobran.

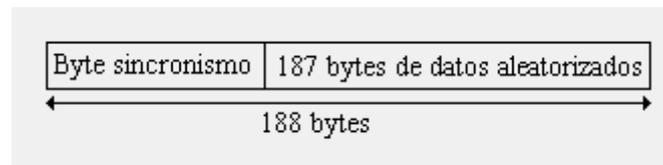
### 3.10 DECODIFICADOR REED-SOLOMON

En el bloque anterior se limitaba la longitud de las ráfagas de errores para facilitar la detección y corrección de los mismos. El encargado de hacer esa detección y corrección es el decodificador Reed-Solomon.

El código empleado en transmisión fue el código sistemático RS(204,188,t=8), que tiene la capacidad de corregir hasta ocho bytes erróneos de los 204 bytes que constituyen la entrada en una ejecución, ya que este código posee una distancia mínima de  $2t+1$ . Como se ha podido observar la unidad de trabajo de este decodificador es el byte.

Una vez que se conocen los bytes erróneos que hay en cada trama de entrada a este bloque, éstos pueden ser corregidos. Al tener la trama libre de errores el bloque da como salida los primeros 188 bytes, ya que este codificador es sistemático, lo que implica que toda la redundancia se introduce en los últimos 16 bytes (el resto es información).

La salida de este bloque tiene la longitud y estructura de una trama MPEG-2. Esto puede ser observado en la siguiente figura:



### 3.11 DESALEATORIZADOR DE ENERGÍA

El desaleatorizador de energía es el último bloque de la cadena receptora. Es el homólogo del aleatorizador de energía implementado en el transmisor y, por lo tanto, tiene las mismas características físicas que éste.

La intención del aleatorizador en el transmisor era impedir que hubiese cierta predilección en enviar unos símbolos frente a otros. La misión de este bloque en el receptor es la de recomponer la secuencia original y conseguir así los datos que constituirían las tramas MPEG-2.

Para realizar el aleatorizador se usaba la función OR-exclusiva; por lo tanto, en el desaleatorizador hemos de usar la misma función y la misma secuencia pseudo aleatoria. Todas las consideraciones que se tuvieron en cuenta en el caso del aleatorizador son aplicables aquí.

A la salida de este bloque debemos de obtener una secuencia binaria que debería de coincidir con las tramas MPEG-2 que se usaron a la entrada del transmisor, de esta forma cumplimos con el objetivo de todo sistema de transmisión: la información a la entrada del transmisor ha de ser la misma que la información obtenida a la salida del receptor.

## **4. GLOSARIO DE TÉRMINOS**

### **IGUALACIÓN**

Consiste en eliminar la influencia del canal sobre los datos mediante alguna técnica de filtrado inverso que suele requerir del conocimiento del canal.

### **MULTITRAYECTO**

Recepción de una señal y sucesivas versiones retardadas de ella misma. El nombre multitrayecto se debe a que el efecto es provocado por rebotes de la señal aunque éste no es el único motivo posible de la ocurrencia de este efecto.

### **COLAS FIFO**

Cola que sigue una disciplina de "primero en entrar, primero en salir". El nombre FIFO se refiere a "First In, First Out".

### **EFICIENCIA ESPECTRAL**

Cociente definido por velocidad binaria entre ancho de banda ocupado. Da una idea del mejor o peor aprovechamiento que hace del espectro una modulación determinada.