

Modulación Digital

Aplicación a la Televisión Digital en DVB

Sotelo, Rafael

Profesor de Televisión y Multimedia.- Universidad de Montevideo

Durán, Diego

Profesor de Modulación de Señales.- Universidad de Montevideo

Resumen

La modulación digital luego de una etapa de desarrollo teórico, ha irrumpido en la realidad haciendo posibles innumerables nuevos servicios que brindan las telecomunicaciones, particularmente, en el campo de la televisión digital.

Recientemente en nuestro país se ha adoptado la norma DVB para la transmisión de televisión digital terrestre abierta.

En este artículo describimos la modulación digital utilizada por DVB en sus versiones de transmisión por satélite, terrestre y por cable, poniendo énfasis en aspectos particulares que afectan a su implantación en Uruguay.

Introducción

La Televisión Digital se diferencia de la analógica básicamente en que las señales de video y audio están digitalizadas y como tales son transmitidas utilizando sistemas de modulación digitales.

Hay una variedad muy grande de estos esquemas de modulación en uso y su variedad depende principalmente de tres factores:

- El medio de transmisión
 - Satélite
 - Terrestre
 - Cable
- La aplicación o servicio
- El país de implantación

Incluimos como *medio de transmisión* los antedichos debido a que son los tradicionalmente ligados a la industria de la televisión, y donde la televisión digital *sustituye* a la analógica. En estos medios nos focalizaremos.

No forman parte de este artículo, por lo tanto, la televisión para teléfonos móviles ni vía ADSL, ya que se ofrecen sobre otro sistema de telecomunicaciones y la modulación que utilizan depende de ese sistema.

DVB, Digital Video Broadcasting (www.dvb.org) es la norma de televisión digital terrestre abierta de origen europeo adoptada en Uruguay recientemente. DVB tiene una familia de normas según el medio de transmisión, y las describiremos en este artículo.

DVB define un esquema de modulación para transmisión vía microondas pero no lo abordaremos por ser similar a los que sí están incluidos aquí y por ser de menor difusión. [1]

Existen otras normas como ATSC de origen americano, o ISDB de origen japonés, que tampoco tratamos aquí para focalizarnos en las que están en uso en el país.

La *aplicación o servicio* influye porque será distinta la modulación a utilizar según lo que quiera ofrecerse. Calidad estándar o alta definición, uno o múltiples canales, soporte de receptores móviles o no, etc. Estos objetivos, junto con el ancho de banda y ruido del medio de transmisión, colaboran en la definición del método de modulación.

El *país de implantación* lo mencionamos porque encontramos distintas normas según el país o región. Cada estado puede definir los estándares de televisión digital a utilizarse. Y lamentablemente veremos que existe más de uno. Existía la esperanza que al comenzar una nueva era, como es la de la televisión digital, no se cometiera el mismo error que se realizó con la televisión analógica de tener distintos estándares de televisión.

Comenzaremos la exposición clasificando a partir de los distintos medios de transmisión. En todos los casos el estándar de video digital utilizado es el MPEG-2 definido en la ISO/IEC 13818-1. Además de hablar de modulación deberemos describir el tratamiento que se hace a la trama MPEG-2 antes de enviarla al modulador. Describiremos la codificación de canal.

Las principales ventajas de los sistemas digitales frente a los analógicos es que son más estables, presentan una gran flexibilidad hacia cambios en el sistema y garantizan una reproducción extremadamente confiable. A esto se le suma un menor consumo de energía, menor costo y una mejor calidad y seguridad en la reproducción.

La modulación digital consiste en modular la amplitud (ASK), la frecuencia (FSK) o la fase (PSK) de una onda senoidal mediante una señal digital. Los principales tipos de modulación utilizados en televisión digital y en otras aplicaciones digitales son Q-PSK, QAM, 16-QAM, 64-QAM y 256-QAM.

Además DVB-T utiliza otra técnica de modulación llamada OFDM que transmite datos en paralelo utilizando un gran número de portadoras, con suficiente separación de banda como para que estas sean ortogonales, brindándole esto una gran robustez frente a la interferencia debido al multitrayecto.

