

ANEXO B

DESCRIPCIÓN DEL NIVEL FÍSICO DEL ESTÁNDAR DVB-T

El contenido expuesto en este documento inicia con el formato de datos que corresponden a los contenidos de video y sonido comprimidos utilizando el estándar MPEG-2. Se describe también, los fundamentos de la técnica de transmisión por Multiplexación por División de Frecuencia Ortogonal Codificada (COFDM, *Coded Frequency Division Multiplexing*) y la arquitectura del nivel físico del estándar DVB-T.

B.1 FORMATO DE DATOS MPEG-2

El Grupo de Expertos en Imágenes en Movimiento (MPEG, *Moving Picture Expert Group*) de la Organización Internacional de Estandarización (ISO, *International Organization for Standardization*) ha desarrollado el estándar MPEG-2, con el fin de comprimir señales de audio y video, para su respectivo almacenamiento y recuperación en equipos digitales.

La exigencia de ancho de banda es uno de los principales problemas de transmisión de video sin comprimir, pues es del orden de 100 a 240 Mbps, y hasta 1 Gbps para televisión de alta definición [1]. En este sentido, es necesario aplicar un algoritmo de compresión que reduzca el ancho de banda de la señal. Existe una alta dependencia entre los elementos de imagen vecinos (píxeles) de una imagen, la televisión digital explota este hecho, y aprovecha la redundancia (espacial o temporal) para comprimir la señal. Este proceso se basa en la comparación espacial, en la cual, si un píxel de la imagen es igual al de al lado, se envía cuantos píxeles son iguales y su respectiva posición. La compresión basada en la comparación temporal, consiste en que si una imagen es muy similar a la siguiente dentro del video, basta con enviar la diferencia, de esta forma, el contenido de la secuencia se predice a partir de las imágenes diferencia, las cuales son comprimidas usando la transformada directa del coseno.

Como se muestra en la figura B.1, el sistema de transporte MPEG-2 integra en un único flujo de transporte las señales de audio, video, y datos auxiliares. Las señales fuente son muestreadas y cuantificadas, denotadas como Unidades Programa (PU, *Program Unit*). A continuación, las cadenas PU son procesadas por un bloque de codificación de fuente MPEG-2 y constituyen el Flujo (cadenas) Elementales (ES, *Elementary Stream*), tanto de video como de audio. La cadena ES esta conformada solo con la información necesaria para que un decodificador pueda formar las señales originales. El flujo ES se distribuye en un Flujo de Paquetes Elementales (PES, *Packet Elementary Stream*) de video y audio, estos paquetes son identificados mediante cabeceras que contienen información de sincronización. Al multiplexar los paquetes de datos comprimidos ES de audio y video con

otros datos auxiliares, se conforma la cadena final, la cual, dependiendo de la aplicación, puede ser:

- Cadena de Programa (PS, *Program Stream*), diseñada para el almacenamiento y reproducción únicamente de un programa audiovisual a partir de un dispositivo de almacenamiento libre de ruido [1].
- Cadena de Flujo de Transporte (TS, *Transport Stream*), diseñada para la entrega simultánea de múltiples programas audiovisuales sobre canales con ruido. Esta opción exige aplicar técnicas de Corrección de Errores hacia Adelante (FEC, *Forward Error Correction*) [1].

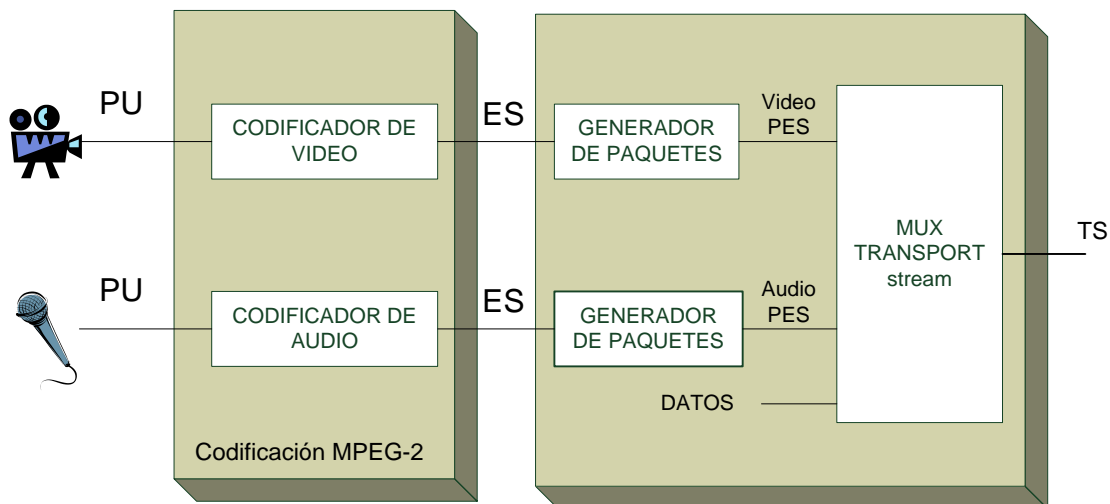


Figura B.1 Sistema de transporte MPEG-2 [1].

En el estándar DVB-T, el flujo final de datos del sistema MPEG-2 es la cadena TS. Los paquetes TS corresponden a los datos de entrada a la capa física del estándar DVB-T.

El TS está formado por paquetes MPEG-2 de 188 bytes de longitud. En la figura B.2 se muestra el paquete de transporte, el cual, tiene una cabecera (*header*) de 4 bytes, en ocasiones es seguida por un campo de adaptación para llenar el exceso de espacio disponible. Los paquetes de transporte se forman a partir de los paquetes PES correspondientes a cada flujo elemental de video, audio o datos, es decir, el flujo PES es distribuido en los paquetes de TS, que constituyen el flujo de transporte final.

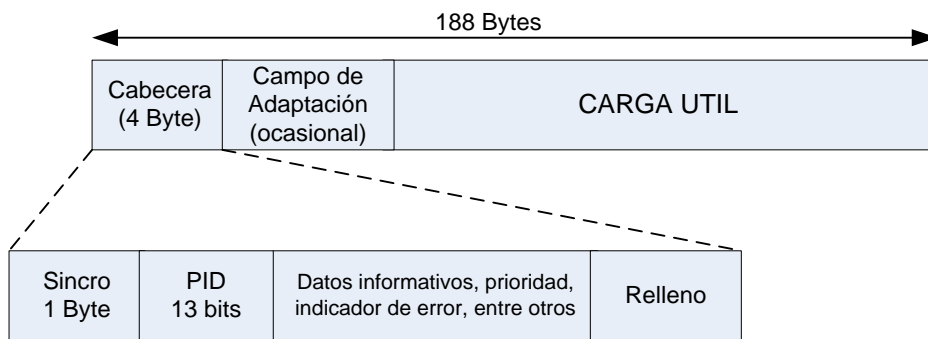


Figura B.2 Estructura del paquete de transporte MPEG-2.

Los paquetes de transporte de la figura B.2, resultantes del proceso bajo las dos condiciones fundamentales, se disponen secuencialmente para conseguir el flujo de transporte MPEG-2 (TS).

La cabecera (*header*) de un paquete de transporte tiene una longitud fija de 4 bytes, su formato se explica en la Tabla B.1.

Tabla B.1 Estructura de la cabecera de un Paquete TS[2].

Campo	Definición	No de bits
Byte de sincronización (<i>Sync Byte</i>).	Byte de sincronización 01000111 (0x47).	8
Indicador de error de transporte (<i>Transport error Indicator</i>).	Identifica un error de transporte detectado.	1
Indicador de inicio de unidad de carga útil (<i>Payload unit start indicator</i>).	Inicio de PES en el paquete de transporte.	1
Prioridad de transporte (<i>Transport priority</i>).	Indicador de prioridad	1
PID	Identificador del paquete de transporte.	13
Control de cifrado de Transporte (<i>Transport scrambling control</i>).	Tipo de cifrado de transporte.	2
Control del campo de adaptación (<i>Adaptation field control</i>).	Control del Campo de Adaptación en el paquete.	2
Contador de continuidad entre paquetes (<i>Continuity counter field</i>).	Contador de continuidad entre paquetes afines.	4

Los campos en la cabecera más importante son:

- Byte de sincronización (*Sync_Byte*). Es el primer byte de la cabecera y siempre tiene el valor 47 (hexadecimal). El hecho de que este campo aparezca siempre cada 188 bytes dentro de un TS, facilita el proceso de su localización por los decodificadores para identificar el comienzo de cada paquete de transporte [2].
- Identificador de Paquete (PID, *Packet Identifier*). Un TS puede contener muchos programas diferentes, cada uno de los cuales, contiene a su vez diferentes flujos elementales distribuidos en paquetes de transporte. Este campo de 13 bits (PID) se emplea para distinguir los paquetes de transporte asociados a un determinado flujo elemental, de entre todos los demás [2].
- Indicador de inicio de unidad de carga útil (*Payload Unit Start Indicator*). Toma el valor de 1 para indicar que el primer byte de la carga útil del paquete de transporte es también el primer byte de un paquete PES [2].
- Contador de continuidad entre paquetes (*Continuity count field*). Se incrementa entre sucesivos paquetes de transporte pertenecientes al mismo flujo elemental. Esto permite al decodificador detectar la pérdida o ganancia de un paquete y así poder ocultar los errores, que de otra forma podrían presentarse [2].

B.1.1 Tablas PSI/SI.

Los paquetes de transporte TS están marcados con un PID que identifican el flujo elemental de origen, es decir, el programa audiovisual que dio lugar a los flujos PES distribuidos en los paquetes TS; sin embargo, para que el decodificador pueda recuperar completamente un programa a través de los valores de los PID de los paquetes correspondientes, es necesario incluir información adicional dentro del flujo TS que relacione estos PID con los programas a los que pertenecen. Tal información se encuentra en las tablas de Información Específica de los Programas (PSI, *Program Specific Information*) y tablas de Información del Servicio (SI, *service information*).

Las tablas PSI incluyen los siguientes tres tipos de tablas de señalización:

- Tabla de Asociación de Programa (PAT, *Program Association Table*). Esta tabla es de inclusión obligatoria y es transportada por los paquetes con PID=0x0000, contiene una lista completa de todos los programas disponibles en el flujo TS. La Información de esta tabla incluye el número de programa con el valor del PID de los paquetes, que a su vez contienen la tabla PMT, la cual, identifica a dicho programa [2]. Unos de los atributos más importantes de esta tabla son:

- ✓ Número de programa (*Program_number*). Muestra el número de cada programa presente en un flujo de transporte (TS), puede tomar valores enteros entre 1 y 65535.
 - ✓ Identificación del mapa de programa (*Program_map_PID*). Identifica el PID de la tabla PMT de cada programa audiovisual.
- Tabla de Mapa de Programa (PMT, *Program Map Table*). Cada programa audiovisual incluido en un flujo TS tiene una tabla PMT asociada. Dicha tabla proporciona detalles acerca del programa y de los flujos elementales que comprende. Las tablas PMT pueden ser transportadas por paquetes con valores de PID arbitrarios, exceptuando los valores 0x0000 reservado para PAT, y 0x0001 reservado para la tabla CAT. En las tablas PMT los datos de los PID no pueden estar cifrados. Sin embargo, dichas tablas PMT también pueden contener información privada relativa al programa, que eventualmente sí puede estar cifrada (datos para el control de acceso) [2]. Uno de los atributos más importantes de esta tabla es:
 - ✓ Nombre: *Stream_type*. Número que indica el tipo de flujo de fuente de información, algunos valores posibles son: 2 (0x02) para un flujo de video en formato MPEG-2, y 3 (0x03) para audio en formato MPEG-1.
 - Tabla de Acceso Condicional (CAT, *Conditional Access Table*). Sí al menos un programa del múltiplex¹ es de acceso condicional, esta tabla debe estar presente. Se transporta por los paquetes con PID=0x0001, y proporciona detalles de los sistemas de cifrado empleados, así como los valores de los PID de los paquetes de transporte que contienen la información del control de acceso condicional. La información de acceso condicional especifican los niveles de autorización o los servicios a que pueden acceder determinados decodificadores, y pueden ir dirigidos a decodificadores individuales o a un grupo de ellos [2].

