

Modulaciones digitales para señales de televisión

Javier Gago Barrio

PID_00196652



Los textos e imágenes publicados en esta obra están sujetos –excepto que se indique lo contrario– a una licencia de Reconocimiento-NoComercial-SinObraDerivada (BY-NC-ND) v.3.0 España de Creative Commons. Podéis copiarlos, distribuirlos y transmitirlos públicamente siempre que citéis el autor y la fuente (FUOC. Fundació para la Universitat Oberta de Catalunya), no hagáis de ellos un uso comercial y ni obra derivada. La licencia completa se puede consultar en <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/es/legalcode.es>

Índice

Introducción.....	5
1. Consideraciones generales sobre modulaciones digitales.....	7
1.1. Características de los medios de propagación	7
1.1.1. Satélite	7
1.1.2. Cable	8
1.1.3. Terrestre	8
1.2. Eficiencia espectral de la modulación en función del número de bits por símbolo	8
1.3. Filtro previo limitador de ancho de banda	9
2. Modulaciones recomendadas por el estándar DVB para la transmisión de televisión digital.....	12
2.1. Modulación QAM para televisión por cable DVB-C	14
2.1.1. Cálculo de la eficiencia espectral y velocidad binaria en DVB-C	15
2.2. Modulación QPSK para televisión por satélite DVB-S	16
2.2.1. Cálculo de la eficiencia espectral y velocidad binaria en DVB-S	16
2.3. Modulación COFDM para televisión digital terrestre (TDT) DVB-T	17
2.3.1. Creación de las tramas	18
2.3.2. Portadoras piloto	18
2.3.3. Transformada inversa de Fourier (IFFT)	19
2.3.4. Inserción del intervalo de guarda para evitar ecos multicamino	20
2.3.5. Conversor D/A	20
2.3.6. Codificación jerárquica	21
2.3.7. Parámetros DVB-T	22
2.3.8. Cálculo de la eficiencia espectral y velocidad binaria en DVB-T	22
Bibliografía.....	25

Introducción

En este módulo se explican las modulaciones digitales que se usan en los diferentes medios de transmisión de televisión digital. En ningún caso nos planteamos explicar toda la teoría de modulación digital, sino partir de una explicación previa general y explicar cómo y por qué se utilizan en los diferentes estándares DVB.

En la figura 1 se indica el bloque de la cadena televisiva que se desarrolla en este módulo:

Referencia bibliográfica

Para un estudio detallado de la modulación digital podéis acudir a las referencias aportadas en la bibliografía o en la asignatura *Sistemas de comunicación*.

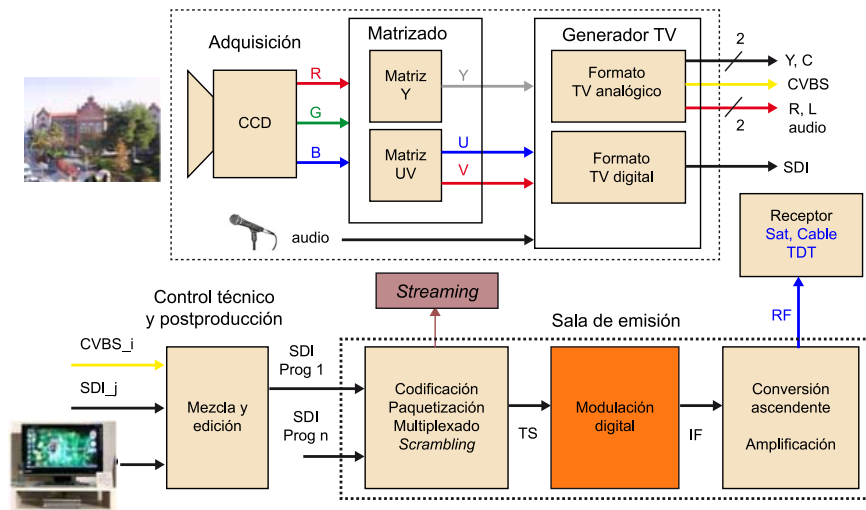


Figura 1. Cadena televisiva. En naranja se indica el bloque que se desarrolla en este módulo

Como se explica en el módulo "Codificación de la señal de televisión", el último bloque para transmitir el *transport stream* por los diferentes canales es el bloque de modulación (QPSK, QAM y OFDM). El proceso conjunto de codificación de canal y modulación digital busca optimizar la eficiencia espectral de la señal, es decir, el número de bits a transmitir en el ancho de banda asignado al medio de transmisión. De esta forma, se han estandarizado tres técnicas de codificación y modulación digital diferentes, una para cada medio de transmisión: satélite, cable y redes terrestres, puesto que cada medio tiene características técnicas y administrativas a tener en cuenta en la elección de la codificación y modulación.

Las modulaciones consideran los valores de los anchos de banda estándares de cada medio de transmisión (27 a 36 MHz en satélite y entre 6 y 8 MHz para cable y transmisión terrestre).

El estándar DVB para transmisión de televisión digital recomienda las características, tanto de las modulaciones digitales como de la codificación, para cada uno de estos tres medios, según el siguiente diagrama de bloques:

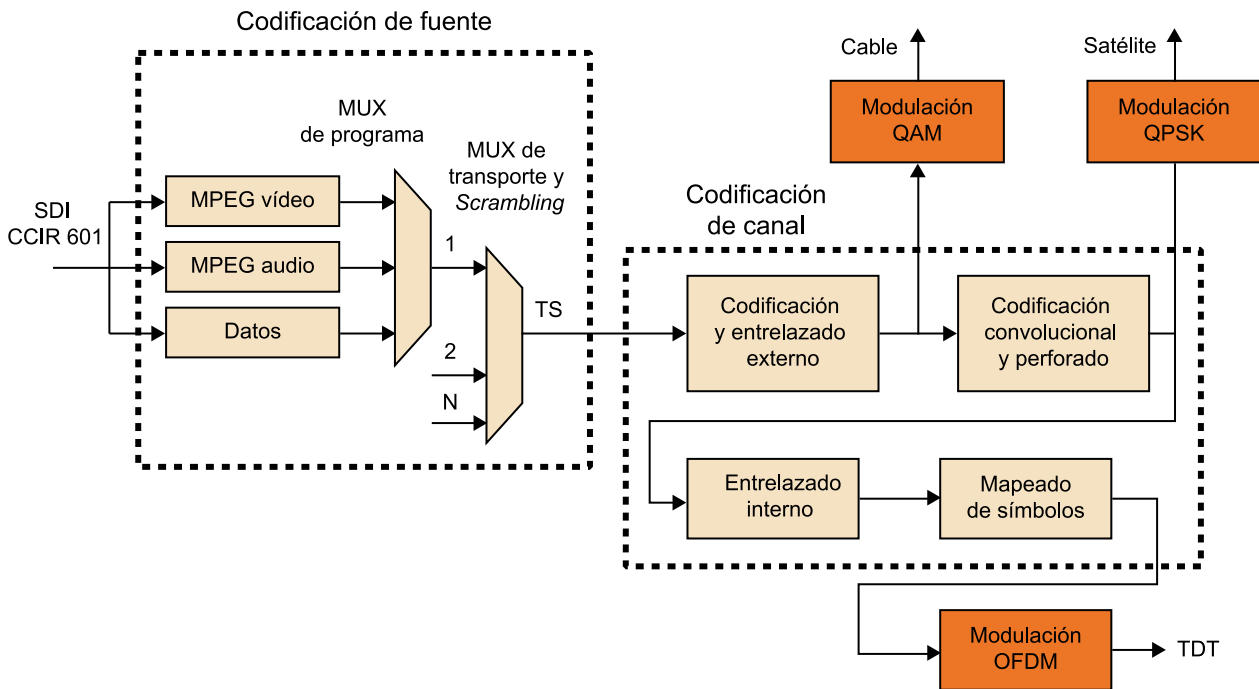


Figura 2. Diagrama de bloques del proceso de codificación y modulación digital según norma DVB

Cada sistema de transmisión precisa de un nivel de codificación de canal diferente antes de la modulación digital y, además, requiere diferentes tipos de modulación. No obstante, en todos los esquemas de modulación existe un paso previo que es el filtrado de Nyquist para limitar en banda la señal digital evitando interferencias intersímbolos (ISI).

La salida del proceso de modulación será una señal analógica modulada en una portadora intermedia en el caso de satélite o cable, o varias portadoras OFDM en el caso terrestre (o TDT). El paso siguiente, que se trabaja en el módulo "Transmisión y recepción de la señal de televisión", es la conversión a canal de radiofrecuencia (RF) y su posterior amplificación para ser transmitida a la red de difusión.

1. Consideraciones generales sobre modulaciones digitales

En este primer apartado se tratan las características de los medios de propagación para entender, posteriormente, el porqué del uso de diferentes modulaciones digitales. Otro aspecto que tratamos es el de la eficiencia espectral, también importante en la transmisión de señal digital, y que sugiere la aparición de los símbolos a partir de los bits para aumentar dicha eficiencia. Y, por último, se analiza el filtro de Nyquist previo a cualquier modulación digital.

1.1. Características de los medios de propagación

La señal de televisión se puede difundir en *streaming* o bien mediante satélite, cable o red terrestre. Para retransmitirla en condiciones se deben conocer las condiciones técnicas y administrativas que exigen cada uno de los medios, y las características de las señales que circulan a través de ellos. En función de estos parámetros se escogerá el tipo de modulación digital aplicado a la señal de televisión.

En concreto interesa conocer factores como: el ancho de banda disponible por canal, la relación señal-ruido (SNR) o portadora-ruido (CNR) de la señal modulada en el canal correspondiente, y la probabilidad de rebotes o efecto multicamino en la transmisión.

A continuación vamos a analizar estos efectos en los tres medios de transmisión tradicionales. Cabe decir que todos los parámetros de modulación y de los sistemas detectores y correctores de error están normalizados en la norma DVB para transmisión de televisión digital. Existe una normativa para cada medio de transmisión: DVB-S (satélite), DVB-C (cable) y DVB-T (terrestre), esta última más conocida como TDT (Televisión Digital Terrestre).

1.1.1. Satélite

Para transmitir la señal por satélite se usan portadoras en la banda de 4 a 6 GHz, por lo que los anchos de banda de los canales pueden ser más elevados que los canales por cable o terrestre, en los que las portadoras son inferiores. El valor normalizado está entre 27 y 36 MHz, ya que la modulación de la señal de televisión analógica se realiza en FM.

Dado que la señal debe recorrer 36.000 km hasta el satélite, la relación SNR o CNR en la recepción es muy pequeña, del orden de 10 dB o menos, y por ese motivo se modula en FM la señal analógica y precisa de mayor código para corregir errores en la señal digital.

La ventaja de la transmisión vía satélite es que es una transmisión limpia, sin rebotes por desadaptación de impedancias ni interferencias por transmisión multicamino.

Para escoger el tipo de modulación digital, se debe tener en cuenta que los subsistemas electrónicos del satélite no están optimizados para la modulación en amplitud.

1.1.2. Cable

La transmisión por cable, igual que la terrestre, requiere portadoras inferiores a 1 GHz y anchos de banda por canal de 6 MHz en USA y 7 u 8 MHz en Europa, ya que en este caso se utiliza modulación en AM con banda lateral vestigial (BLV), por lo tanto, la red de cable está preparada para la modulación en amplitud.

Al contrario que en satélite, la recepción de la señal es buena, con un SNR superior a 30 dB, ya que la distancia recorrida entre repetidores es pequeña, lo que permite la modulación en AM en analógico y la reducción de código corrector de errores en digital. Sin embargo, la transmisión por cable suele estar afectada por los ecos provocados por la desadaptación de impedancias por líneas mal terminadas en la red y este aspecto debe ser tenido en cuenta al escoger el tipo de modulación digital y sus parámetros

1.1.3. Terrestre

La transmisión terrestre es la que presenta más inconvenientes, especialmente si la recepción es móvil con antenas simples (telefonía móvil). Se dispone de un ancho de banda igual que en la transmisión por cable, ya que las portadoras están en la misma banda y la modulación también es AM BLV.

Este tipo de transmisión está condicionada desde el transmisor inicial hasta el receptor final por el problema de las reflexiones multicamino de las señales de RF enviadas por antena, por lo que se requiere de una modulación especial, con mayor protección contra este tipo de errores, que será explicada más adelante.

1.2. Eficiencia espectral de la modulación en función del número de bits por símbolo

La eficiencia espectral de una modulación digital se define como la relación entre el número de bits que contiene el símbolo que se va a enviar por cada Hz de ancho de banda que ocupa la señal.