Entre otras aplicaciones que utilizan OFDM se destacan el ADSL y los sistemas de transmisión inalámbricos WIMAX. Veremos que la modulación digital en cualquiera de los casos representa una mejora sustantiva respecto a la modulación analógica de televisión debido a que incorpora corrección de errores, uso más eficiente del espectro, disminuye potencias de transmisión, permite múltiples canales de televisión estándar, transmisión de señales de alta definición, es menos inmune a interferencias de canales adyacentes y de co-canales.

Satélite: DVB-S

En transmisión de televisión por satélite hay prácticamente un estándar utilizado: DVB-S.

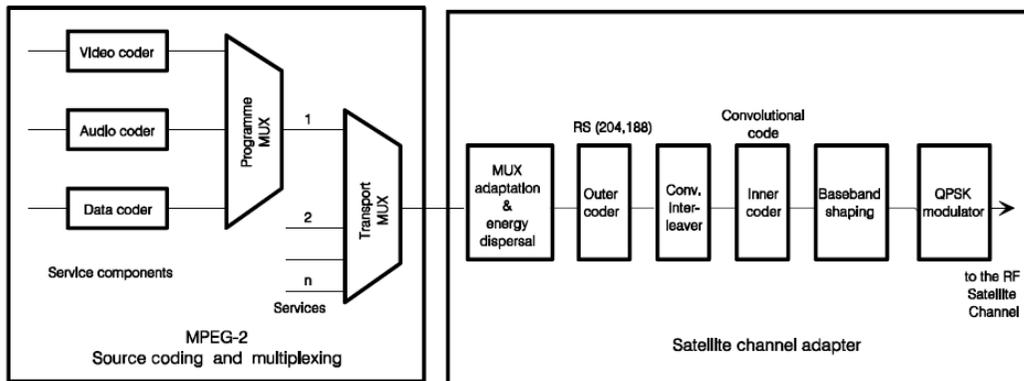
Podemos ver la definición de esta modulación en la norma ETSI [2] y la más reciente [3].

La televisión por satélite fue la primera aplicación en transmisión de televisión digital. La motivación principal resultó la reducción de los anchos de banda debido a lo caro de este recurso en un satélite.

La transmisión a utilizar es QPSK (*quadriphase shift keying*). El ancho de banda utilizado será función del bitrate del multiplex MPEG-2 y de la robustez que se pretenda.

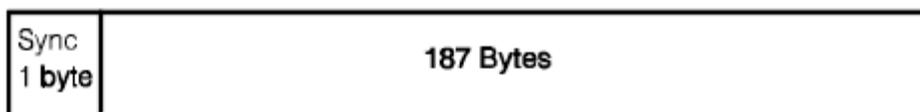
Si la señal recibida está sobre los umbrales de C/N y C/I , la técnica de "Forward Error Correction" (FEC) garantiza que la calidad de salida será "Quasi Error Free" (QEF). QEF significa menos de un error por hora de transmisión, correspondiendo a un "Bit Error Rate" (BER) de 10^{-10} to 10^{-11} a la entrada del demultiplexor MPEG-2.

La siguiente figura ilustra las distintas etapas que atraviesan los datos antes de ser enviados al satélite.



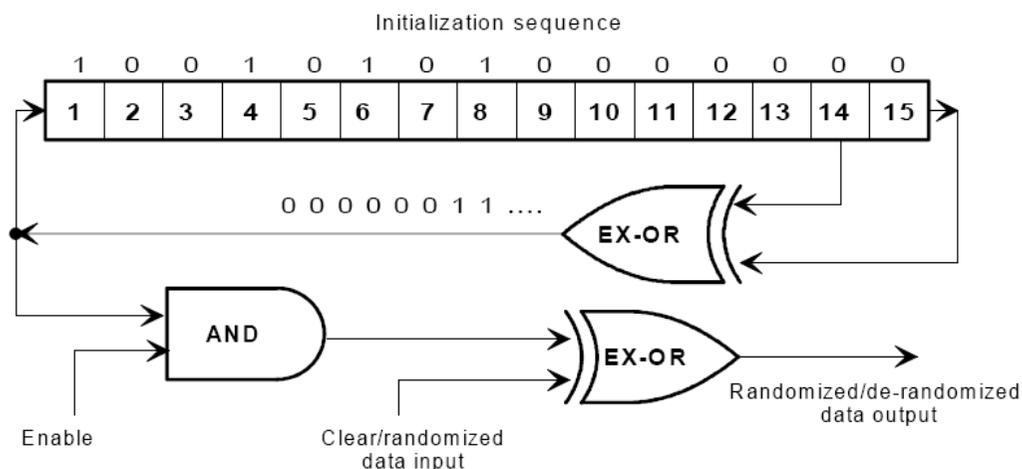
Veremos a continuación cada uno de ellas.