La Información del Servicio (SI, *Service Information*) en sistemas DVB (ETS 300 468) corresponde a la información del proveedor del servicio, incluye 4 tipos de tablas SI de inserción obligatoria dentro del TS:

- Tabla de Información de la Red (NIT, *Network Information Table*). Esta tabla, si está presente, constituye por definición el Programa # 0 del múltiplex y está considerada como privada, es decir, definidos por el proveedor de servicio y no por MPEG. Se transporta por los paquetes identificados con PID=0x0010 y proporciona información acerca de la red física usada para transmitir el flujo TS, como por ejemplo: frecuencias del canal, detalles del transpondedor del satélite,

¹ Múltiplex: Canal radio multiplexado utilizado por varios operadores, los cuales pueden gestionar el ancho de banda que le corresponde para ofrecer los contenidos que desee.

características de modulación, detalles de redes alternativas disponibles, entre otros [2]. Uno de los atributos más importantes de esta tabla es:

- ✓ Nombre de la red (*network_name*). Determina el nombre de la red utilizada por el sistema.
- ✓ Identificación de la Red (*network_id*). Determina la identificación de la red utilizada. Puede tomar valores como 0x01 (Astra Satellite), 0x029 (hispasat), entre otros.
- Tabla de Descripción de Servicio (SDT, *Service Description Table*). Esta tabla contiene datos que describen los servicios en el sistema, como por ejemplo: nombre del servicio, nombre del proveedor y otros parámetros asociados a cada servicio de un mismo múltiplex. Se transporta por paquetes identificados con PID=0x0011 [2]. Uno de los atributos más importantes de esta tabla es:
 - ✓ Nombre del servicio (*service_name*). Determina el nombre del servicio.
 - ✓ Tipo de servicio (*service_type*). Indica el tipo de servicio, puede tomar valores como 0x01 (servicio de televisión digital), 0x02 (servicio de radio digital), 0x03 (servicio de teletexto).
 - ✓ Identificación del servicio (*service_id*). Identifica de forma exclusiva un servicio dentro de un flujo de transporte.
 - ✓ Nombre del proveedor del servicio (*service_provider*). Determina el nombre del proveedor del servicio.
- Tabla de Fecha y Hora (TDT, *Time & Date Table*). Esta tabla proporciona información relativa a la hora y fecha del momento de su creación, y se utiliza para poner en hora el reloj interno del receptor. Esta información se incluye en una tabla específica debido a las frecuentes actualizaciones de la misma. Se transporta por paquetes identificados mediante PID=0x0014 [2]. Uno de los atributos más importantes de esta tabla es:
 - ✓ Tiempo universal coordinado (*UTC_time universal Co-ordinated*). Determina la hora y fecha actuales.
- Tabla de Información de Evento (EIT, *Event Information Table*). Se utiliza para transmitir información relativa a los acontecimientos en curso (denominación, hora de comienzo, duración, entre otros) o futuros en el múltiplex MPEG [2].

Cada tabla está constituida, según su importancia, por una o varias secciones (256 como máximo, con una longitud máxima de 1.024 bytes excepto para tablas tipo privado y EIT que pueden alcanzar los 4.096 bytes). Dichas secciones están distribuidas a lo largo de una serie de paquetes de transporte identificados con un PID común.

B.2 DESCRIPCION GENERAL DEL ESTÁNDAR DVB-T

El sistema de transmisión de TV digital denominado DVB-T y especificado en la norma ETSI EN 300 744 [9], define los procesos de codificación de canal y de modulación para la transmisión terrestre. Al igual que los demás estándares DVB, la señal de entrada está normalizada por un proceso llamado codificación de fuente definido por el estándar MPEG-2.

El estándar DVB-T presenta múltiples ventajas frente a la televisión analógica, como:

- Brinda un ahorro del ancho de banda utilizado.
- Recepción portátil con ausencia de doble imagen.
- Reduce la potencia de transmisión.
- Introducción de nuevos servicios.
- Permite mayor número de canales

La señal digital es dotada de mecanismos de protección frente a errores, antes de ser transmitida a través del canal de transmisión, este mecanismo corresponde a una codificación Reed-Solomon, además se emplea una codificación interna mediante un código perforado convolucional. La técnica de modulación utilizada es COFDM, se fundamenta en un elevado número de portadoras ortogonales empleando la técnica OFDM, algunas ventajas son:

- Protección de interferencia co-canal (CCI, *Co-Channel Interference*) e interferencia de canal adyacente (ACI, *Adjacent Channel Interference*)
- Permite redes de frecuencia única (SFN, *Single Frequency Network*).
- Robustez del sistema frente a la propagación multitrayecto.

B.2.1 PARAMETROS TECNICOS DEL ESTANDAR DVB-T

El sistema DVB-T es flexible y posee las siguientes características técnicas:

- **Modos de transmisión.** Cantidad de portadoras que pueden tener los datos que corresponden al símbolo COFDM, es decir, el paquete de portadoras que se transmite en paralelo. Existen dos modos de transmisión, 2K y 8K.

Modo 2K:

- ✓ El símbolo tiene 1705 portadoras, en donde 1512 son de datos y las restantes son de referencia del sistema. Se agregan portadoras con amplitud cero para alcanzar 2048 portadoras antes de aplicar la Transformada Inversa Rápida de Fourier (IFFT, *Inverse Fast Fourier Transform*).

- ✓ La duración del símbolo es de 298,6667 μ s para un canal de 6 MHz y 224 μ s para un canal de 8MHz.

Modo 8K:

- ✓ 6817 portadoras por símbolo, en donde, 6048 portadoras son de datos y 769 son señales de referencia. Se agregan portadoras de amplitud cero hasta alcanzar 8192 portadoras.
- ✓ El tiempo del símbolo es de 1194,667 μ s para un canal de 6 MHz y 896 μ s para un canal de 8 MHz.
- **Esquema de modulación.** El estándar DVB-T posee tres tipos esquemas de modulación: QPSK², 16QAM³, 64QAM⁴ (ver figura B.3). El esquema QPSK, procesa dos bits por portadora en cada símbolo COFDM, aunque es más robusta frente al ruido y propagación multitrayecto, no hace un óptimo uso del ancho de banda disponible. Como se muestra en la figura B.3, el esquema 16QAM tiene 16 estados y transporta 4 bits por símbolo COFDM, sin embargo, es más afectada por la propagación multitrayecto. El esquema de modulación que más eficientemente utiliza el ancho de banda es 64QAM, pues transmite 6 bits por símbolo COFDM y tiene 64 estados, sin embargo, es la modulación más propensa a ser afectada por la propagación multitrayecto.

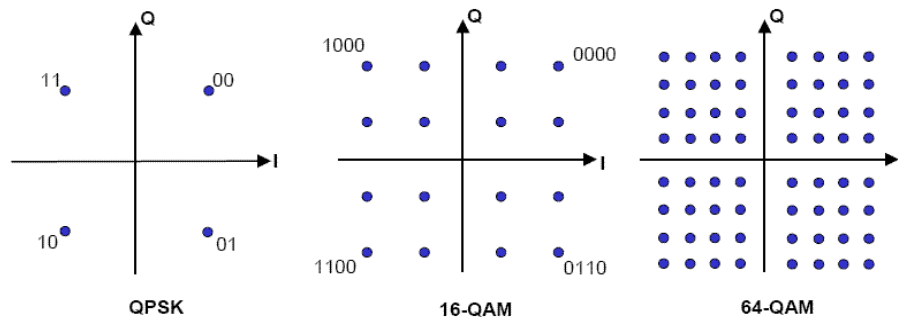


Figura B.3 Constelaciones de los esquemas de modulación en DVB-T[3].

- **Ancho de banda del canal.** El ancho de banda en banda base utilizado en DVB-T puede ser 5, 6, 7 y 8 MHz.
- **Relación de codificación convolucional para protección interna de errores.** En este mecanismo de corrección de errores (FEC) no es necesario la

² Modulación por Desplazamiento de Fase en Cuadratura (QPSK, *Quadrature Phase Shift Keying*.)

³ Modulación de amplitud en cuadratura de 16 estados (16QAM, *16 Quadrature Amplitude Modulation*).

⁴ Modulación de amplitud en cuadratura de 64 estados (64QAM, *64 Quadrature Amplitude Modulation*).

retransmisión de datos, solo se hace uso de bits de redundancia. La relación del mensaje sin codificar con el codificado puede ser de: 1/2, 2/3, 3/4, 5/6, 7/8. La relación 1/2 es la que brinda más alta protección contra errores, debido a que por cada dos bits transmitidos, un bit es de información útil y un bit es de corrección de errores. Por otro lado, la relación 7/8 es la que brinda menos protección frente a errores, pues solo cuenta con un bit de corrección de errores por cada 7 bits de información útil.

- **Intervalo de guarda.** Para fortalecer la señal transmitida frente a los ecos se extiende la duración del símbolo COFDM, se incluye un tiempo llamado intervalo de guarda a la duración útil, es decir, es una continuación cíclica a la parte útil del símbolo, normalmente la parte final del símbolo COFDM, el cual se inserta delante de él, de esta manera, el segmento agregado al principio del símbolo COFDM para formar el intervalo de guarda es idéntico al segmento de la misma longitud al final del símbolo COFDM. El receptor ignora la señal durante el intervalo de guarda para evitar interferencia ISI, en este sentido, si el retraso de cualquier trayectoria con respecto a la trayectoria principal es menor que el intervalo de guarda, todas las componentes vienen del mismo símbolo COFDM. El intervalo de guarda se mide en fracciones de la duración útil (T_u) del símbolo, el cual, para el estándar DVB-T tomas los posibles valores: 1/4, 1/8, 1/16, 1/32. Entre mas alto el intervalo de guarda, la transmisión de datos es más lenta.

B.3 TECNICA DE TRANSMISION COFDM

La ventaja fundamental de una modulación multiportadora consiste en divide un canal de frecuencias, en un número N de bandas de frecuencias igualmente espaciadas, en cada banda se transmite una subportadora que lleva una porción de la información, reduciendo así la tasa de símbolo a un N-ésima parte; todas las subportadoras son ortogonales entre sí. COFDM es una técnica basada en la Multiplexación por División de Frecuencia (FDM, *Frequency Division Multiplexing*), pero el hecho de que cada subportadora sea ortogonal a las otras, permite que estén traslapadas, como se muestra en la figura B.4, aumentando la eficiencia del uso del espectro, esto se debe a que la correlación cruzada entre ellas es cero, y ninguna de las señales aporta energía sobre las demás componentes [4], por lo que se puede realizar directamente en ella el proceso de demodulación (independiente del conjunto de subportadoras adicionales).

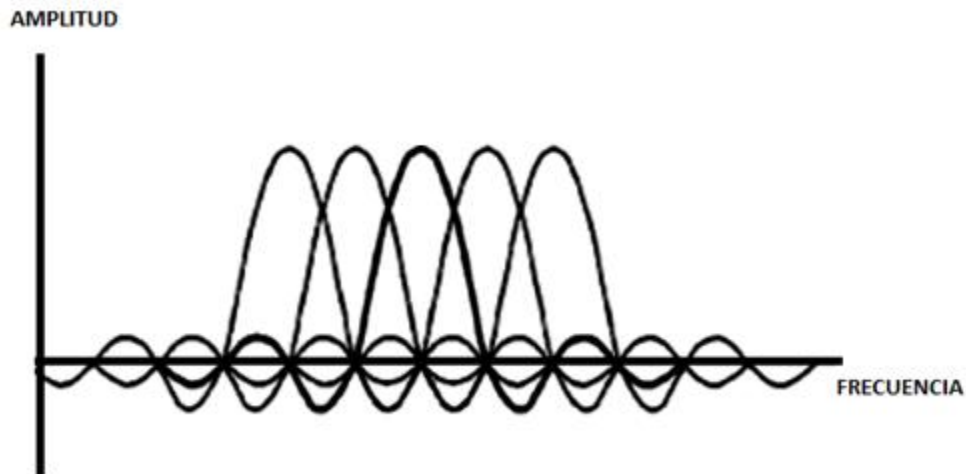


Figura B.4 Esquema de subportadora traslapadas COFDM [5].

Un sistema COFDM toma un flujo de datos y lo divide en N flujos paralelos, cada uno a una velocidad 1/N de la original. Luego a cada flujo se le asigna una subportadora, y utilizando la Transformada Rápida Inversa de Fourier (IFFT, *Inverse Fast Fourier Transform*) se obtiene la señal en el dominio del tiempo que se va a transmitir.

A.1.1 Transformada Rápida de Fourier

La Transformada Rápida de Fourier (FFT, *Fast Fourier Transform*) toma la señal, la multiplica sucesivamente por exponenciales complejas, suma cada producto y toma los resultados como un coeficiente de esa frecuencia. Los coeficientes determinan la forma del espectro y representan “cuánto” de esa frecuencia está presente en la señal de entrada. El resultado de la FFT es una señal en el dominio de la frecuencia [6].

La FFT se puede escribir en sinusoides, como se muestra en la ecuación (B.1).

$$x(t) = \sum_{f=0}^{N-1} X(f) \sin\left(\frac{2\pi kf}{N}\right) + j \sum_{f=0}^{N-1} X(f) \cos\left(\frac{2\pi kf}{N}\right) \quad (\text{B.1})$$

Aquí $x(t)$ son los coeficientes de las funciones de frecuencia angular $2\pi k/N$. $X(k)$ es el valor del espectro para la k -ésima frecuencia y $x(n)$ es el valor de la señal en el tiempo n .

Al aplicar la FFT inversa se obtiene de nuevo a la señal en el dominio del tiempo, como lo muestra la figura B.5.