Una señal digital es una secuencia de '1' y '0' que electrónicamente se representan mediante un voltaje que varía entre un valor alto y un valor bajo de tensión. La modulación digital consiste en generar una senoide, con una fre-

cuencia, amplitud y fase determinadas para el valor actual de la señal digital. En su versión más simple, solo existirán dos senoídes diferentes: una para el valor '1' y otra para el valor '0'; por tanto, solo será necesario variar uno de los parámetros (amplitud, frecuencia o fase) y mantener el resto constantes. La modulación así formada tendrá un ancho de banda alrededor de la frecuencia portadora, que será la frecuencia media de la senoíde.

Una modulación simple transmite un solo bit ('1' o '0') por cada senoíde; es decir, tiene una eficiencia espectral de $1/BW$, ya que para transmitir 1 bit se necesitan BW Hz. Si agrupamos los bits en un símbolo (si cada n bits formamos un símbolo), se aumenta la eficiencia espectral, a base de aumentar la probabilidad de error en la detección del símbolo.

1.3. Filtro previo limitador de ancho de banda

El proceso de modulación digital requiere de un filtrado previo de la señal digital con el fin de limitar el ancho de banda infinito de la misma. El filtro diseñado para tal efecto debe cumplir dos condiciones:

- Limitar el ancho de banda al valor requerido por el canal de comunicación.
- Evitar que la respuesta impulsional del filtro distorsione la propia señal.

El efecto limitador de banda del filtro tiene como contrapartida una respuesta temporal transitoria infinita. Aunque se trate de una respuesta amortiguada en el tiempo, puede interferir con la respuesta permanente, alterando el valor de los bits o símbolos siguientes. Este efecto se llama interferencia inter-símbolos (ISI).

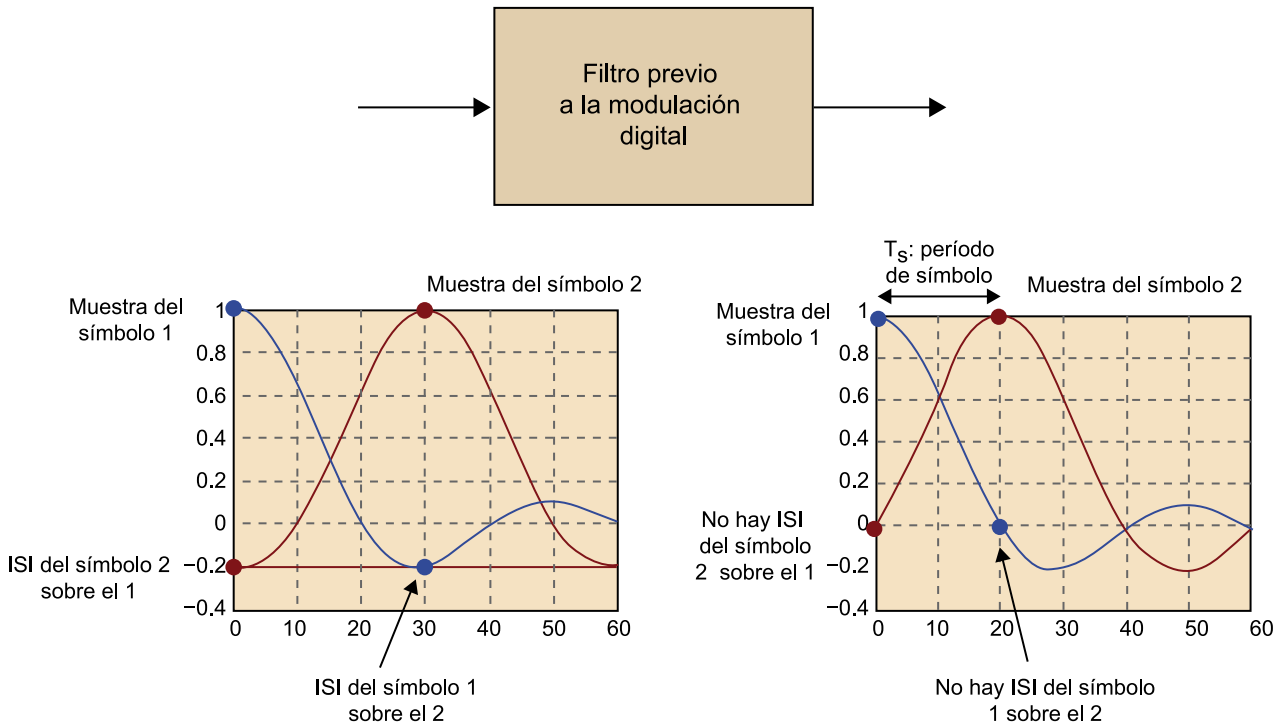


Figura 3. Filtro previo a la modulación digital y efecto de la interferencia intersímbolos (ISI)

Para evitar el efecto ISI se debe cumplir el **primer criterio de Nyquist**: "La respuesta temporal debe pasar por cero en los instantes de muestreo, es decir, en los múltiplos del período de símbolo, T_s ".

Uno de los filtros que cumple este criterio es el llamado *raised cosine filter* ('filtro de coseno alzado'), más comúnmente filtro de Nyquist. Este filtro tiene una respuesta frecuencial que depende del período de símbolo T y de un factor α llamado *roll-off* que puede tomar valores entre 0 y 1.

En la figura 4 se representa la función de transferencia del filtro de Nyquist para tres valores de α :

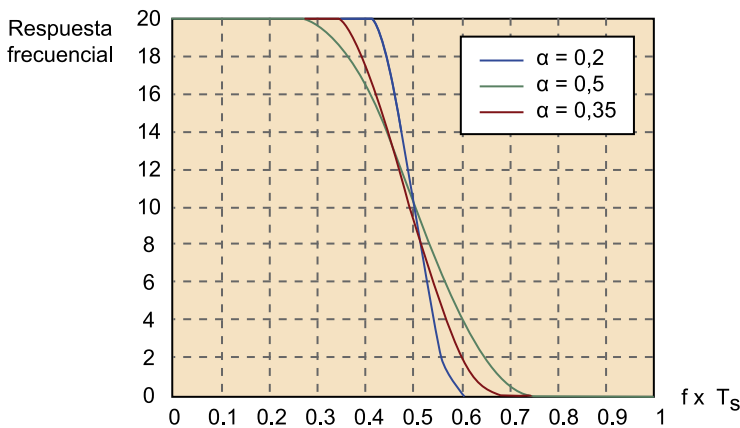


Figura 4. Función de transferencia del filtro de Nyquist para tres valores del factor *roll-off*