Como se sabe, la salida del multiplexor MPEG-2 son paquetes de 188 bytes que comienzan con una palabra de sincronismo 47H. El procesamiento comenzará con el bit más significativo.



Adaptación del múltiplex de transporte y aleatorización para dispersión de energía

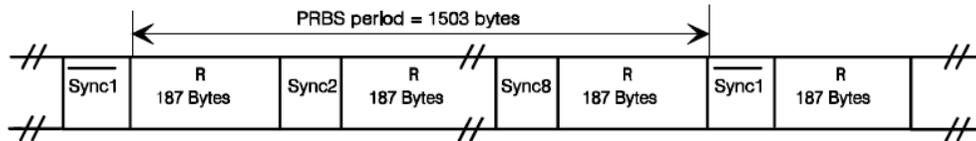
Para garantizar transiciones binarias adecuadas (necesarias para sincronización en el receptor) se realiza una “aleatorización” de los datos de la forma que se describe a continuación:



Data input (MSB first): 1 0 1 | 1 1 0 0 0 x x x | x x x x x ... |
 PRBS sequence : : | 0 0 0 | 0 0 0 1 1 ... |

El polinomio para la “Pseudo Random Binary Sequence” (PRBS) será:

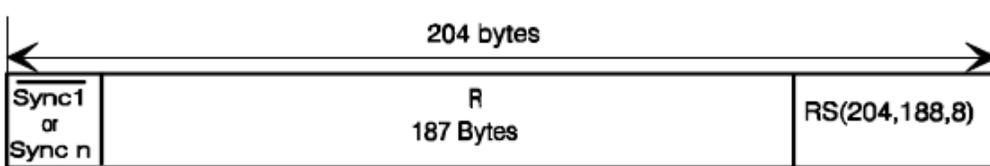
$$1 + X^{14} + X^{15}$$



A los efectos de que el descrambler pueda tener una señal de inicialización, el primer sync byte de un grupo de ocho paquetes MPEG-2 se invierte, cambiando de 47H a B8H. Los sync bytes de los otros siete paquetes se transmiten para facilitar la sincronización. El generador PRBS está funcionando permanentemente pero se deshabilita su salida durante el pasaje de los sync bytes. También funcionará este proceso cuando no haya entrada de trama MPEG-2, para evitar que del modulador salga una portadora sin modular, lo que podría traer problemas a nivel de transmisión.

Outer coding (Reed Solomon), Interleaving y framing

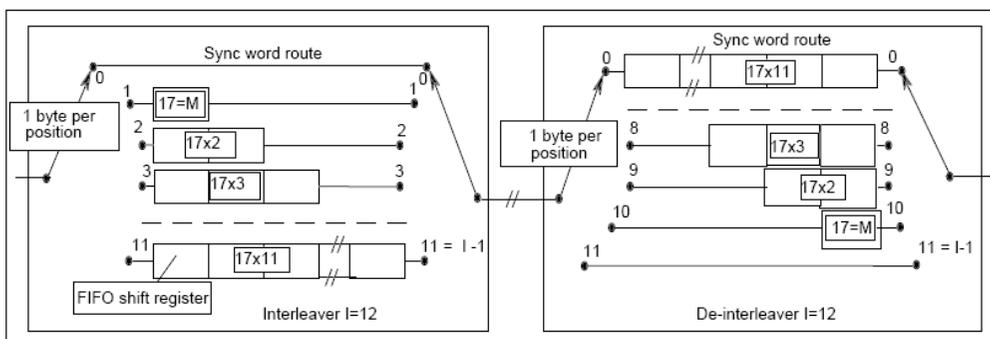
A los paquetes resultantes se les aplica una codificación Reed Solomon (204, 188, T=8) para generar un paquete con corrección de error. Al paquete de 188 bytes se agregan 16 más que garantizan corrección de errores hasta 8 bits.