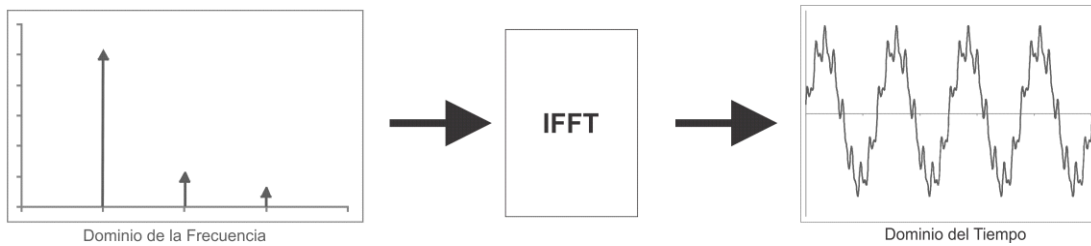


Figura B.5 La Transformada Rápida de Fourier Inversa [6].

La IFFT está definida por la ecuación (B.2),

$$X(n) = \sum_{k=0}^{N-1} x(k) \sin\left(\frac{2\pi kn}{N}\right) - j \sum_{k=0}^{N-1} x(k) \cos\left(\frac{2\pi kn}{N}\right) \quad (\text{B.2})$$

Los dos procesos son complementarios, por lo tanto utilizar la FFT y la IFFT en secuencia, dará como resultado la misma señal de entrada. Este efecto se ilustra en la figura B.6.



Figura B.6 La FFT y la IFFT funcionando como pares complementarios[6].

B.4 TRANSMISIÓN JERÁRQUICA EN DVB-T

Los sistemas TDT sufren una degradación abrupta de la señal en el borde del área de servicio, a diferencia de los sistemas de televisión analógicos en el que la degradación es paulatina, como se muestra en la figura B.7 [7].

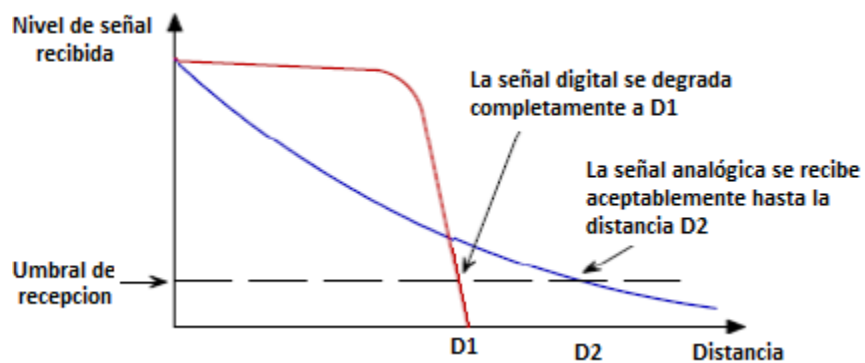


Figura B.7 Cobertura sistemas TDT y analógico [7].

Con el objetivo de mejorar la cobertura similar a los sistemas analógicos, en el sistema DVB-T puede utilizar esquemas de modulación jerárquica, la cual, consiste en la transmisión simultánea de flujos distintos de información en un flujo único de DVB-T.

Los dos flujos de transporte están definidos como:

- Flujo de Transporte de alta prioridad (HP, *High Priority*). Este flujo es de baja velocidad y menor calidad de imagen y sonido, utiliza el esquema de modulación QPSK para brindar robustez frente al ruido y mayor área de cobertura (menor requerimiento de C/N). Este flujo de información se integra en el flujo de baja prioridad.
- Flujo de Transporte de baja prioridad (LP, *Low Priority*). Complementa al flujo de transporte HP en velocidad, calidad de imagen y sonido. Las portadoras son moduladas con un esquema más exigente respecto a la relación C/N (16QAM ó 64QAM).

La recepción de mayor calidad se consigue cuando se puede decodificar bien el flujo LP (área de cobertura limitada), caso contrario, en áreas lejanas con recepción pobre, solo se puede procesar los datos del flujo HP.

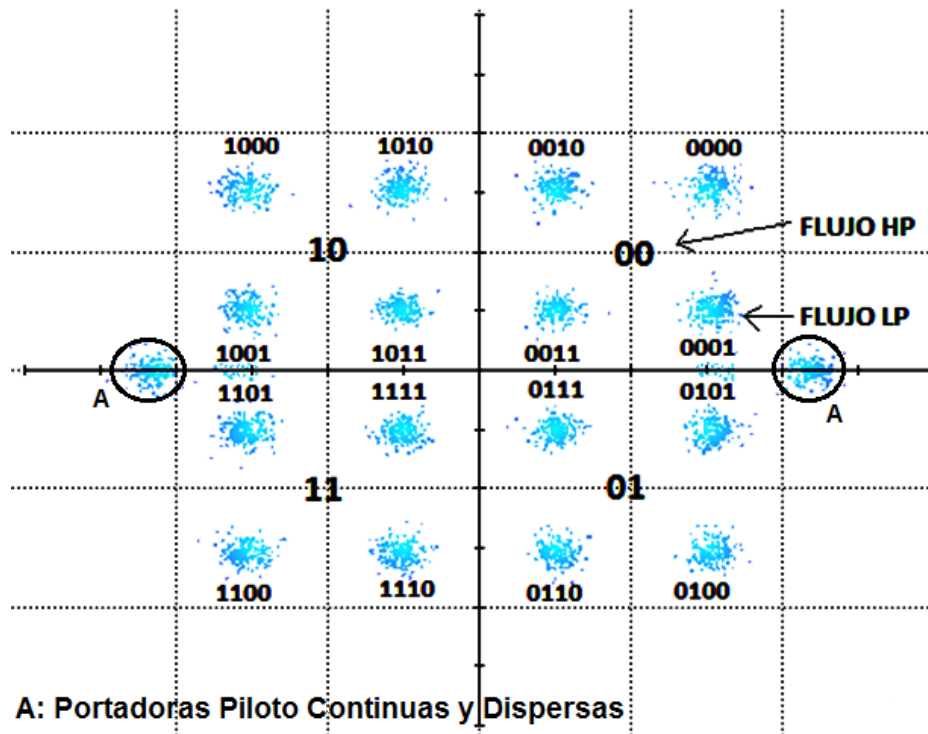


Figura B.8 Flujo de información HP (QPSK) integrado al flujo LP (16QAM).

En la figura B.8 se muestran dos tipos de constelación, una de baja prioridad (16QAM) e integrada en ella, la constelación QPSK de baja prioridad (2 bits más significativos).

B.5 ARQUITECTURA DEL ESTANDAR DVB-T

A continuación se describe la secuencia de operaciones que componen la codificación de canal. En la figura B.9 se muestra de manera esquemática el diagrama de bloques funcional del sistema DVB-T. En cuanto al receptor, la norma ETSI brinda libertad para su implementación.

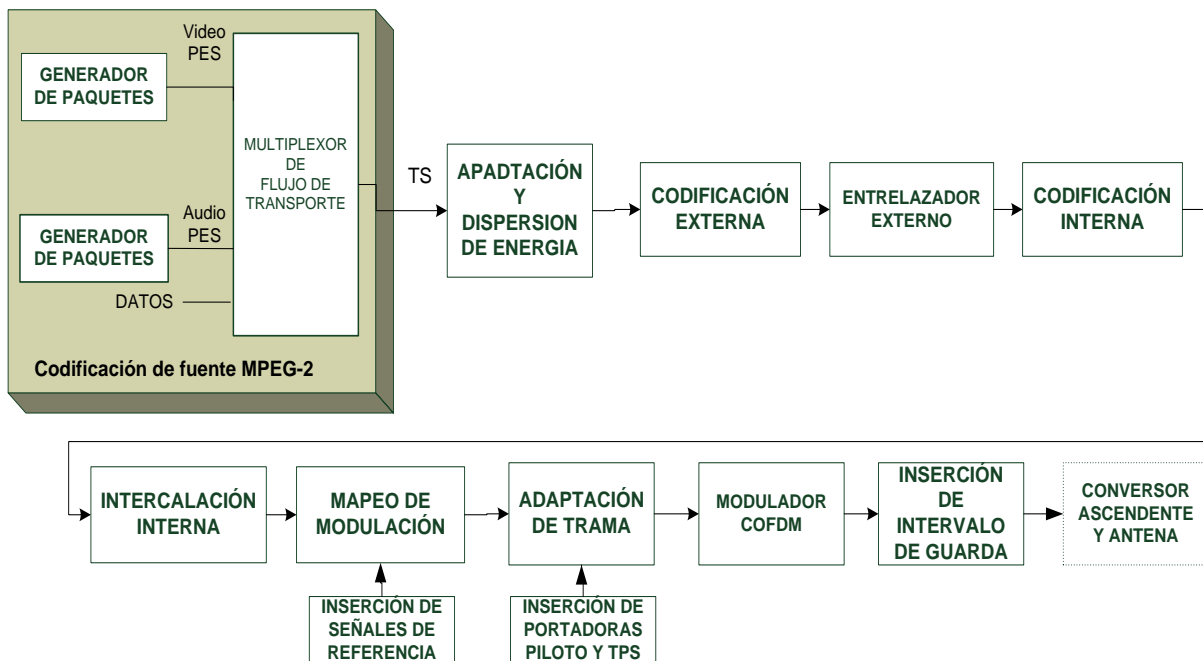


Figura B.9 Diagrama de bloques del sistema transmisor DVB-T[9].

La codificación de canal representada en la figura B.9, tiene como entrada la cadena de TS, conformado por paquetes de transporte MPEG-2 (Figura B.1), cada uno de los cuales, tiene una longitud de 188 bytes, siendo el primer byte de sincronismo, con un valor fijo de:

$$01000111_{\text{Binario}} = 74_{\text{Decimal}} = 0x47_{\text{Hexadecimal}} \quad (\text{B.3})$$

A continuación se explican cada uno de los bloques que componen la arquitectura del estándar DVB-T.

B.5.1 Adaptación y Dispersión de Energía

El objetivo de esta técnica es asegurar la dispersión de energía del espectro radiado, para ello, la señal de entrada debe hacerse casi-aleatoria, de forma que se eviten la transmisión de largas series de unos y ceros, que pueden producir la aparición con mayor frecuencia de ciertos puntos en la constelación [8]. Si existe una cadena de bits que se repiten (por ejemplo, ráfagas de 1 seguidos), aparecen rayas espectrales (picos en el espectro de la señal) que saturan a los amplificadores de potencia. En este sentido, el multiplex de entrada debe ser aleatorizado, lo cual se realiza con el proceso que se visualiza en la Figura B.10.

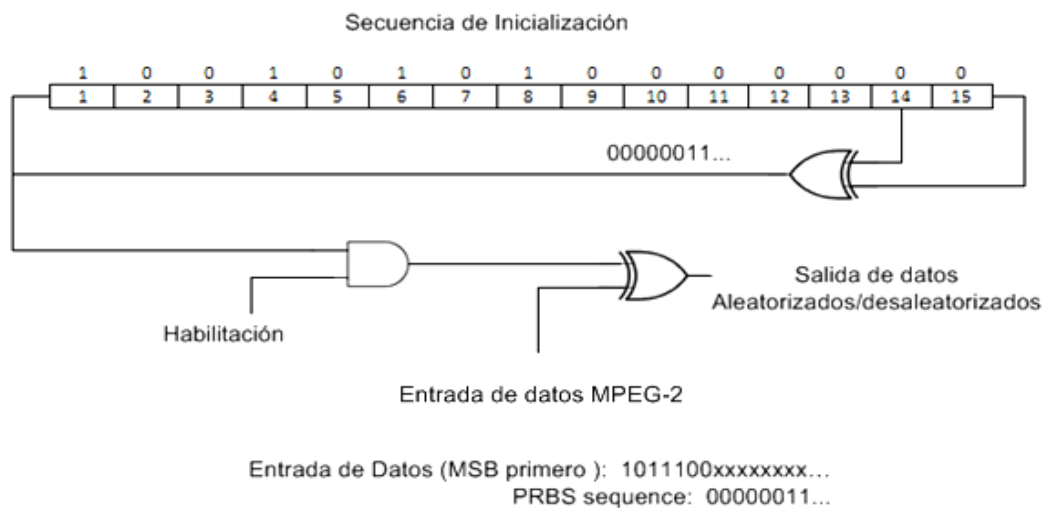


Figura B.10 Generador PRBS para la dispersión de energía del Flujo de Transporte [9].

En este proceso se utiliza una secuencia binaria pseudoaleatoria (PRBS), para lo cual se emplea un generador que usa el polinomio descrito en la ecuación B.4.

$$1 + x^{14} + x^{15} \quad \text{(B.4)}$$

Los registros del generador PRBS, que sirve tanto para desordenar (transmisión) como para ordenar (recepción), tienen cargada inicialmente la siguiente secuencia 100101010000000, la cual debe iniciarse al comienzo de un conjunto de 8 paquetes TS. Los bytes de sincronización no se ven afectados por la aleatorización [9].

Para proporcionar una señal de inicialización en el decodificador del receptor que permita la identificación de cada conjunto de 8 paquetes TS, se utiliza invertido el byte de sincronización del primer paquete de cada conjunto de 8 paquetes, es decir, el valor de $0x47_{Hex}$ (ecuación B.3) es negado y se convierte en $0xB8_{Hex}$ (10111000). Este proceso se

conoce como adaptación del flujo de transporte y da como resultado la estructura de trama TS de la Figura B.11.