La figura siguiente muestra la respuesta temporal de estos tres filtros de Nyquist:

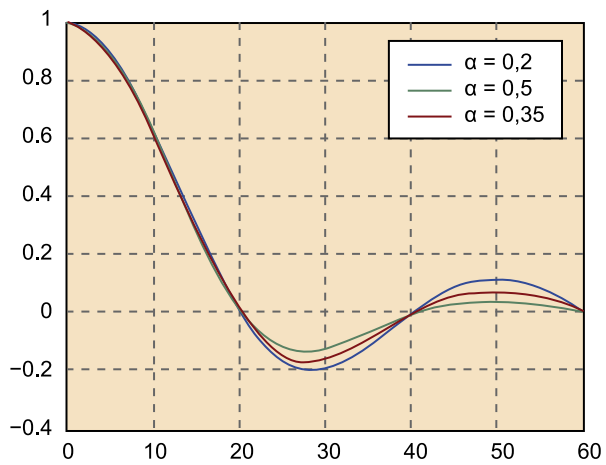


Figura 5. Respuesta temporal del filtro de Nyquist para tres valores del factor *roll-off*

Se puede comprobar que en los instantes múltiplos del período de símbolo T_s la respuesta temporal vale 0, por lo que no hay interferencias intersímbolos (ISI).

El ancho de banda de transmisión cuando se usan este tipo de filtros viene dado por la siguiente expresión:

$$B = \frac{1+\alpha}{2 \cdot T_s} \quad (1)$$

2. Modulaciones recomendadas por el estándar DVB para la transmisión de televisión digital

Recordemos que el DVB es el organismo designado para regular los procedimientos de transmisión de la señal de televisión digital y sus normas son aceptadas por casi todos los países y continentes a excepción de Estados Unidos y Japón, donde coexisten con otros sistemas.

Las normas DVB se basan en el estándar MPEG para la compresión, multiplexación y sincronización de las señales de audio y vídeo. El estándar DVB define, además, los tipos de modulación y los códigos de corrección de error y los mecanismos de acceso condicional a los servicios y programas. El DVB ha elaborado unos estándares diferentes para cada medio de radiodifusión: el estándar para transmisión por satélite se llama DVB-S, el de transmisión por cable se llama DVB-C, y el de transmisión terrestre, DVB-T, más conocido en Europa como TDT.

Bloque	Parámetro	DVB-C	DVB-S	DVB-T
Fuente	Codificación de vídeo	MPEG-2 vídeo (MP@ML)		
	Codificación de audio	MPEG-2 audio (capa 2)		
	Multiplexado	MPEG-2 capa de sistema		
	<i>Scrambling</i>	DVB-CSA v3 128 bits		
Canal	Paquete transporte	188 bytes		
	Aleatorizador	$1+D^{14}+D^{15}$		
	Código externo	Reed-Solomon (204, 188, M = 8 bits)		
	Entrelazado	Fourny, profundidad D = 12		
	Código interno	No hay	Continuo $r_c = 1/2, 2/3, 3/4, 5/6$ o $7/8$	
Modulación	Factor <i>roll-off</i>	15%	35%	-
	Modulación	QAM 16 a 64	QPSK	OFDM 2K/8K
	BW canal	8 MHz (6 ó 7)	27 a 36 MHz	6, 7 u 8 MHz

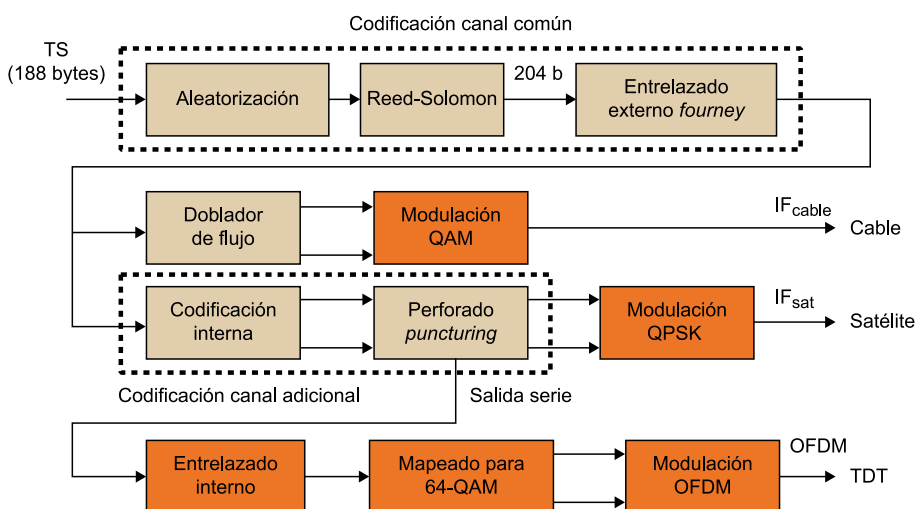
Características de la normativa DVB para señales de televisión

Por las características diferenciadas de cada medio de propagación ya comentadas, el tipo de modulación recomendado en DVB-S, DVB-C y DVB-T es diferente:

- **La transmisión por satélite**, debido a que la recepción es muy débil y con ruido muy significativo, precisa de la modulación más robusta a ruido: la QPSK.

Como los equipos de transmisión por satélite usan anchos de banda elevados (36 MHz) para poder transmitir la televisión analógica modulada en FM, pueden soportar transmisiones digitales de baja eficiencia espectral, como la QPSK, que precisen de un mayor ancho de banda para una misma velocidad de transmisión.
- **La transmisión por cable** se puede permitir ahorrar en ancho de banda, usando un ancho de canal analógico (6, 7 u 8 MHz), a base de utilizar una modulación con mayor eficiencia espectral, como las QAM. En concreto se usan 16-QAM, 32-QAM o 64-QAM. Los requerimientos de SNR necesarios para este tipo de modulaciones no son impedimento en este tipo de transmisión, que puede permitirse regenerar la señal en puntos estratégicos de la red.
- **La transmisión terrestre** es la que presenta más problemas debido a las reflexiones multicamino de la propagación electromagnética enviada por la antena, motivo por el cual no fue posible utilizarla hasta que no se desarrolló con éxito la modulación OFDM, tras años de funcionamiento de la televisión digital por satélite y por cable. Aunque el DVB-T estándar se usa principalmente en Europa, en canales de 8 MHz en UHF, también está preparado para canales de 7 MHz (VHF Europa, Australia...) y 6 MHz (América, Japón, Corea...). También ha sido diseñado para coexistir con transmisiones de televisión analógica gracias a la buena protección de interferencias contra canales adyacentes o en el propio canal.