Code Generator Polynomial: $g(x) = (x+\lambda^0)(x+\lambda^1)(x+\lambda^2) \dots (x+\lambda^{15})$, where $\lambda = 02_{\text{HEX}}$.

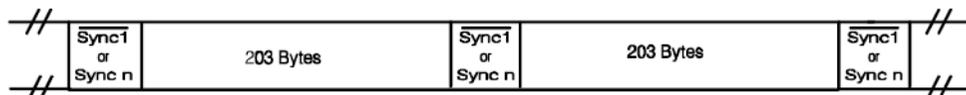
Field Generator Polynomial: $p(x) = x^8 + x^4 + x^3 + x^2 + 1$.

Todos estos paquetes se pasan por un Interleaver con una profundidad I=12. Este elemento se utiliza para protección de errores tipo burst.



Los sync bytes invertidos o no, deberán pasar siempre por la rama "0" para garantizar la sincronización a la salida.

Luego del Interleaver se tiene:

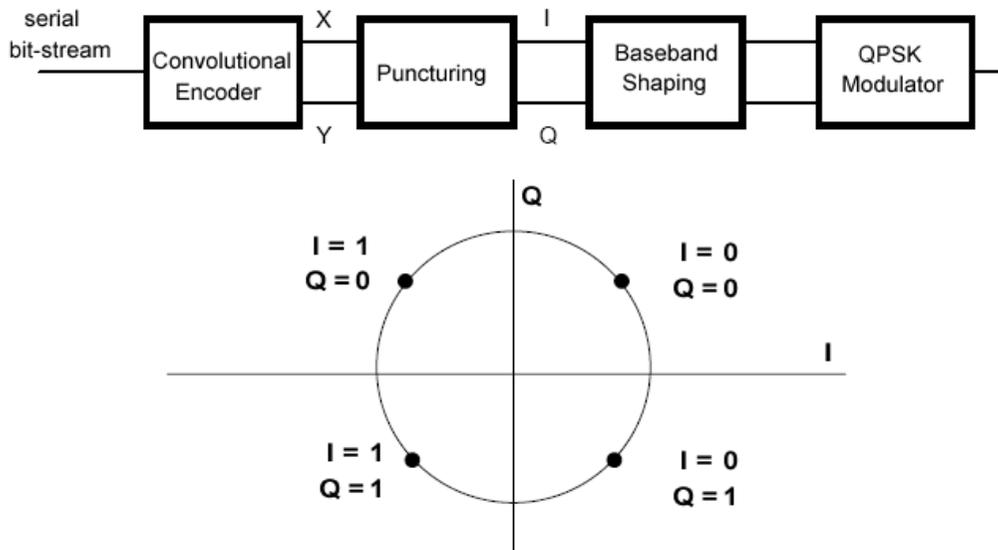


Inner Coding (Convolutional)

Se aplica código de convolución según la siguiente tabla. Los valores posibles son 1/2, 2/3, 3/4, 5/6 y 7/8. Esto permitirá el nivel de corrección de error más apropiado para un servicio determinado o velocidad de datos.

Original code			Code rates									
K	G1 (X)	G2 (Y)	1/2		2/3		3/4		5/6		7/8	
			P	dfree	P	dfree	P	dfree	P	dfree	P	dfree
7	171 _{oct}	133 _{oct}	X: 1 Y: 1 I=X1 Q=Y1	10	X: 10 Y: 11 I=X1 Y2 Y3 Q=Y1 X3 Y4	6	X: 101 Y: 110 I=X1 Y2 Q=Y1 X3	5	X: 10101 Y: 11010 I=X1 Y2 Y4 Q=Y1 X3 X5	4	X: 1000101 Y: 1111010 I=X1 Y2 Y4 Y6 Q=Y1 Y3 X5 X7	3

NOTE: 1 = transmitted bit
0 = non transmitted bit



“Shaping” de banda base y modulación

Se utiliza la modulación QPSK tal como se ve en la figura anterior.