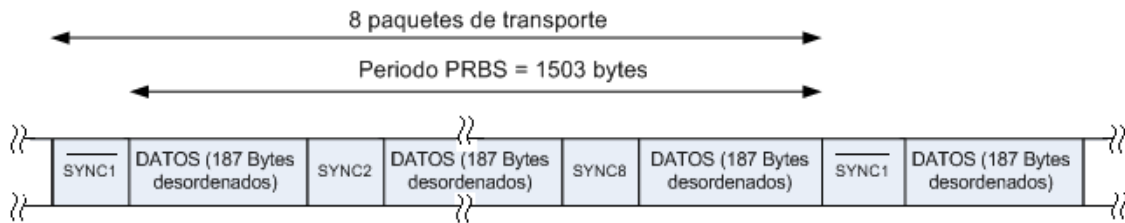


Figura B.11 Estructura del TS MPEG-2 resultado de la adaptación y dispersión de energía.

B.5.2 Codificación Externa

Para permitir en la recepción la corrección de errores FEC, se introduce una cierta redundancia en la estructura de los paquetes de transporte aleatorizados. La codificación externa usada es de tipo Reed-Solomon RS (204, 188, t=8), que es una versión acortada de la codificación original RS (255, 239, t=8). Se añaden 16 bytes de paridad a los iniciales 188 de cada paquete de transporte para obtener un total de 204 bytes. En estas condiciones se puede corregir hasta un total de 8 bytes ($t = \frac{n-k}{2} = \frac{204-188}{2} = 8$). El paquete tiene la estructura mostrada en la Figura B.12.



Figura B.12 Estructura del paquete de transporte protegido contra errores, RS(204, 188, t=8).

B.5.3 Entrelazado Externo

Es necesario introducir un entrelazado externo para generar un cierto desorden en los bytes de entrada, de forma que, al existir una secuencia de bytes errados en recepción, y luego de pasar por el proceso inverso al entrelazado externo, los correspondientes bytes errados quedan dispersos y el código Reed-Solomon podría corregirlos. El análisis se realiza a nivel de bytes, debido a que es la unidad de trabajo del código Reed-Solomon.

La Figura B.13 muestra el esquema del entrelazado externo, relativo al byte y con profundidad l=12. La intercalación es aplicada al paquete TS codificado con RS (204, 188, t=8) sin el byte de sincronismo, es decir a los 203 bytes (187 bytes de datos aleatorizados mas 16 bytes de paridad).

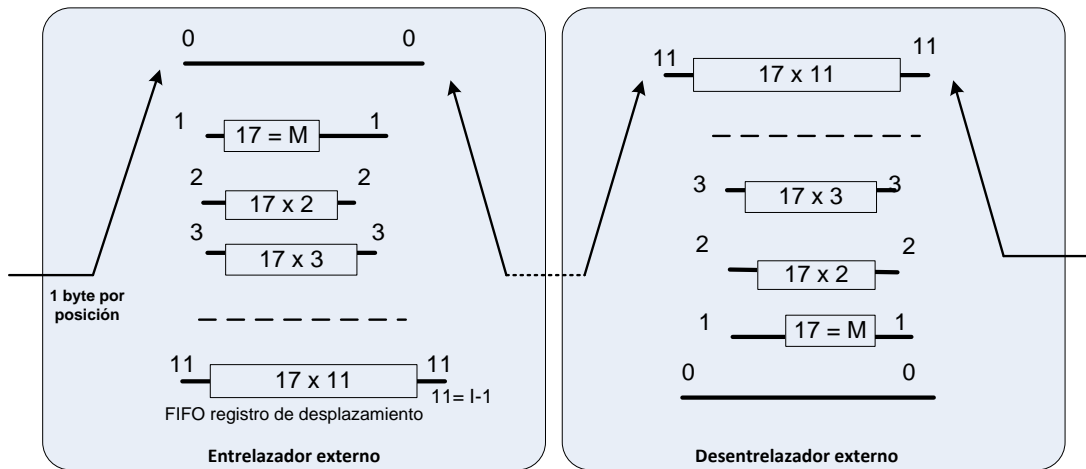


Figura B.13 Entrelazado convolucional [9].

El bloque de entrelazado se compone de 12 ramas, cíclicamente conectadas al flujo de datos de entrada mediante el conmutador de entrada. Cada rama j constituye un registro de desplazamiento FIFO (*Fist-In, Fist-Out*) con profundidad $j \times M$ celdas [8], donde:

$$M = \frac{N}{l} \quad (\text{B.5})$$

En donde $M=17$ celdas, siendo $N=204$ bytes e $l=12$ ramas.

La aleatorización consiste en que en cada rama de la Figura B.13 exista un número determinado de registros que provoca un retardo variable entre la entrada de datos por un conmutador y la salida por el otro. Los conmutadores de entrada y de salida deben estar sincronizados y avanzan un paso por cada byte de datos. Los bytes de sincronización SYNC, invertidos y no invertidos, deben pasar siempre por la rama "0" del bloque de entrelazado, y de esta forma, los bytes de sincronismo de las tramas de paquetes TS no son afectados por algún retardo.

Cada byte de los paquetes de transporte se encuentra desplazado en el tiempo un número de posiciones igual a $j \times 17$, con lo que los bytes originales de un paquete de transporte son repartidos entre dos paquetes consecutivos. El desentrelazador tiene un principio similar al entrelazador, con la diferencia que los índices de las ramas están invertidos, es decir, $j=0$ corresponde al máximo retardo [8]. La sincronización se obtiene enrutando el primer byte SYNC reconocido (invertido o no) hacia la rama "0". Después de reorganizar los errores se habrán distribuido en paquetes sucesivos y se favorecerá la corrección de errores.

B.5.4 Codificación Interna

Después del proceso de codificación y entrelazado externo, se realiza una codificación denominada “interna” a nivel de bits, la cual introduce redundancia que habilita la corrección de errores en recepción. Esta codificación interna está basada en registros de memoria (capacidad un bit) y sumas módulo dos, en la Figura B.14 se muestra el esquema del mecanismo del codificador interno (convolucional) de relación de bit entrada y salida de 1/2.

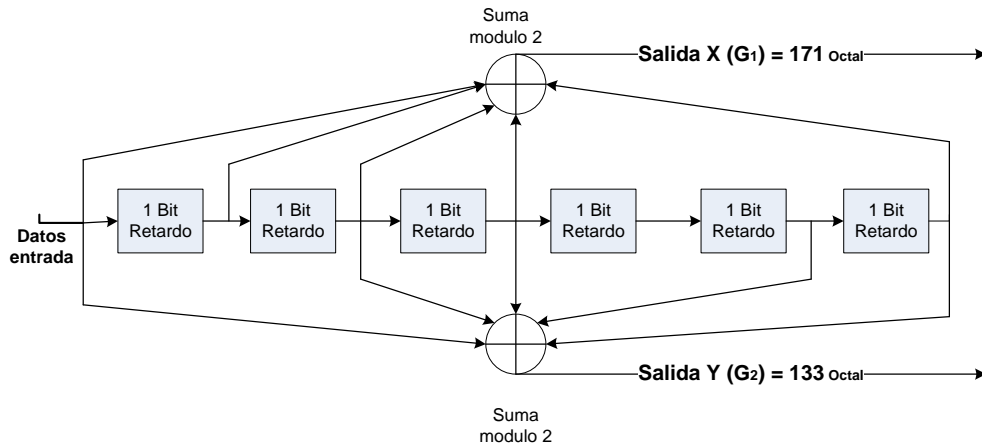


Figura B.14 Codificación interna (convolucional)[9].

Como se muestra en la Figura B.14 el código convolucional base está formado por seis registros de memoria y dos bits de salida (X y Y) por cada bit de entrada. Los datos de entrada se combinan con los obtenidos a la salida de cada uno de los registros de memoria mediante sumas módulo 2. Los polinomios generadores del código son:

$$G_1(D) = \text{Bit}_{\text{entrada}} + D1 + D2 + D3 + D6$$

$$G_2(D) = \text{Bit}_{\text{entrada}} + D2 + D3 + D5 + D6$$

Como se indicó anteriormente, el estándar DVB-T contempla diversas tasas para el codificador convolucional. La tasa 1/2 es aportada por el propio código base, mientras que las restantes tasas se consiguen a partir de estrategias de perforado, es decir, para no limitar capacidad del canal con la tasa 1/2 (por cada bit de información útil se envía otro bit de redundancia), el sistema utiliza el proceso de perforado, el cual selecciona, para la transmisión, solo algunos de los bits obtenidos de las salidas X y Y, luego los organiza en una secuencia en serie. En la Figura B.15 se resume este procedimiento.

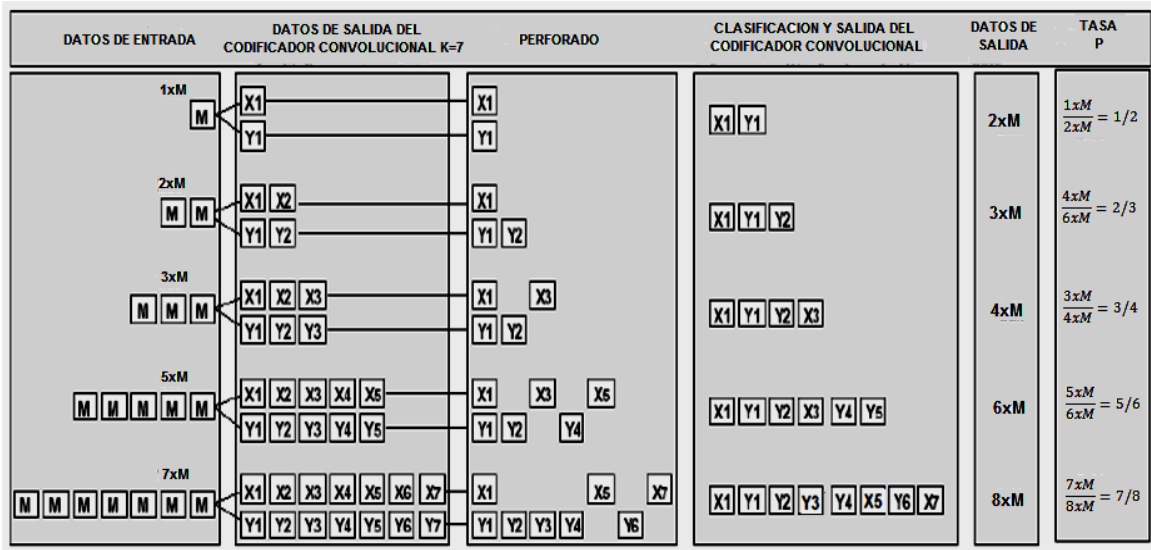


Figura B.15 Codificación interna, esquema de perforado y secuencia en serie transmitida [8].

Siguiendo el esquema de la Figura B.15, se puede definir un patrón de perforado para obtener una secuencia transmitida según la tasa de codificación requerida.

Siendo M el número de celdas, el funcionamiento es el siguiente [8]:

- ✓ 1xM datos de entrada se convierten en 2xM datos de salida en el caso de tasa de código 1/2.
- ✓ 2xM datos de entrada se convierten en 3xM datos de salida en el caso de tasa de código 2/3
- ✓ Procedimiento similar hasta la relación de codificación 7/8.

La protección contra errores es menor para valores más altos de la relación de codificación, pero la capacidad del canal aumenta.

B.5.5 Entrelazado Interno

El intercalador interno se compone de un primer proceso de intercalación a nivel de bit que va seguido de un proceso de intercalación a nivel símbolos. En la norma ETSI EN 300 744 se especifican los procesos de intercalación interna que deben aplicarse para los modos de transmisión 2K y 8K.

B.5.5.1 Entrelazado de Bits.

El proceso de entrelazado o intercalación se orienta al tamaño de los símbolos, el cual está en función del tipo de la constelación, es decir, la entrada del sistema, será una señal que se demultiplexará un número v de veces en función de la constelación elegida, de manera que el proceso de entrelazado está orientado a proporcionar el tamaño adecuado a los símbolos. Así, los símbolos tienen 2 bits en QPSK ($v = 2$), 4 bits en 16QAM ($v = 4$) y finalmente 6 bits en 64QAM ($v = 6$). En el caso de modo no jerárquico, el único flujo de transporte de entrada, compuesto por x_i bits se demultiplexa en v sub-flujos, siendo v el número de bits por símbolo, resultando en cada vía los bits b_{ij} , como se observa en las figuras 16,17 y 18 [9].

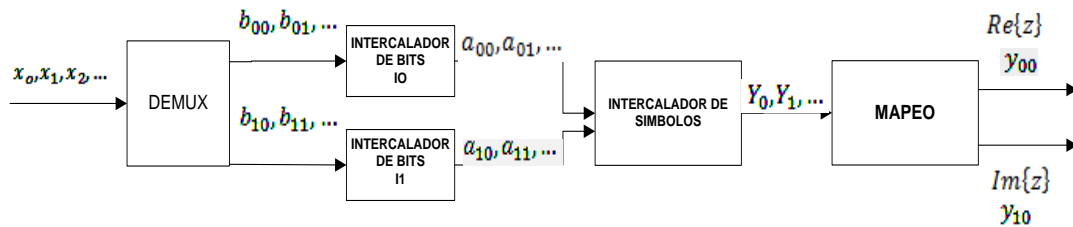


Figura B.16 Proceso de entrelazado de bits, entrelazado de símbolos y mapeo, para la modulación QPSK no jerárquico [9].