Cada sistema de transmisión requiere de una codificación de canal y una modulación digital propia. A continuación se presenta el diagrama de bloques de los tres sistemas DVB:



Nota

Los procesos de codificación de canal están explicados con detalle en el módulo "Codificación de la señal de televisión", lo que se detalla a continuación son los procesos de modulación digital.

Figura 6. Diagrama de bloques de la codificación de canal y la modulación digital en DVB

2.1. Modulación QAM para televisión por cable DVB-C

La modulación para DVB-C requiere de tres niveles de codificación de canal previos: la dispersión de energía, el Reed-Solomon (RS) y el entrelazado externo de Fourny. El mapeado de los símbolos que surgen de este último es una simple ramificación en dos flujos que se corresponden con las señales I y Q que se usarán para la modulación en cuadratura QAM correspondiente:

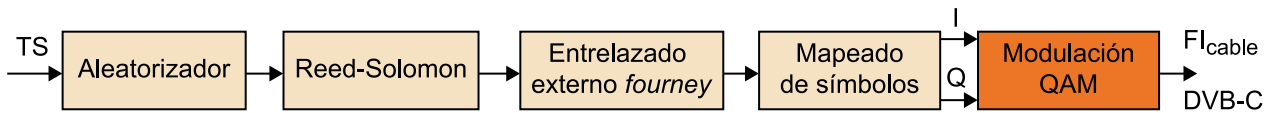


Figura 7. Diagrama de bloques de la codificación de canal y la modulación digital en DVB-C

Las modulaciones QAM son modulaciones de amplitud en cuadratura que se basan en dividir el flujo de datos en dos flujos paralelos (I y Q) y agrupar un conjunto de bits en un solo símbolo de canal. El flujo I se modula con una portadora y el Q con la misma portadora desfasada $\pi/2$. Los diferentes símbolos se corresponden con diferentes valores de amplitud, por lo que la señal de salida QAM es una senoide que puede tener diferentes valores discretos de amplitud y fase.

El número de estados totales, es decir, la suma de los estados de I y de Q da nombre a la modulación.

Ejemplo

Si hay un bit para I y otro para Q, en total hay 2 bits y, por tanto, 4 estados diferentes (2 estados para I y 2 para Q): modulación es 4-QAM.

Esta es la modulación en cuadratura más sencilla, y también se denomina modulación QPSK.

Bits de I/Q	Bits/símbolo	Núm. estados	Modulación
1	2	4	4-QAM o QPSK
2	4	16	16-QAM
3	8	64	64-QAM
4	16	256	256-QAM

Principales características de modulaciones QAM

La transmisión por cable utiliza modulaciones QAM de un número de bits más elevado que la transmisión por satélite, desde la 16-QAM hasta la 256-QAM. A modo de ejemplo, con 64-QAM consigue velocidades de 38,5 Mbps en canales de 8 MHz. Los canales suelen tener un ancho de banda de 8 MHz, aunque también existe la posibilidad de 7 MHz. El factor *roll-off* del filtro de entrada es de $\alpha = 0,15$.

2.1.1. Cálculo de la eficiencia espectral y velocidad binaria en DVB-C

A partir de los datos del apartado anterior, se puede calcular la eficiencia espectral de la transmisión por cable.

Supongamos un canal de transmisión europeo de 8 MHz de ancho de banda. La ecuación (2) da el valor del ancho de banda de la señal modulada digitalmente, pero hay que tener en cuenta que cuando se vuelve a modular en amplitud para ubicarla en el canal correspondiente, el ancho de banda se dobla porque aparecen dos bandas laterales alrededor de la portadora. Por tanto, el ancho de banda que debemos considerar es B_{canal} :

$$B_{\text{canal}} = B_c = \frac{1+\alpha}{T_S} \quad (2)$$

siendo T_S el tiempo de símbolo.

Con los datos de la modulación y del ancho de banda del canal dado, la frecuencia del símbolo vale:

$$f_S = \frac{1}{T_S} = \frac{B_c}{1+\alpha} = \frac{8 \cdot 10^6}{1+0.15} \approx 7\text{MHz} \quad (3)$$

Oficialmente se toma un valor de 6.875 MHz. Lo normal en las redes europeas de calidad es utilizar 64-QAM, pero el peor caso en cuanto a velocidad binaria se refiere, sería usar una 16-QAM. En este último caso, el símbolo es de 4 bits y, por tanto, la velocidad binaria bruta será:

$$R_b = 4 \cdot f_S = 4 \cdot 6.875 = 27.5\text{Mbps} \quad (4)$$

La eficiencia espectral bruta (sin contar con el código Reed-Solomon) valdrá:

$$\frac{27.5}{8} = 3,437 \text{ bps por Hz} \quad (5)$$

Para calcular la velocidad binaria útil, es decir, la de los bits de información excluyendo los bits añadidos para corregir errores, se debe multiplicar por el factor Reed-Solomon (r_{RS}), que vale 188/204, ya que el código Reed-Solomon transforma paquetes de 188 bytes en 204 bytes. Por tanto, la velocidad binaria útil vale:

$$R_u = R_b \cdot r_{RS} = 27.5 \cdot 188/204 = 25.34\text{Mbps} \quad (6)$$

Y la eficiencia espectral útil vale:

$$\frac{25,34}{8} = 3,16 \text{ bps por Hz} \quad (7)$$

En el mejor caso, la transmisión mediante 64-QAM es posible, y los valores de flujo y eficiencia brutos y útiles se multiplican por 6/4, ya que tenemos 6 bits por símbolo, frente a 4 bits por símbolo en 16-QAM.

2.2. Modulación QPSK para televisión por satélite DVB-S

La modulación para transmisión por satélite DVB-S es la QPSK o 4-QAM. Requiere de un nivel de codificación de canal extra respecto a DVB-C debido a que el medio es más ruidoso. Se trata de una codificación interna seguida de un proceso de perforado que ofrece a la salida dos flujos digitales en paralelo que se usarán como señales I y Q para la modulación QPSK.