Antes de modular, las señales I y Q se filtran de la siguiente manera:

$$H(f) = 1 \text{ for } |f| < f_N(1 - \alpha)$$

$$H(f) = \left\{ \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sin \frac{\pi}{2f_N} \left[\frac{f_N - |f|}{\alpha} \right] \right\}^{\frac{1}{2}} \text{ for } f_N(1 - \alpha) \leq |f| \leq f_N(1 + \alpha)$$

$$H(f) = 0 \text{ for } |f| > f_N(1 + \alpha),$$

Donde la frecuencia de Nyquist es:

$$f_N = \frac{1}{2T_s} = \frac{R_s}{2}$$

Y el factor de roll-off es $\alpha = 0,35$

Si bien no está en la norma, también es utilizado el roll-off de 20%.

Veamos qué E_b/N_0 se necesita según el inner code rate para tener QEF luego del Reed-Solomon.

Inner code rate	Required E_b/N_0 for BER = 2×10^{-4} after Viterbi QEF after Reed-Solomon
1/2	4,5
2/3	5,0
3/4	5,5
5/6	6,0
7/8	6,4

Estamos ya en condiciones de desplegar datos más interesantes a nuestros efectos, que muestran bitrates en función del ancho de banda del transpondedor satelital utilizado:

Table C.1: Examples of bit rates versus transponder bandwidth

BW (at -3 dB) [MHz]	BW' (at -1 dB) [MHz]	R_s (for BW/ $R_s=1.28$) [Mbaud]	R_u (for QPSK + 1/2 convol) [Mbit/s]	R_u (for QPSK + 2/3 convol) [Mbit/s]	R_u (for QPSK + 3/4 convol) [Mbit/s]	R_u (for QPSK + 5/6 convol) [Mbit/s]	R_u (for QPSK + 7/8 convol) [Mbit/s]
54	48,6	42,2	38,9	51,8	58,3	64,8	68,0
46	41,4	35,9	33,1	44,2	49,7	55,2	58,0
40	36,0	31,2	28,8	38,4	43,2	48,0	50,4
36	32,4	28,1	25,9	34,6	38,9	43,2	45,4
33	29,7	25,8	23,8	31,7	35,6	39,6	41,6
30	27,0	23,4	21,6	28,8	32,4	36,0	37,8
27	24,3	21,1	19,4	25,9	29,2	32,4	34,0
26	23,4	20,3	18,7	25,0	28,1	31,2	32,8

NOTE 1: R_u stands for the useful bit rate after MPEG-2 MUX. R_s (symbol rate) corresponds to the -3dB bandwidth of the modulated signal.

NOTE 2: The figures of table C.1 correspond to an E_b/N_0 degradation of 1,0 dB (with respect to AWGN channel) for the case of 0,35 roll-off and 2/3 code rate, including the effects of IMUX, OMUX and TWTA.

Y a continuación una tabla que indica la performance del sistema para un transpondedor de 33MHz:

Bit Rate R_u (after MUX) [Mbit/s]	Bit Rate R'_u (after RS) [Mbit/s]	Symbol Rate [Mbaud]	Convolut. Inner Code Rate	RS Outer Code Rate	C/N (33 MHz) [dB]
23,754	25,776	25,776	1/2	188/204	4,1
31,672	34,368	25,776	2/3	188/204	5,8
35,631	38,664	25,776	3/4	188/204	6,8
39,590	42,960	25,776	5/6	188/204	7,8
41,570	45,108	25,776	7/8	188/204	8,4

Aquí podemos ver el bit rate útil que tendremos en este transpondedor en función del convolution inner code rate que elijamos. La elección depende del compromiso entre qué bit rate queremos transmitir y qué C/N podemos proporcionar. Por ejemplo, si elegimos 7/8 tendremos 41,570 Mbps y necesitaremos un C/N de 8,4dB.