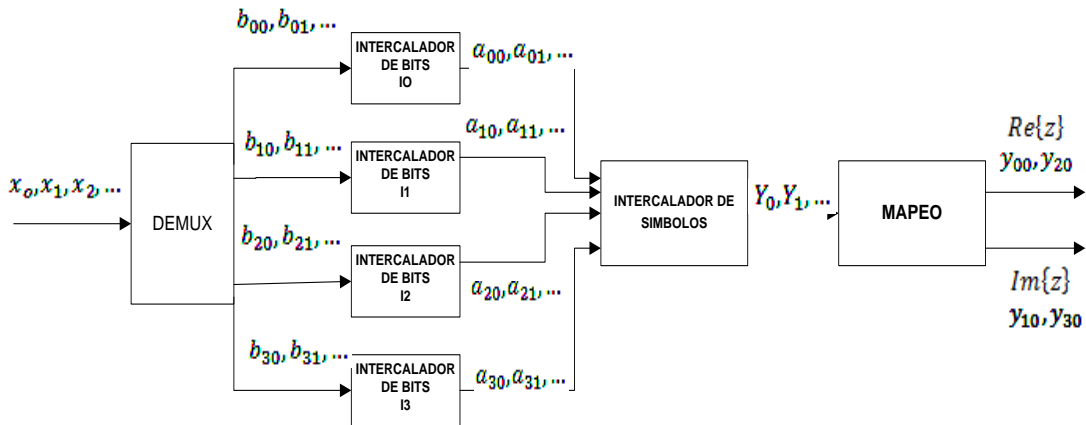


Figura B.17 Proceso de entrelazado de bits, entrelazado de símbolos y mapeo, para la modulación 16QAM no jerárquico [9].

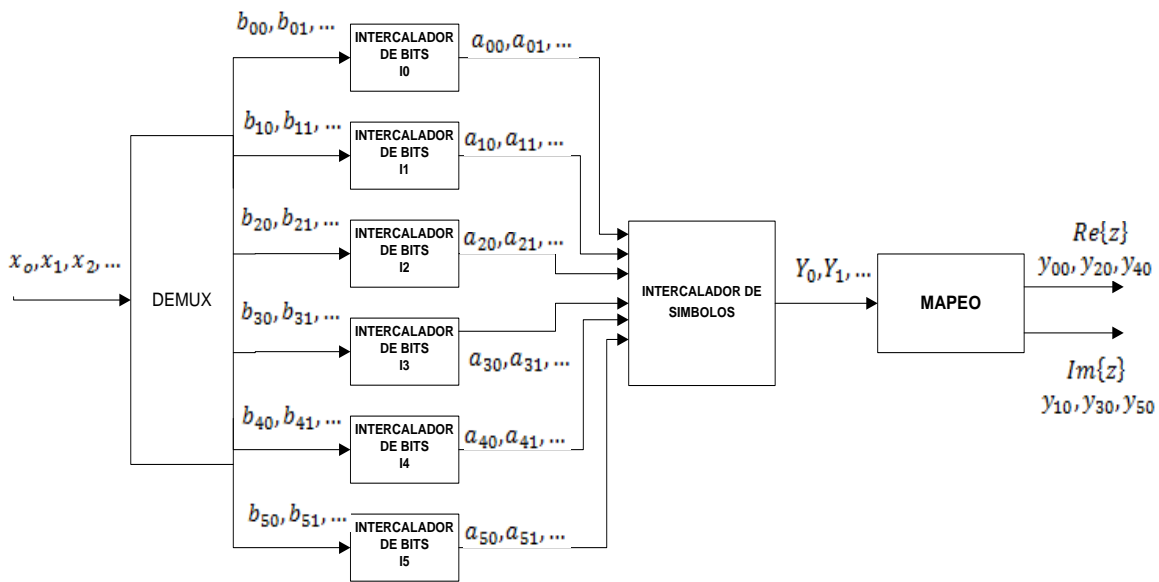


Figura B.18 Proceso de entrelazado de bits, entrelazado de símbolos y mapeo, para la modulación 64QAM no jerárquico [9].

Para los modos de transmisión jerárquicos el flujo de transporte de entrada de alta prioridad (HP), compuesto por los bits x'_i , se demultiplexa en 2 sub-flujos, y el flujo de baja prioridad (LP), compuesto por los bits x''_i , lo hace en $(v - 2)$ sub-flujos, siendo v el número de bits por símbolo, resultando los bits b_{ij} , como se ilustra en las figuras 19 y 20.

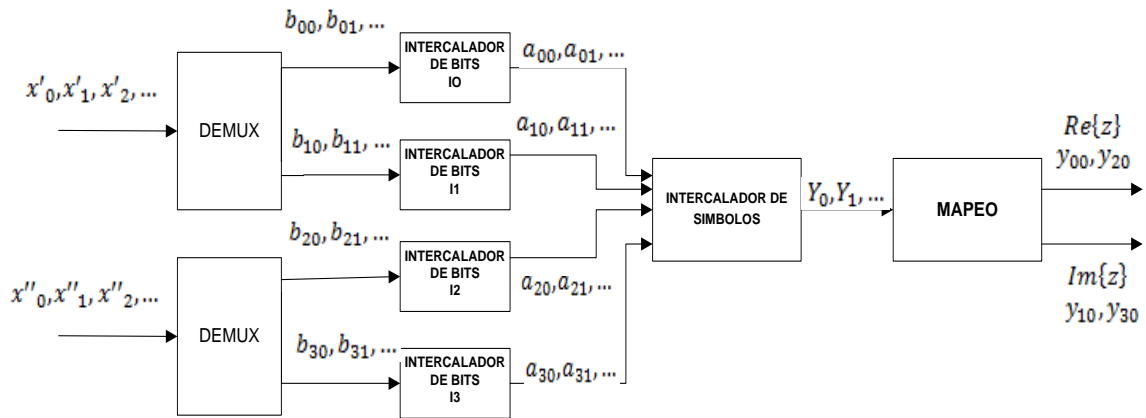


Figura B.19 Proceso de entrelazado de bits, entrelazado de símbolos y mapeo, para la modulación 16QAM jerárquico [9].

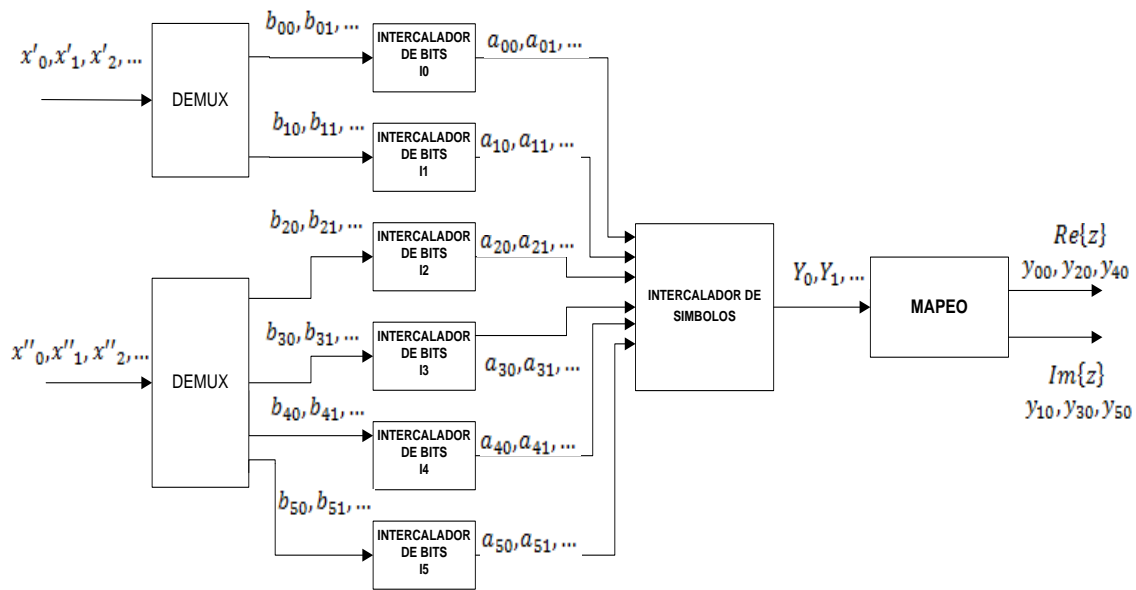


Figura B.20 Proceso de entrelazado de bits, entrelazado de símbolos y mapeo, para la modulación 64QAM jerárquico [9].

Los bits resultantes b_{ij} a partir de los esquemas de demultiplexado de los bits x_i para el modo no jerárquico y x'_i y x''_i para el modo jerárquico se muestran en la Tabla B.2.

Tabla B.2. Esquemas de demultiplexación para las modulaciones QPSK, 16QAM Y 64QAM [9].

	Transmisión no jerárquica	Transmisión jerárquica
	$x_i \rightarrow b_{ij}$	$x_i \rightarrow b_{ij}$
QPSK	$x_0 \rightarrow b_{00}$ $x_1 \rightarrow b_{10}$	
16QAM	$x_0 \rightarrow b_{00}$ $x_1 \rightarrow b_{10}$ $x_2 \rightarrow b_{20}$ $x_3 \rightarrow b_{30}$	$x'_0 \rightarrow b_{00}$ $x'_1 \rightarrow b_{10}$ $x''_2 \rightarrow b_{20}$ $x''_3 \rightarrow b_{30}$
64QAM	$x_0 \rightarrow b_{00}$ $x_1 \rightarrow b_{10}$ $x_2 \rightarrow b_{20}$ $x_3 \rightarrow b_{30}$ $x_4 \rightarrow b_{40}$ $x_5 \rightarrow b_{50}$	$x'_0 \rightarrow b_{00}$ $x'_1 \rightarrow b_{10}$ $x''_2 \rightarrow b_{20}$ $x''_3 \rightarrow b_{30}$ $x''_4 \rightarrow b_{40}$ $x''_5 \rightarrow b_{50}$

El entrelazador de bits consigue que los grupos de bits que dan lugar a un símbolo no estén formados por bits consecutivos de entrada. Después del proceso de demultiplexación, los bits serializados se agrupan en bloques de 126 bits y cada grupo se introduce en los registros de las ramas (intercaladores v) que conforman el entrelazador,

estos registros se numeran desde l_0 hasta l_5 , QPSK utiliza los dos primeros (l_0, l_1), 16QAM utiliza los 4 primeros (l_0, l_1, l_2, l_3) y 64QAM los utiliza todos ($l_0, l_1, l_2, l_3, l_4, l_5$) [3].

El tamaño de 126 bits para cada bloque implica que este proceso se repita un número exacto de veces por cada símbolo COFDM, tanto si se utiliza el modo de transmisión 2K o 8K. En cada ejecución, se crean 126 grupos de bits (símbolos) hacen falta 12 ejecuciones de este entrelazador 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 [9].

El vector de entrada para cada intercalador o entrelazador ($l_0, l_1, l_2, l_3, l_4, l_5$) de bits es definido por la ecuación (B.6).

$$\mathbf{B}(e) = (b_{e0}, b_{e1}, b_{e2}, \dots, b_{e125}) \quad (\text{B.6})$$

Donde e toma los valores entre 0 y $v - 1$, los bloques de bits de salida de cada entrelazador están compuestos por la ecuación (B.7).

$$\mathbf{A}(e) = (a_{e0}, a_{e1}, a_{e2}, \dots, a_{e125}) \quad (\text{B.7})$$

La relación entre los bits de entrada y salida, es la siguiente:

$$a_{ew} = b_e H_e(w) \quad (\text{B.8})$$

Donde w va desde 0 hasta 125 y $H_e(w)$ es una función de permutación, la cual es diferente para cada intercalador, así:

$$I_0: H_0(w) = w \quad (\text{B.9})$$

$$I_1: H_1(w) = (w + 63) \bmod 126 \quad (\text{B.10})$$

$$I_2: H_2(w) = (w + 105) \bmod 126 \quad (\text{B.11})$$

$$I_3: H_3(w) = (w + 42) \bmod 126 \quad (\text{B.12})$$

$$I_4: H_4(w) = (w + 21) \bmod 126 \quad (\text{B.13})$$

$$I_5: H_5(w) = (w + 84) \bmod 126 \quad (\text{B.14})$$

Las salidas de los v intercaladores se agrupan para formar palabras y'_w de v bits, de manera que se toma cada vez un único bit de la salida de cada intercalador, correspondiente al bit más significativo a la salida, como se indica en la ecuación (B.15).

$$y'_w = (a_{0w}, a_{1w}, \dots, a_{v-1,w}) \quad (\text{B.15})$$

B.5.5.2 Entrelazado de símbolos

El entrelazado de símbolos agrupa las palabras y'_w en bloques cuyo tamaño está calculado para que los datos se puedan distribuir directamente entre las portadoras activas de datos del símbolo COFDM. Para ello, las palabras y'_w se agrupan para formar unos vectores Y' de la siguiente forma.