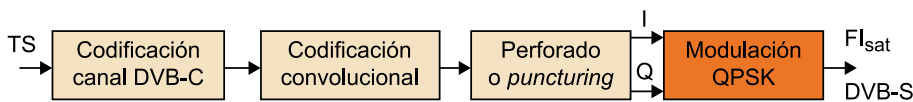


Figura 8. Diagrama de bloques de la codificación de canal y la modulación digital en DVB-S

La señal resultante de la modulación QPSK se ubica en un canal con un ancho de banda entre 26 y 54 MHz. El factor *roll-off* del filtro de entrada vale $\alpha = 0.35$.

2.2.1. Cálculo de la eficiencia espectral y velocidad binaria en DVB-S

Con los datos de la modulación y del ancho de banda del canal dado, la frecuencia del símbolo vale:

$$f_s = \frac{1}{T_s} = \frac{B_c}{1+\alpha} = \frac{33 \cdot 10^6}{1+0.35} = 24,4 \text{ MHz} \quad (8)$$

Como la modulación QPSK usa 2 bits por símbolo, el flujo binario bruto será:

$$R_b = 2 \cdot f_s = 48,8 \text{ Mbps} \quad (9)$$

Para calcular la velocidad binaria útil se debe multiplicar por el factor Reed-Solomon (r_{RS}) y por el factor *code rate* del código interno (r_c , codificación convolucional o continua). En el caso peor, con una SNR mínima, para garantizar un servicio aceptable ($BER < 10^{-10}$), el factor r_c del código convolutivo será 1/2. Con estos datos, la velocidad binaria útil, o flujo útil, vale:

$$R_u = R_b \cdot r_{RS} \cdot r_c = 48,8 \cdot 188/204 \cdot 1/2 = 22,48 \text{ Mbps} \quad (10)$$

Y la eficiencia espectral útil vale:

$$\frac{22,48}{33} = 0,68 \text{ bps por Hz} \quad (11)$$

Para hacer coincidir la R_u del satélite con la del cable, se suele aumentar la capacidad del canal aumentando la frecuencia de símbolo de 24,4 MHz a 27,5 MHz. Aunque de esta forma se entra en la banda de atenuación del filtro de entrada, la señal solo se atenúa 1dB y no se incrementa el número de errores apreciablemente. En este caso la velocidad binaria útil será:

$$R_u = R_b \cdot r_{RS} \cdot r_c = 55 \cdot 188/204 \cdot 1/2 = 25.34 \text{ Mbps} \quad (12)$$

Y la eficiencia espectral útil valdrá:

$$\frac{25,34}{33} = 0,76 \text{ bps por Hz} \quad (13)$$

Es decir, se consigue el mismo flujo útil que con transmisión por cable, pero con más ancho de banda, es decir, con menor eficiencia espectral.

En caso de tener una máxima SNR, el coeficiente r_c del código interno puede aumentar hasta el valor 7/8. Por tanto, los parámetros de velocidad y eficiencia espectral aumentan proporcionalmente, es decir, se multiplican por 7/4 (resultado de cambiar el r_c de 1/2 a 7/8).

2.3. Modulación COFDM para televisión digital terrestre (TDT) DVB-T

A diferencia de las modulaciones QAM que solo disponen de una portadora para enviar la información, la modulación COFDM (*coded orthogonal frequency division multiplex*) requiere múltiples portadoras para enviar los bits de las señales I y Q también multiplexados en frecuencia. Los símbolos tienen una duración T_U y cada uno se modula en QAM sobre las múltiples portadoras (cada una con una modulación QAM diferente). Se escoge un alto número de portadoras, N , cuyas frecuencias están separadas $1/T_U$ para evitar las interferencias en el espectro frecuencial de una portadora sobre las portadoras adyacentes: esta es la condición de ortogonalidad.

En la práctica, las señales procedentes de las reflexiones multicaminos se suman a la señal directa y se pierde la condición de ortogonalidad, apareciendo entonces interferencias inter-símbolos. Para evitar este efecto no deseado se añade un **intervalo de seguridad**, Δ , al período de símbolo, T_U , durante el cual, si se produce una nueva recepción, el receptor la rechaza automáticamente. Por tanto, el valor final del período de símbolo T_S aumenta al valor $T_S = T_U + \Delta$. El intervalo de seguridad es igual o inferior a $T_U/4$.

La modulación COFDM para DVB-T requiere de dos niveles de codificación de canal extra respecto a DVB-S, que se realizan a partir del flujo serie del proceso de perforado y consisten en un entrelazado interno y un mapeado de símbolos OFDM:

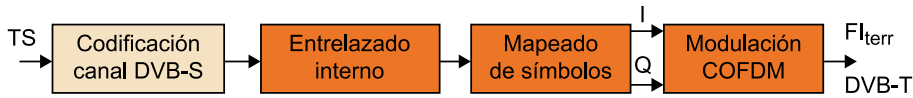


Figura 9. Diagrama de bloques de la codificación de canal y la modulación digital en DVB-T

El entrelazado interno es un *interleaving* a nivel de bit formando matrices de 126 palabras de 2, 4 o 6 bits, dependiendo de la modulación escogida para cada portadora (QPSK, 16-QAM o 64-QAM).

El mapeado de símbolos OFDM consiste en la agrupación de las matrices anteriores en grupos de 12 (modo 2K) o 48 (modo 8K) para formar los símbolos OFDM de 1.512×2 bits (modo 2K en QPSK) hasta 6.048×6 bits (modo 8K en 64-QAM). Estos símbolos modularán las 1.512 o 6.048 portadoras útiles que se definen más adelante. La salida del mapeado de símbolos es un flujo paralelo de datos que representan a las señales I y Q usadas para la modulación QAM de cada una de las portadoras del proceso COFDM.

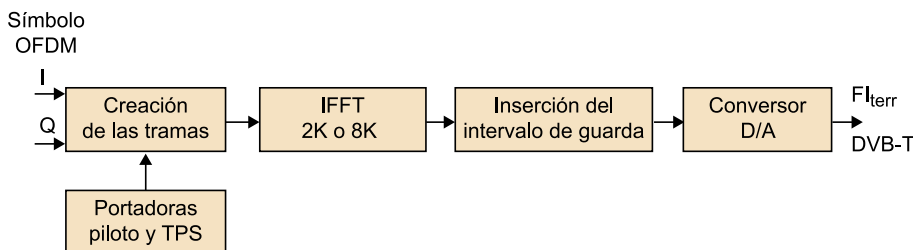


Figura 10. Diagrama de bloques de la modulación OFDM en DVB-T

A continuación se explica brevemente la función de cada uno de los bloques.