En ese caso necesitamos una parábola mayor para tener mejor relación S/N o un LNB de menor ruido o un satélite más potente que cuando elegimos 1/2. Esto último es más robusto pero nos da un bit rate útil de casi la mitad, 23,754Mbps.

Las aplicaciones de broadcasting por satélite están enfocadas a parábolas receptoras pequeñas porque van en la casa del televidente. El tamaño importa por un tema de costos ya que los televidentes son numerosos. Y además porque si fuera mayor a 90 cm muchas veces se dificultaría la instalación en un hogar. Por ello, en general se usa inner code rates de 1/2 o 2/3 y satélites con alta potencia.

Hasta aquí está descrita la modulación más popular para servicios de televisión por satélite. Prácticamente 100% de las aplicaciones utilizan DVB-S [2].

La norma DVB-DSNG EN 301 210 en 1997 estableció además del formato DVB-S, el uso de 8PSK y 16QAM para transmisión de noticias por satélite y contribución. Su última versión es de 1999 [4].

La última innovación en materia de modulación por satélite está incluida en la EN 302 307 [3] donde se utilizan nuevos métodos de modulación y se prevén nuevos servicios, por ejemplo servicios interactivos incluyendo acceso a Internet.

Terrestre: DVB-T

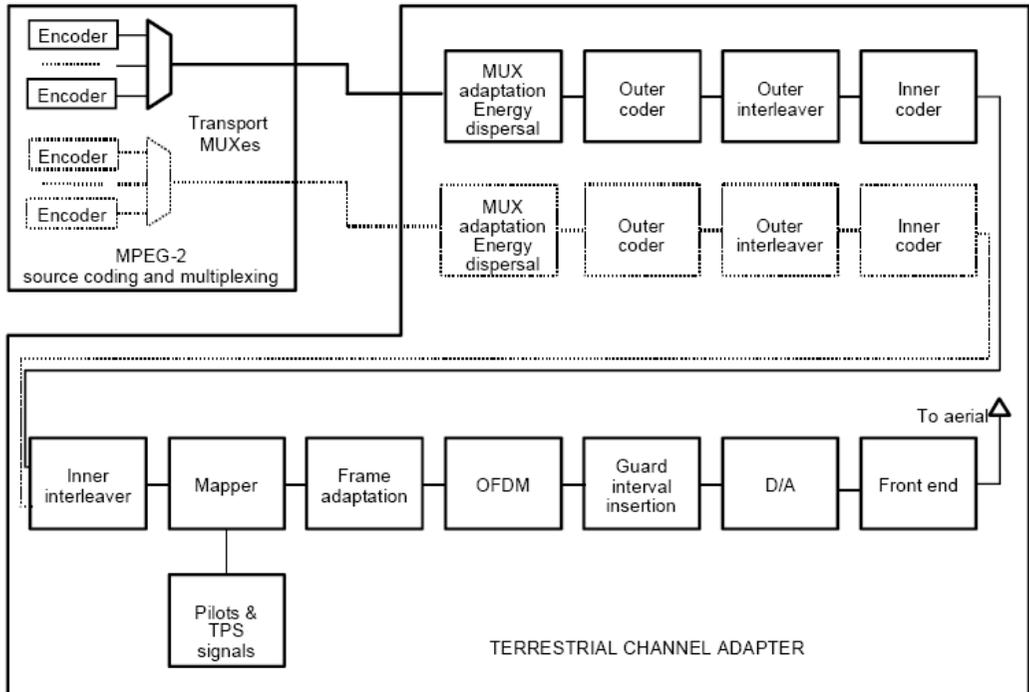
El estándar de televisión digital europeo transmite streams MPEG-2 utilizando modulación COFDM con detección y corrección de errores. Está definido en la norma ETSI EN 300 744 [5].