Para el modo 2K se tienen 12 conjuntos de 126 palabras, para un total de 1512 palabras de ν bits, como se muestra en la ecuación (B.16).

$$Y' = (y'_0, y'_1, y'_2, \dots, y'_{1511}) \quad (\text{B.16})$$

Para el modo 8K se tiene 48 conjuntos de 126 palabras, para un total de 6048 palabras de ν bits, como se indica en la ecuación (B.17).

$$Y' = (y'_0, y'_1, y'_2, \dots, y'_{6047}) \quad (\text{B.17})$$

Los vectores Y' expresados en las ecuaciones (B.16) y (B.17), a la entrada del entrelazador de símbolos se convierten en los vectores entrelazados, Y , como se describe en la ecuación (B.18).

$$Y = (y_0 \ y_1 \ y_2 \ \dots \ y_{N_{max}-1}) \quad (\text{B.18})$$

Siendo $N_{max} = 1512$ en modo 2K y $N_{max} = 6048$ en modo 8K. El contenido del vector Y , expresado en la ecuación (B.18), se define según el símbolo COFDM que se va a generar, de la siguiente manera [8]:

$$y_q = y'_{H(q)} \quad \text{donde } q = 0 \dots N_{max}-1 \quad \text{para símbolos COFDM impares} \quad (\text{B.19})$$

$$y_{H(q)} = y'_q \quad \text{donde } q = 0 \dots N_{max}-1 \quad \text{para símbolos COFDM pares} \quad (\text{B.20})$$

$H(q)$ es una función de permutación que se puede generar mediante el siguiente algoritmo y cuyo diagrama de bloques esquemático se muestra en las Figura (B.21) y (B.22) [9].

$q = 0$

para ($i = 0; i < Mmax; i = i + 1$)

$$\{ \quad H(q) = (i \bmod 2) * 2^{Nr-1} + \sum_{j=0}^{Nr-2} R_i(j) * 2^j; \quad \text{si } (H(q) < Nmax)$$

$q = q + 1$

}

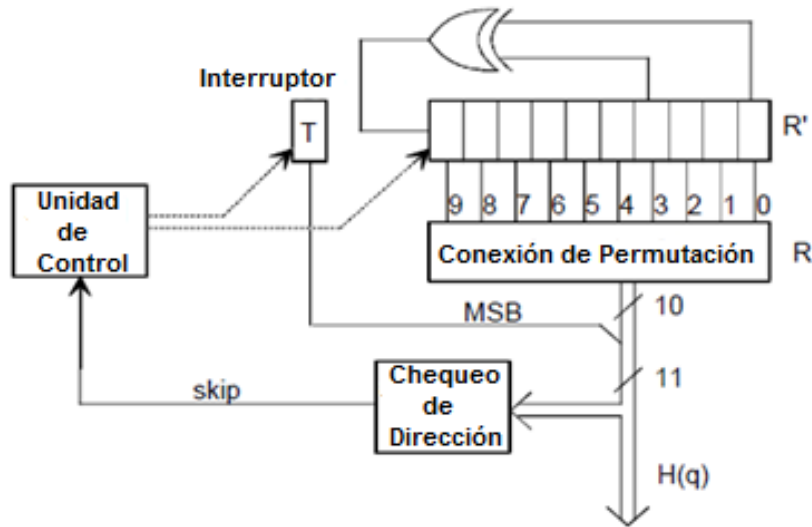


Figura B.21 Entrelazador de símbolos para el modo 2K [9].

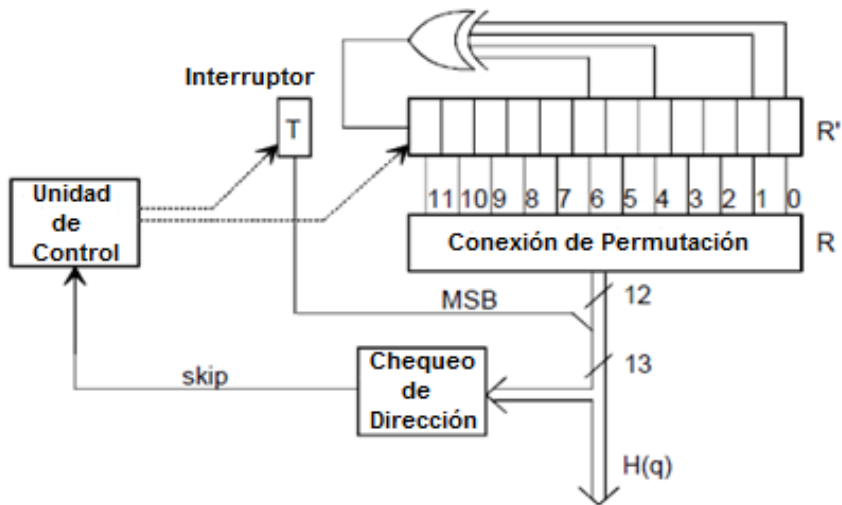


Figura B.22 Entrelazador de símbolos para el modo 8K [9].

En los diagramas de bloques presentados en las figuras B.21 y B.22 R'_i son palabras binarias compuestas por (N_{r-1}) bits, y N_r está definido por la ecuación (B.21).

$$N_r = \log_2(Mmax) \quad (B.21)$$

Donde $Mmax = 2048$ portadoras para el modo 2K y $Mmax = 8192$ portadoras para el modo 8K, por lo tanto R'_i es una palabra de 10 bits en modo 2K y una palabra de 12 bits en modo 8K. R_i son vectores derivados de las palabras R'_i mediante las permutaciones de bits, definidos por el estándar DVB-T en la tabla B.3.

Tabla B.3. Valores de R_i derivados de R'_i [8].

Modo 2K	Posiciones de bits R'_i			9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
	Posiciones de bits R_i			0	7	5	1	8	2	6	9	3	4
Modo 8K	Posiciones de bits R'_i	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
	Posiciones de bits R_i	5	11	3	0	10	8	6	9	2	4	1	7

B.5.6 Mapeo de Modulación

El mapeo de modulación consiste en asignar números complejos $(a + jb)$ al conjunto de bits que se obtuvo a la salida del intercalador interno mediante un código de Gray⁵ para todas las constelaciones, como se ilustra en la figura B.23.

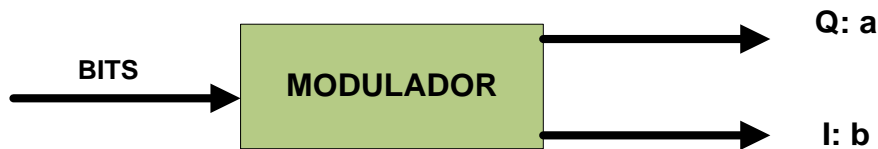


Figura B.23 Diagrama del mapeo de modulación.

Cada palabra $y'_{q'}$ perteneciente al vector Y de salida del entrelazador de símbolos, tiene v bits y se puede expresar así:

$$y'_{q'} = (y_{0q'} y_{1q'} y_{2q'} \dots y_{v-1,q'}) \quad \text{siendo } 0 \leq q' \leq 1511 \text{ en modo } 2k \quad (B.22)$$

$$0 \leq q' \leq 6047 \text{ en modo } 8k$$

⁵ El código Gray se caracteriza por tener una diferencia de un solo bit entre dos símbolos que estén a distancia mínima.

Para dar una forma física a estas agrupaciones de bits de manera que se puedan representar energéticamente, es necesario distribuir o mapear en dos señales I y Q el flujo de serie de datos presente a la salida del entrelazador de símbolos, la distribución de los bits entre las señales I y Q se hace con orden descrito en la tabla B.4.

Tabla B.4. Distribución de bits de las señales I y Q para cada modulación [3].

Constelacion	Bits del flujo de datos de serie	Bits en la salida I	Bits en la salida Q
QPSK	$y_{0q'} y_{1q'}$	$y_{0q'}$	$y_{1q'}$
16QAM	$y_{0q'} y_{1q'} y_{2q'} y_{3q'}$	$y_{0q'} y_{2q'}$	$y_{1q'} y_{3q'}$
64QAM	$y_{0q'} y_{1q'} y_{2q'} y_{3q'} y_{4q'} y_{5q'}$	$y_{0q'} y_{2q'} y_{4q'}$	$y_{1q'} y_{3q'} y_{5q'}$

En la figura B.24 se ilustra el caso en que se convierten bytes (8 bits), pasando por símbolos de $v=6$ bits, en las 2 señales I y Q necesarias para obtener una constelación del tipo 64QAM. Nótese que la duración inicial de cada bit se duplica en las salidas I y Q [8].

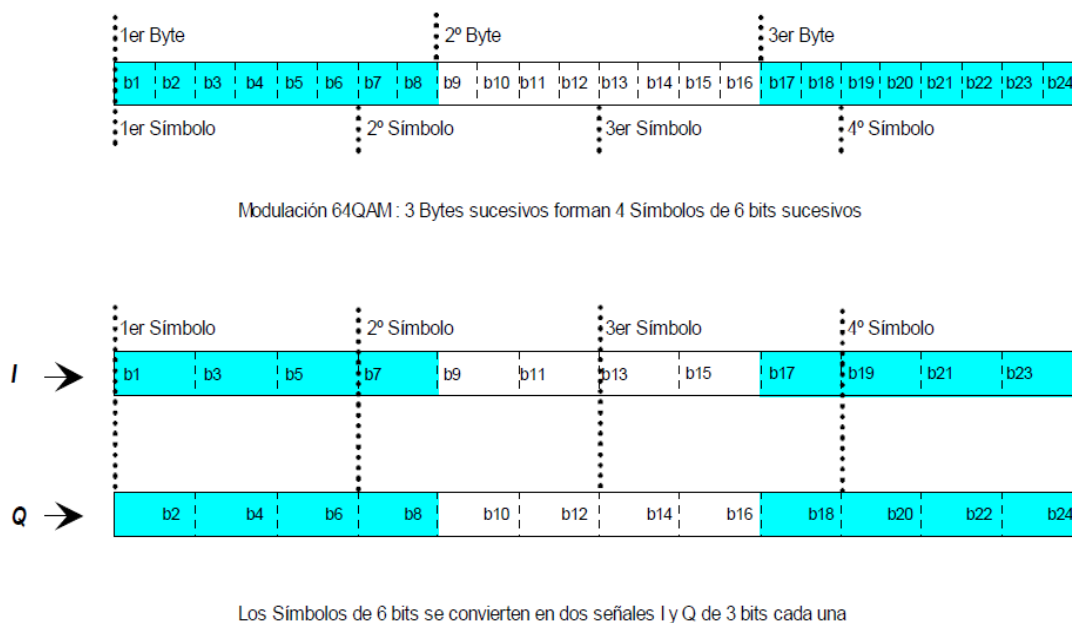


Figura B.24 Mapeado para la modulación 64QAM [5].

En la figura B.25 se muestran las constelaciones con mapeado Gray para las modulaciones QPSK y 16QAM.

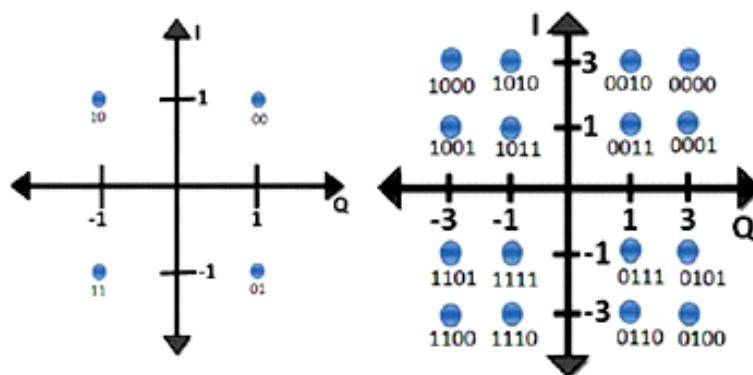


Figura B.25 Diagrama de constelación para las modulaciones QPSK y 16QAM, uniforme con $\alpha = 1$ [3].

En la figura B.25 se puede observar que la diferencia entre cada código binario adyacente es solo de un bit (código Gray), lo cual reduce la BER y la probabilidad de interpretar de forma errada un bit en la región de un punto adyacente.

En la tabla B.5 se muestran los valores exactos de los puntos de la constelación para las diferentes modulaciones del estándar DVB-T [1].

Tabla B.5. Valores de n, m siendo los puntos de la constelación del tipo $z \in \{n + jm\}$ [1].

	n	m
QPSK	{-1,1}	{-1,1}
16QAM jerárquica y no jerárquica con $\alpha=1$	{-3,-1,1,3}	{-3,-1,1,3}
16QAM no uniforme con $\alpha=2$	{-4,-2,2,4}	{-4,-2,2,4}
16QAM no uniforme con $\alpha=4$	{-6,-4,4,6}	{-6,-4,4,6}
64QAM jerárquico y no jerárquico con $\alpha=1$	{-7,-5,-3,-1,1,3,5,7}	{-7,-5,-3,-1,1,3,5,7}
64QAM no uniforme con $\alpha=2$	{-8,-6,-4,-2,2,4,6,8}	{-8,-6,-4,-2,2,4,6,8}
64QAM no uniforme con $\alpha=4$	{-10,-8,-6,-4,-2,2,4,6,8,10}	{-10,-8,-6,-4,-2,2,4,6,8,10}

B.5.6.1 Factor de normalización de energía FNE

Las portadoras que contienen datos se transmiten con nivel de potencia normalizado. La normalización es un proceso de multiplicación de un factor con los valores complejos de la constelación, de tal manera que la máxima potencia sea 1. Este procedimiento se utiliza para ajustar la posición de los puntos en la constelación (esquema de modulación) de las portadoras de datos a aproximadamente dentro de un cuadrado de lado unitario, y normalizar su energía con respecto a las portadoras pilotos y las portadoras de información del sistema. Este factor denominado FNE depende del parámetro de modulación alfa (α). Por lo tanto los factores de normalización que cumplen la condición de normalización vienen dados en la siguiente tabla B.6 [3].