2.3.1. Creación de las tramas

El flujo DVB-T se organiza en tramas formadas por 68 símbolos: cuatro tramas consecutivas forman una supertrama de 272 símbolos, que permiten la transmisión de un número entero de paquetes con protección Reed-Solomon (RS) de 204 bytes.

2.3.2. Portadoras piloto

Para ayudar al receptor a adquirir la señal e informarle de los parámetros de modulación, la señal OFDM incluye portadoras sin modular por bits de información. Hay tres tipos de portadoras:

- **Portadoras piloto continuas** (*continual pilots*): para la sincronización del receptor en frecuencia y fase.
- **Portadoras piloto dispersas** (*scattered pilots*): para la regeneración del canal en amplitud y fase.
- **Portadoras TPS** (*transmission parameter signalling*): con información del modo transmitido.

Las portadoras piloto continuas están en posiciones fijas, las portadoras piloto dispersas se desplazan por tres posiciones en cada nuevo símbolo y ambas tienen un nivel superior de potencia a las portadoras TPS. Las continuas y dispersas son moduladas por una secuencia pseudoaleatoria, que permite la sincronización y la evaluación del canal (estimación de la alteración del canal debido a múltiples trayectos).

Las portadoras TPS señalizan los parámetros de transmisión. Se transmiten a muy baja velocidad mediante una modulación tan robusta como la BPSK diferencial (1 bit/símbolo), lo que permite una adquisición acelerada de la señal y una rápida respuesta del receptor ante un cambio eventual en los parámetros. Todas las TPS transmiten simultáneamente la misma información y esta redundancia permite decodificar la información TPS aunque la señal no cumpla las mínimas condiciones para ser decodificada. La información TPS se transmite una vez por trama y como la trama contiene 68 símbolos, la información TPS ocupa 68 bits.

2.3.3. Transformada inversa de Fourier (IFFT)

Debido al alto número de portadoras utilizadas, estas no se modulan individualmente sino que el proceso se realiza a través de la transformada inversa de Fourier (IFFT) en 2.048 puntos (modo 2K) o 8.192 (modo 8K). La siguiente figura presenta este algoritmo y se puede observar cómo se asigna el símbolo s_k a la portadora f_k , y cómo se suman todas las portadoras para obtener la señal final OFDM. Previamente a la modulación, el símbolo se filtra con un prefiltro $h_s(t)$ que limita temporalmente la duración del símbolo a su período útil, T_U . Este prefiltro es una ventana temporal rectangular centrada en $T_U/2$ y de ancho T_U .

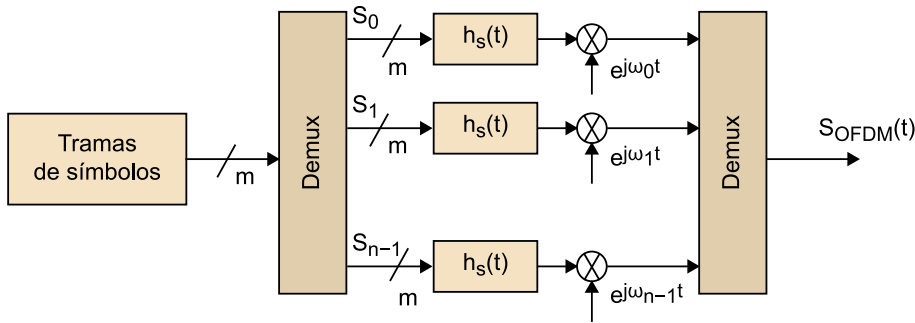


Figura 11. Diagrama de bloques de la IFFT para crear las multiplexoras moduladas OFDM

A continuación presentamos la ecuación matemática de dicho algoritmo y se puede apreciar que se trata del algoritmo de cálculo de una transformada inversa de Fourier (IFFT):

$$s_{OFDM}(t) = \sum_{k=0}^{n-1} s_k \cdot h_s(t) \cdot e^{j\omega_k t} \quad (14)$$

$$\omega_k = \frac{2 \cdot \pi \cdot k}{T_U} \quad (15)$$

$$h_s(t) = \text{rect}\left(\frac{t - \frac{T_U}{2}}{T_U}\right) \quad (16)$$

Lectura de las ecuaciones

T_U : período de símbolo útil (sin incluir el intervalo de guarda)
 ω_k : frecuencia angular de la portadora k
 $h_s(t)$: respuesta rectangular del prefiltro de la modulación de cada portadora

2.3.4. Inserción del intervalo de guarda para evitar ecos multicamino

En el modo 8K, la larga duración del símbolo, 896 μ s en canales de 8 MHz, combinada con el máximo intervalo de guarda, 224 μ s en caso $T_S/4$, permite una recepción satisfactoria en presencia de ecos multicamino. Esto permite desplegar redes de transmisión terrestre emitiendo por un solo canal, incluso a decenas de kilómetros de distancia del emisor.

El espaciado entre frecuencias del modo 2K, que es 4 veces superior al del modo 8K, recorta las distancias máximas entre emisor y receptor en un factor de 4 y, por el contrario, le afecta 4 veces menos el efecto Doppler en la recepción móvil, permitiendo velocidades del receptor móvil de hasta 250 km/h en los canales más altos de la banda de UHF en modo 2K, mientras que en modo 8K el máximo es 4 veces menor.

2.3.5. Conversor D/A

La señal de salida del modulador COFDM debe ser una señal analógica que se corresponda con la suma de todas las portadoras, cada una de ellas modulada en diferentes tipos de QAM con sus símbolos correspondientes. Estas porta-

doras tienen valores alrededor de un valor central, que es el de la frecuencia intermedia (F_I) de 36,15 MHz, y la diferencia entre la mayor y la menor es de 8 MHz (ancho de banda del canal).

Para ello, se debe convertir la señal digital que se obtiene a la salida del bloque IFFT a señal analógica con un convertidor D/A adecuado.