El sistema está previsto para convivir con las transmisiones de televisión analógica existentes en VHF y UHF, por lo que debe tener protección suficiente respecto a interferencia co-canal y a interferencia en canal adyacente que provenga de canales en los sistemas PAL/SECAM/NTSC. La norma especifica el uso de canales de 8, 7 y 6 MHz. Entre ellos cambia sólo un parámetro, el *período elemental T*.

Admite dos modos de funcionamiento 2K y 8K, diferentes modos de modulación QAM y de inner code rates. Al igual que en el caso de DVB-S, la elección del modo de funcionamiento surgirá de un compromiso entre el bit rate a transmitir y la robustez del sistema. Se permite una modulación jerárquica en la que dos transport streams MPEG-2 son transmitidos. Uno de ellos es de baja prioridad y el otro es de alta.

De esta forma una señal televisiva puede ser transmitida simultáneamente en un modo de bajo bit rate con gran robustez, permitiendo recepción muy segura con un receptor más sencillo, y en un modo de alto bit rate, para receptores más sofisticados y permitiendo mejor calidad de imagen. Un tercer modo (4K) es usado para DVB-T, transmisión para receptores móviles.

El procesamiento de las tramas MPEG-2 tiene elementos en común con DVB-S y en aras a la simplicidad y claridad destacaremos las diferencias respecto a ese sistema.

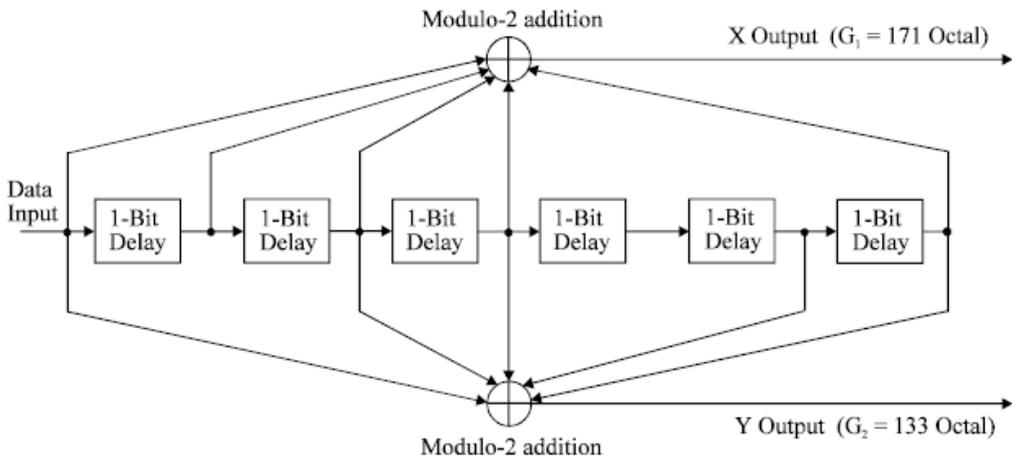


Las tres primeras etapas (MUX adaptation Energy dispersal, Outer coder, Outer interleaver) son idénticas a las correspondientes de DVB-S.

Inner coder

También se utiliza un codificador convolucional madre de 1/2 con 64 estados.

Nuevamente los polinomios generadores del código madre son $G_1 = 171_{OCT}$ para la salida X y $G_2 = 133_{OCT}$ para la salida Y.



Los valores aceptados son 1/2, 2/3, 3/4, 5/6 y 7/8. Esto permitirá el nivel de corrección de error más apropiado para un servicio determinado o velocidad de datos.

Code Rates r	Puncturing pattern	Transmitted sequence (after parallel-to-serial conversion)
1/2	X: 1 Y: 1	$X_1 Y_1$
2/3	X: 1 0 Y: 1 1	$X_1 Y_1 Y_2$
3/4	X: 1 0 1 Y: 1 1 0	$X_1 Y_1 Y_2 X_3$
5/6	X: 1 0 1 0 1 Y: 1 1 0 1 0	$X_1 Y_1 Y_2 X_3 Y_4 X_5$
7/8	X: 1 0 0 1 0 1 Y: 1 1 1 1 0 1 0	$X_1 Y_1 Y_2 Y_3 Y_4 X_5 Y_6 X_7$

Inner Interleaver y Mapper

Consta de dos etapas *Bit wise Interleaving* y *Symbol Interleaver*. Los datos son reacomodados nuevamente para disminuir los *burst errors*. Su cometido básico es mapear su entrada a los símbolos de la modulación, sea ella QPSK, 16-QAM, o 64-QAM. Es un proceso con variaciones según el tipo de modulación y si ésta es jerárquica o no. Se puede consultar la norma [5] para conocer los detalles.