Tabla B.6 FNE para las constelaciones utilizadas por COFDM [3].

Tipo de modulación	Factor α	FNE
QPSK	$\alpha=1$ (Transmisión no jerárquica)	$C = Z/\sqrt{2}$
16QAM	$\alpha=1$ (Transmisión no jerárquica)	$C = Z/\sqrt{10}$
16QAM	$\alpha=2$ (Transmisión jerárquica)	$C = Z/\sqrt{20}$
16QAM	$\alpha=4$ (Transmisión jerárquica)	$C = Z/\sqrt{52}$
64QAM	$\alpha=1$ (Transmisión no jerárquica)	$C = Z/\sqrt{42}$
64QAM	$\alpha=2$ (Transmisión jerárquica)	$C = Z/\sqrt{60}$
64QAM	$\alpha=4$ (Transmisión jerárquica)	$C = Z/\sqrt{108}$

En la figura B.29, se indica el proceso de normalización de energía aplicado una constelación con modulación 16QAM.

B.5.6.2 Modulación uniforme y no uniforme.

- **Modulación uniforme**

En este tipo de modulación los puntos de la constelación tienen la misma distancia con sus adyacentes independiente del cuadrante en que se encuentren, equivale a tener el factor α igual a 1. El estándar DVB-T especifica 3 valores para este parámetro: Modulaciones uniformes con $\alpha = 1$ y modulaciones no uniformes con $\alpha = 2$ y $\alpha = 4$ [3].

- **Modulación no uniforme**

En este tipo de modulación la distancia de cada punto es multiplicada por la constante alfa para aumentar la distancia entre cuadrantes. Por ejemplo al incrementar con ($\alpha=2$) se sube un nivel más la separación de cada cuadrante en comparación con $\alpha=1$ y así sucesivamente mientras α aumente. Con este tipo de modulación se mejora la SNR de cada portadora reduciendo así la interferencia entre los puntos de cada cuadrante de la constelación en uso, pero causa un aumento de la potencia transmitida [3].

En la figuras B.26 y B.27 se ilustran la modulación de 16QAM para diferentes valores de α .

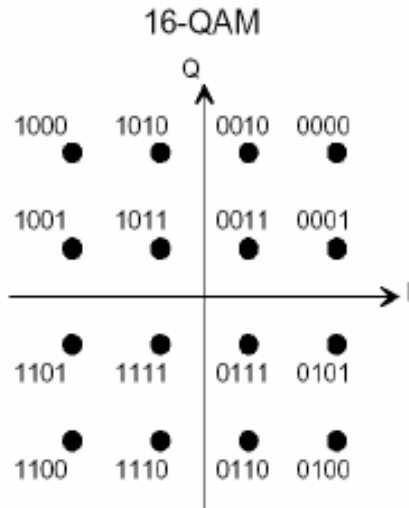


Figura B.26 Diagrama de constelación para la modulación 16QAM con $\alpha=1$ [9].

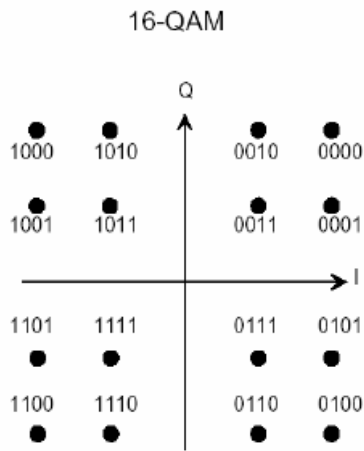


Figura B.27 Diagrama de constelación para la modulación 16QAM con $\alpha=2$ [9].

B.5.7 Adaptación de Trama e Inserción de Portadoras Piloto.

Para demodular correctamente las señales, el receptor debe muestrearlas durante el período útil del símbolo COFDM, no durante el intervalo de guarda, por consecuencia, la ventana de tiempo debe situarse con precisión en el instante en que se presenta cada símbolo. En el sistema DVB-T se resuelve este problema utilizando portadoras piloto distribuidas de forma regular en el canal de transmisión y que actúan como “marcadores de sincronismo”, como se muestra en la figura B.28 [10].

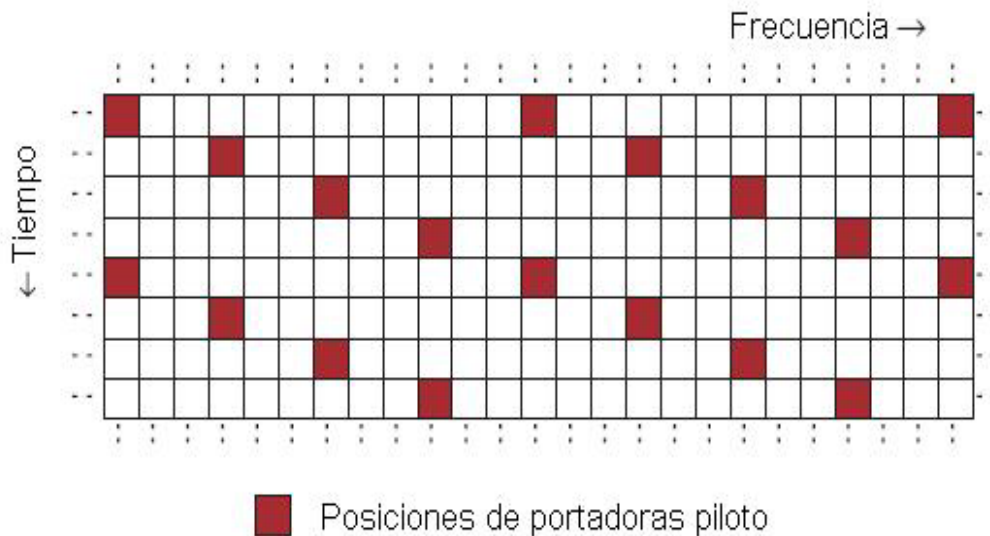


Figura B.28 Distribución de portadoras piloto [10].

Como la información de las señales piloto es conocida, en el receptor es posible realizar una estimación de la respuesta en frecuencia del canal. La estimación así obtenida para una portadora piloto puede interpolarse para llenar los huecos que separan a los pilotos y emplearse para ecualizar todas las constelaciones que transportan datos.

En el estándar DVB-T existen tres tipos de portadoras piloto: continuas, dispersas y TPS, las cuales se describen a continuación:

- **Portadoras pilotos continuas.** Este tipo de portadoras son usadas para el sincronismo en tiempo y en frecuencia para la ecualización en el receptor, su principal función es eliminar el ruido de fase que produce la rotación que sufre la constelación de las portadoras. Tienen un nivel de potencia reforzado y utiliza el Esquema de Modulación por Desplazamiento de Fase Binario (BPSK, *Binary Phase Shift Keying*). A diferencia de las portadoras piloto dispersas, las posiciones que ocupan las portadoras piloto fijas en cada símbolo COFDM son siempre las mismas, esto se ilustra en la tabla B.7 [3].

Tabla B.7 Posiciones de las portadoras piloto continuas en un símbolo COFDM [9].

Modo 2K	Modo 8K
0 28 54 87 141 156 192	0 28 54 87 141 156 192 201 255 279 282 233 432
201 255 279 282 233 432	450 483 525 531 618 636 714 759 765 780 804 873
450 483 525 531 618 636	888 918 939 942 969 984 1050 1101 1107 1110
714 759 765 780 804 873	1137 1140 1146 1206 1269 1323 1377 1491 1683
888 918 939 942 969 984	1704 1752 1758 1791 1845 1860 1896 1905 1959
1050 1101 1107 1110	1983 1986 2037 2136 2154 2187 2229 2235 2322
1137 1140 1146 1206	2340 2418 2463 2469 2484 2508 2577 2592 2622
1269 1323 1377 1491	2643 2646 2673 2688 2754 2805 2811 2814 2841
1683 1704	2844 2850 2910 2973 3027 3081 3195 3387 3408
	3456 3462 3495 3549 3564 3600 3609 3663 3687
	3690 3741 3840 3858 3891 3933 3939 4026 4044
	4122 4167 4173 4188 4212 4281 4296 4326 4347
	4350 4377 4392 4458 4509 4515 4518 4545 4548
	4554 4614 4677 4731 4785 4899 5091 5112 5160
	5166 5199 5253 5268 5304 5313 5367 5301 5394
	5445 5544 5562 5595 5637 5643 5730 5748 5826
	5871 5887 5892 5916 5985 6000 6030 6051 6054
	6081 6096 6162 6213 6219 6222 6249 6252 6258
	6318 6381 6435 6489 6603 6795 6816

- **Portadoras pilotos dispersas.** Estas portadoras son usadas la sincronización en tiempo y frecuencia y que permiten la ecualización del canal. Las posiciones de este tipo de portadoras en un símbolo COFDM no son fijas, como se puede observar en la tabla 8, hay 524 portadoras dispersas por símbolo COFDM en modo 8K y 131 portadoras por símbolo COFDM; su potencia esta reforzada en 2,5 dB [3].

Tabla B.8 Tipo y número de portadoras por símbolo COFDM [3].

Tipo de portadora	Modo 2K	Modo 8K
Continuas	45	177
Dispersas	131	524
TPS	17	68
Datos	1512	6048
Total portadoras	1705	6817

La incorporación de las portadoras piloto exige organizar la señal transmitida en unidades de "Trama", de la siguiente manera:

- Cada trama COFDM de duración TF contiene 68 símbolos COFDM, tanto en modo 2K como en modo 8K. En consecuencia, $TF=68 \cdot TS$.

- Una súper-trama COFDM está formada por 4 tramas COFDM, tanto en modo 2K como en modo 8K.
- Una mega-trama COFDM está formada por 32 tramas en el modo 2K y por 8 tramas en el modo 8K.

En la tabla B.8 se puede observar que el modo 8K tiene muchas más portadoras piloto por símbolo COFDM, que el modo 2K. Esta estructura de portadoras piloto, está diseñada para utilizar su posición y valor conocido, para transportar información de control, así como emplear técnicas de estimación de canal y otros parámetros de sincronización.

En la figura B.29, se aprecian las portadoras de datos y las portadoras piloto continuas, dispersas y portadoras TPS como puntos sobre el eje real de la constelación 16QAM.

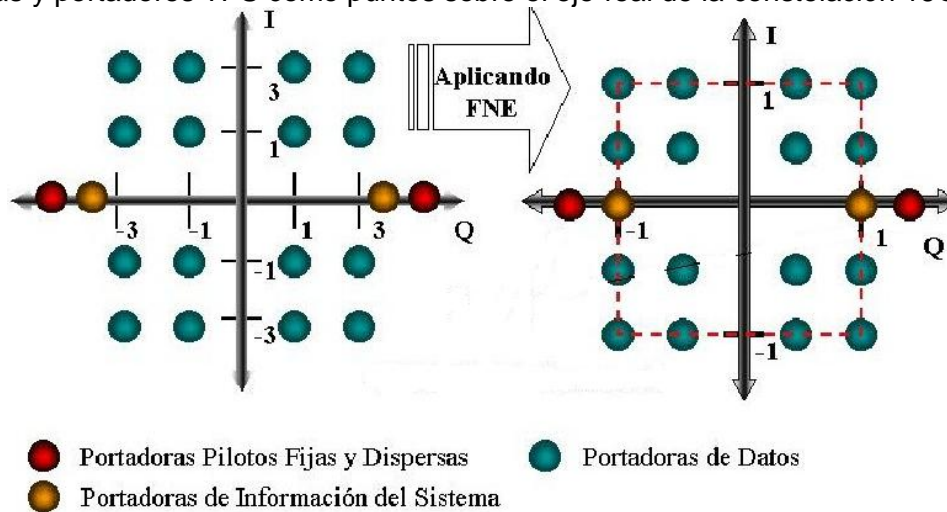


Figura B.29 Diagrama de constelación de la modulación 16QAM y tipos de portadoras utilizadas en COFDM [3].

- **Portadoras TPS.**

Las Portadoras de Información del Sistema (TPS, *Transmission Parameter Signalling*), se utilizan para transportar información de los parámetros con los que está trabajando el transmisor de tal manera que el receptor se configure correctamente. Las portadoras TPS y utiliza el Esquema de Modulación por Desplazamiento Diferencial de Fase Binario (DBPSK, *Differential Binary Phase Shift Keying*), se codifican con el código BCH (*Bose-Chaudhuri-Hocquenghen*), siempre están ubicadas en la misma posición como se muestra en la tabla B.9.