2.3.6. Codificación jerárquica

El DVB-T permite también una codificación QAM no uniforme caracterizada por una mayor distancia entre estados adyacentes pertenecientes a cuadrantes diferentes que entre estados adyacentes del mismo cuadrante, tal como se observa en la constelación de la siguiente figura:

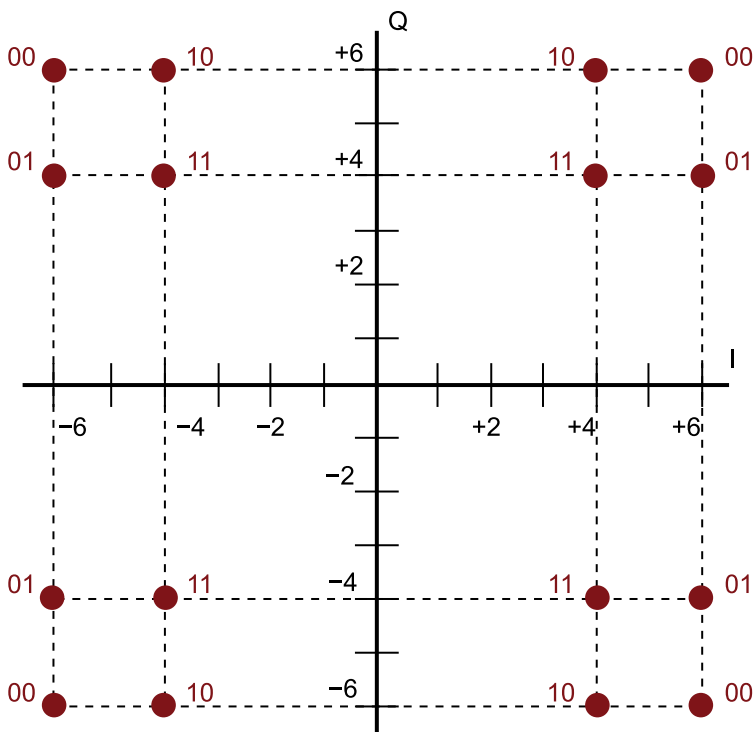


Figura 12. Constelación de una modulación 16-QAM no uniforme

Con la modulación no uniforme se puede enviar simultáneamente dos tipos de señales con prioridad de una sobre la otra: los 2 bits de mayor peso se modulan en QPSK y transportan el programa de mayor prioridad, el resto de bits se modulan con una QAM menos sólida y constituyen el programa de menor prioridad que requiere condiciones de mejor SNR o CNR (relación portadora-ruido). El flujo prioritario es muy robusto pero la velocidad binaria es menor que la del flujo secundario, que, por el contrario, es menos robusto a errores.

Esta codificación con prioridad se puede aplicar a la transmisión de diferentes programas por el mismo canal, que pueden ser recibidos en diferentes condiciones de ruido. También se puede enviar el mismo programa que puede ser reproducido con distinta definición (SD o HD) en función de las condiciones de recepción.

2.3.7. Parámetros DVB-T

Los parámetros de los modos 2K y 8K se resumen en la siguiente tabla:

Parámetro	8k/8MHz	8k/7MHz	2k/8MHz	2k/7MHz
N.º de portadoras total N'	6817 (0 a 6816)		1705 (0 a 1704)	
N.º de portadoras útiles (datos)	6048		1512	
SPC (portadoras dispersas)	524		131	
CPC (portadoras continuas)	177		45	
TPS (portadoras de señalización)	68		17	
Duración del símbolo útil T_S	896 μ s	1024 μ s	224 μ s	256 μ s
Espaciado de las portadoras $1/T_S$	1116.07 Hz	976.65 Hz	4464.28 Hz	3906.25 Hz
Diferencia entre portadoras extremas	7.61 MHz	6.66 MHz	7.61 MHz	6.66 MHz
Intervalo de seguridad Δ	$T_S/4$, $T_S/8$, $T_S/16$ o $T_S/32$			
Modulación de las portadoras	QPSK, 16-QAM o 64-QAM			
Modos jerárquicos	$\alpha=1$ o $\alpha=2$ o $\alpha=4$			

Parámetros de la OFDM terrestre en modo 8k y 2k

2.3.8. Cálculo de la eficiencia espectral y velocidad binaria en DVB-T

El flujo binario bruto en OFDM se calcula como:

$$R_b = f_s \cdot n_{bp} \cdot N_p \quad (17)$$

La velocidad binaria útil será:

$$R_u = R_b \cdot r_{RS} \cdot r_c = R_b \cdot r_c \cdot 188/204 \quad (18)$$

Ejemplo

Supongamos una transmisión OFDM con los siguientes datos:

- 8MHz de canal
- Modo 8K
- Modulación 64-QAM ($64 = 2^6$, es decir, 6 bits por símbolo)
- Intervalo de guarda $1/4$
- factor *code rate* del código convolutivo $r_c=2/3$

Lectura de la fórmula

f_s : frecuencia de los símbolos (símbolos/seg)
 $f_s = 1/T_S$
 T_S : duración del símbolo
 n_{bp} : número de bits por portadora
 N_p : número de portadoras activas

Los datos para calcular los flujos serán:

- Duración del símbolo: $T_S = T_U + \Delta = 1120\mu\text{s}$
- Frecuencia de los símbolos: $f_S = 1/T_S = 892,857$
- Número de bits por portadora (64-QAM): $n_{bp} = 6$
- Número de portadoras activas: $N_p = 6048$

Con estos datos, el flujo bruto vale:

$$R_b = f_S \cdot n_{bp} \cdot N_p = 892,857 \cdot 6 \cdot 6048 = 32,4\text{Mbps} \quad (19)$$

Y el flujo útil:

$$R_u = R_b \cdot r_c \cdot 188/204 = 32,4 \cdot 2/3 \cdot 188/204 = 19,9\text{Mbps} \quad (20)$$

Con esta velocidad, típica en una transmisión DVB-T, dependiendo de la relación entre calidad de imagen y número de programas a enviar, se podría transmitir en el mismo multiplex de 4 a 6 programas de televisión.

Y la eficiencia espectral útil valdrá:

$$\frac{19,9 \text{ Mbps}}{8 \text{ MHz}} = 2,49 \text{ bps por Hz} \quad (21)$$

Bibliografía

Benoit, Hervé (1997). *Digital Television MPEG-1, MPEG-2 and principles of the DVB system* (cap. 1, pág. 3-15). Focal Press.