Estas portadoras TPS se transmiten en paralelo, ocupando 17 posiciones de cada símbolo COFDM en el estándar 2K y 68 posiciones en el estándar 8K [3].

Tabla B.9 Posición de las portadoras TPS en un símbolo COFDM [9].

Modo 2K	Modo 8K
34 50 209 346 413 569	34 50 209 346 413 569 595 688 790 901 1073 1219 1262
595 688 790 901 1073	1286 1469 1594 1687 1738 1754 1913 2050 2117 2273
1219 1262 1286 1469	2299 2392 2494 2605 2777 2923 2966 2990 3173 3298
1594 1687	3391 3442 3458 3617 3754 3821 3977 4003 4096 4198
	4309 4481 4627 4670 4694 4877 5002 5095 5146 5162
	5321 5458 5525 5681 5707 5800 5902 6013 6185 6331
	6374 6398 6581 6706 6799

La información transmitida en estas portadoras es:

- ✓ El modo de transmisión
- ✓ La tasa de codificación del primer y segundo codificador.
- ✓ Tipo de modulación utilizadas en las portadoras de datos, además del factor α .
- ✓ Tipo de jerarquía
- ✓ Constelación empleada
- ✓ Intervalo de guarda empleado

B.5.8 Modulación COFDM e Inserción del Intervalo de Guarda

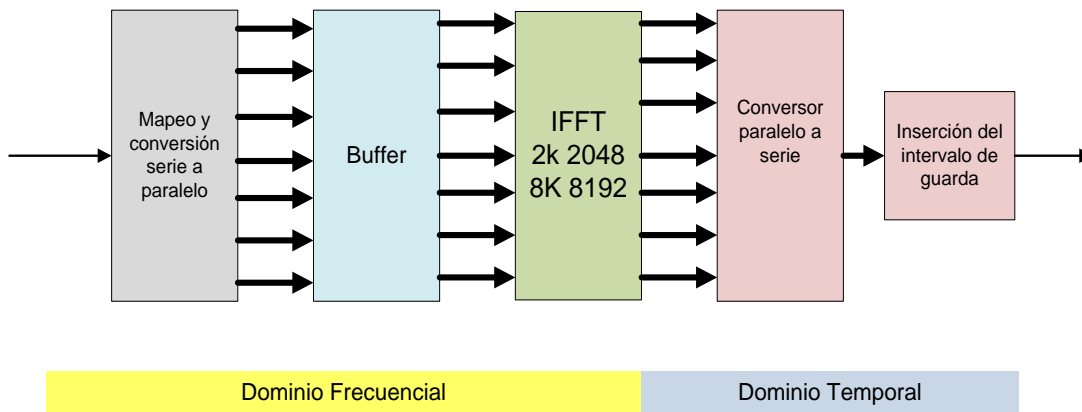


Figura B.30 Diagrama de bloques del modulador COFDM [11].

La señal de entrada al modulador COFDM es un flujo binario continuo. Este flujo se segmenta en símbolos, de acuerdo a la constelación utilizada (QPSK, 16QAM o 64QAM), y se obtiene un mapa de los símbolos, representados ahora por números complejos, que corresponden a la representación de la señal en el dominio de frecuencia. El número de datos de entrada al bloque conversor serie paralelo depende del número de portadoras que transmite el símbolo COFDM en el modo de transmisión utilizado, $N=2048$

(portadoras útiles $K=1705$) en modo 2K y $N=8192$ (portadoras útiles $K=6817$) en modo 8K. El siguiente paso es realizar la transformada inversa de Fourier, el cual, es un algoritmo para convertir un conjunto de portadoras, expresadas en dominio frecuencial, en una secuencia de muestras en el dominio del tiempo; y garantiza que las señales producidas sean ortogonales, requisito indispensable del estándar. Como la señal de entrada al transmisor debe ser un flujo binario en serie, es necesario convertir nuevamente la señal, a una señal en serie. Esta es la señal a transmitir y el proceso se ilustra en el diagrama de bloques de la figura B.30 [11].

A la salida del conversor paralelo a serie, se inserta el intervalo de guarda, llamado también como prefijo cíclico, el cual fortalece más la señal transmitida frente a los ecos, ampliando la duración de los símbolos añadiendo un tiempo Δ denominado intervalo de guarda a la duración útil T_U , de esta forma se modifica la duración total del símbolo, como se describe en la ecuación (B.23) [1].

$$T_S = \Delta + T_U \quad (\text{B.23})$$

De esta manera si la señal se recibe por 2 trayectorias diferentes con un retardo relativo entre ellas, siempre que este retardo no supere el intervalo de guarda, coincidirá en las dos la información contenida dentro del tiempo útil del símbolo de la señal principal. Sin embargo, la inserción de este intervalo de guarda supone una pérdida en la capacidad de transmisión del canal.

El tiempo Δ del intervalo de guarda se mide en fracciones de la duración útil T_U del símbolo, disponiéndose de 4 posibles valores, descritos en la ecuación (B.24).

$$\frac{\Delta}{T_U} = \frac{1}{4}, \frac{1}{8}, \frac{1}{16}, \frac{1}{32} \quad (\text{B.24})$$

La duración de T_U , Δ y T_S para canales de 8Mhz se encuentran descritos en la tabla B.10.

Tabla B.10 Duracion del simbolo activo e intervalos de guarda permitidos para canales de 8MHz [9].

Modo	Modo 8K				Modo 2K			
Intervalo de guarda Δ/T_U	1/4	1/8	1/16	1/32	1/4	1/8	1/16	1/32
Duración del símbolo activo T_U	$\frac{8192 \times T}{896 \mu s}$				$\frac{2048 \times T}{224 \mu s}$			
Duración del intervalo de guarda Δ	$\frac{2048 \times T}{224 \mu s}$	$\frac{1024 \times T}{112 \mu s}$	$\frac{512 \times T}{56 \mu s}$	$\frac{256 \times T}{28 \mu s}$	$\frac{512 \times T}{56 \mu s}$	$\frac{256 \times T}{28 \mu s}$	$\frac{128 \times T}{14 \mu s}$	$\frac{64 \times T}{7 \mu s}$
Duración del símbolo $T_S = \Delta + T_U$	$\frac{10240 \times T}{1120 \mu s}$	$\frac{9216 \times T}{1008 \mu s}$	$\frac{8704 \times T}{952 \mu s}$	$\frac{8448 \times T}{924 \mu s}$	$\frac{2560 \times T}{280 \mu s}$	$\frac{2304 \times T}{252 \mu s}$	$\frac{2176 \times T}{238 \mu s}$	$\frac{2112 \times T}{231 \mu s}$
NOTA: Estos son los valores correspondientes para canales de 8 MHz, los valores para canales de 6 MHz y 7 MHz están dados en las tablas E3 Y E4 de la norma ETSI EN 300 744								

La señal transmitida es organizada en tramas. Cada trama tiene una duración de T_F , y consta de 68 símbolos COFDM.

Los símbolos en una trama COFDM son numerados de 0 a 67. Todos los símbolos contienen datos e información de referencia. Además de los datos transmitidos en una trama COFDM contiene señales piloto dispersas continuas y portadoras TPS.

B.6 ANÁLISIS DE LA CONSTELACIÓN.

El diagrama de constelación, en transmisión de televisión digital, es un esquema en el plano complejo, el cual, presenta la información en dos componentes conocidos como I (componente en fase) y Q (componente en cuadratura). Los puntos de la constelación representan los símbolos COFDM, los cuales deben estar en un cierto punto, pero debido a algunos problemas como ruido e interferencias presentes en el canal de transmisión, la posición de los símbolos se cambian ligeramente.

Un parámetro de calidad en una transmisión digital, para determinar la precisión de la constelación generada por el transmisor es la Relación de Error de Modulación (MER, *Modulation Error Ratio*) y se define a continuación.

B.6.1 Relación de Error de Modulación MER.

La MER se define, para cada portadora de la señal COFDM, como la relación entre la suma de los cuadrados de los módulos de los vectores de los puntos de la constelación ideal y la suma de los cuadrados de los módulos de los vectores de error, como se define en la ecuación (B.25) [12].

$$MER = 10 \log_{10} \left\{ \frac{\sum_{j=1}^N (I_j^2 + Q_j^2)}{\sum_{j=1}^N (\delta I_j^2 + \delta Q_j^2)} \right\} \text{ dB} \quad (\text{B.25})$$

Donde el vector $(I_j + Q_j)$ representa la posición ideal de un símbolo y $(\delta I_j + \delta Q_j)$ el vector de error el cual es definido como la distancia desde la posición ideal hasta la posición del símbolo recibido.

La posición de un símbolo recibido es representada por el vector $(\tilde{I}_j + \tilde{Q}_j)$, el cual se define como la suma del vector ideal y el vector de error [12].

De esta forma entre más alto el nivel del parámetro MER, más precisa es constelación recibida y por tanto más bajos los errores hechos por los receptores en el proceso de demodulación.

BIBLIOGRAFIA

- [1]. M. Fernández, “Implementación de Técnicas de Estimación y Sincronización para Sistemas OFDM, Aplicación directa sobre la implementación de la capa física del estándar DVB –T,” Proyecto final de carrera, Universidad Autónoma de Barcelona, España ,2008. [En línea]. Disponible: <http://www.recercat.net/bitstream/2072/13085/1/Implementaci%C3%B3n+de+t%C3%A9cnicas+de+estimaci%C3%B3n+y+sincronizaci%C3%B3n.pdf>. [Consultado: Mayo 19, 2010].
- [2]. A. Delgado, “Flujos de Programa y de Transporte MPEG-2 Aplicación a DVB,” Trabajo de grado, Universidad Politécnica de Madrid, España, 2001. [En línea]. Disponible: <http://www94.etc.upm.es/tsmpeg2d.pdf>. [Consultado: Mayo 20, 2010].
- [3]. D. Díaz y O. Chacón, “Evaluación de Desempeño del Nivel Físico del Sistema de Modulación COFDM Utilizado en el Estándar DVB-T”. Trabajo de Grado, Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones, Universidad del Cauca. Popayán, Colombia, 2008. [Consultado: Junio 2, 2010].
- [4]. B. Ramírez y C. Alberto, “Modulación por Multiplexadoras Tipo OFDM, La Bases de la Nueva Generación de Transmisión de Información,” Universidad de Medellín, Colombia, 2006. [En línea]. Disponible: <http://redalyc.uaemex.mx/redalyc/pdf/750/75050907.pdf>. [Consultado: Mayo 25, 2010].
- [5]. W. Fischer, *Digital Video and Audio Broadcasting Technology, a Practical Engineering Guide*, 2da ed. Alemania: Springer, 2008, pp. 320.
- [6]. D. Rojas y E. Semanate, “Evaluación y Análisis del Desempeño a Nivel Físico del Estándar de Radiodifusión Digital IBOC,” Trabajo de Grado, Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones, Universidad del Cauca. Popayán, Colombia, 2010. [Consultado: Junio 3, 2010].
- [7]. A. Holguín y L. Horacio, “Levantamiento de Mediciones y Pruebas de Laboratorio para el Estándar de Televisión Digital DVB-T,” Trabajo de Grado, Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador, 2010. [En línea]. Disponible: <http://dspace.epn.edu.ec/bitstream/15000/9110/1/T11545.pdf>. [Consultado: junio, 5, 2010].

- [8]. A. Delgado, "Transmisión de Señales de TV Digital en el Estándar Terreno DVB-T," Trabajo de grado, Universidad Politécnica de Madrid, España, 2002. [En línea]. Disponible: <http://www94.etc.upm.es/dvbt.pdf>. [Consultado: Mayo 25, 2010].
- [9]. European Telecommunications Standards Institute, "Digital Video Broadcasting (DVB): Framing structure, channel coding and modulation for digital terrestrial television," *European Telecommunications Standards Institute*, ETSI EN 300 744. [En línea]. Disponible: http://www.etsi.org/deliver/etsi_en/300700_300799/300744/01.06.01_60/en_300744v010601p.pdf. [Consultado: Abril 15, 2010].
- [10]. C. Pérez, "Modulación COFDM, Transmisión de televisión," Trabajo de grado, Universidad de Cantabria Santander, España, 2004. [En Línea]. Disponible: <http://personales.unican.es/perezvr/pdf/Modulacion%20COFDM.pdf> . [Consultado Junio 18, 2010].
- [11]. C. Ortega, "Diseño de la Radiodifusora Radio Líder 90,1 FM con Tecnología en Base al Standard Norteamericano IBOC (In-Band on Channel)," Trabajo de grado, Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador, 2009. [En Línea]. Disponible: <http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/1640/1/CD-2294.pdf>. [Consultado Junio 18, 2010].
- [12]. European Telecommunications Standards Institute, "Digital Video Broadcasting (DVB): Measurement guidelines for DVB systems," *European Telecommunications Standards Institute*, ETSI ETR 290. [En línea]. Disponible: http://www.etsi.org/deliver/etsi_tr/101200_101299/101290/01.02.01_60/tr_101290v010201p.pdf. [Consultado: Octubre 15, 2010].