A la salida de estas etapas se obtendrá lo que modulará cada portadora por símbolo OFDM. Los símbolos serán 1512 en el modo 2K o 6048 en el modo 8K.

Se agregan más adelante señales piloto y TPS (Transmission Parameters Signalling) para simplificar la recepción.

Estructura de trama OFDM

La señal transmitida se organiza en tramas. Cada trama tiene una duración T_F y consiste de 68 símbolos OFDM. Cuatro tramas constituyen una super-trama. Cada símbolo está constituido por un conjunto de $K=6817$ portadoras en el modo 8K, o $K=1705$ portadoras en el modo 2K, y es transmitido con una duración T_S . Se compone de dos partes: una parte útil T_U y un intervalo de guarda de duración Δ . El intervalo de guarda consiste en una continuación cíclica de la parte útil y se inserta previa a ella. Hay cuatro valores posibles para el intervalo de guarda que se verán más adelante.

A continuación veremos una serie de tablas con parámetros de modulación.

Para canales de 8 MHz:

Parameter	8K mode	2K mode
Number of carriers K	6 817	1 705
Value of carrier number K_{\min}	0	0
Value of carrier number K_{\max}	6 816	1 704
Duration T_U (see note 2)	896 μ s	224 μ s
Carrier spacing $1/T_U$ (see notes 1 and 2)	1 116 Hz	4 464 Hz
Spacing between carriers K_{\min} and K_{\max} $(K-1)/T_U$ (see note 2)	7,61 MHz	7,61 MHz

Duración de la parte de símbolo para los intervalos de guarda permitidos en canales de 8MHz:

Mode	8K mode				2K mode			
	1/4	1/8	1/16	1/32	1/4	1/8	1/16	1/32
Guard interval Δ / T_U								
Duration of symbol part T_U	8 192 × T 896 μs (see note)				2 048 × T 224 μs (see note)			
Duration of guard interval Δ	2 048 × T 224 μs	1 024 × T 112 μs	512 × T 56 μs	256 × T 28 μs	512 × T 56 μs	256 × T 28 μs	128 × T 14 μs	64 × T 7 μs
Symbol duration $T_S = \Delta + T_U$	10 240 × T 1 120 μs	9 216 × T 1 008 μs	8 704 × T 952 μs	8 448 × T 924 μs	2 560 × T 280 μs	2 304 × T 252 μs	2 176 × T 238 μs	2 112 × T 231 μs

Obviaremos algunos elementos sobre identificación, sobre el intervalo de guarda y sobre corrección de errores, para simplificar esta explicación y llegar directamente a lo que más nos interesa, *el bit rate útil para distintas elecciones de los parámetros en canales de 8 MHz:*

Modulation	Code rate	Guard interval			
		1/4	1/8	1/16	1/32
QPSK	1/2	4,98	5,53	5,85	6,03
	2/3	6,64	7,37	7,81	8,04
	3/4	7,46	8,29	8,78	9,05
	5/6	8,29	9,22	9,76	10,05
	7/8	8,71	9,68	10,25	10,56
16-QAM	1/2	9,95	11,06	11,71	12,06
	2/3	13,27	14,75	15,61	16,09
	3/4	14,93	16,59	17,56	18,10
	5/6	16,59	18,43	19,52	20,11
	7/8	17,42	19,35	20,49	21,11
64-QAM	1/2	14,93	16,59	17,56	18,10
	2/3	19,91	22,12	23,42	24,13
	3/4	22,39	24,88	26,35	27,14
	5/6	24,88	27,65	29,27	30,16
	7/8	26,13	29,03	30,74	31,67

Las mismas tablas para canales de 6 MHz:

Parameter	8K mode	2K mode
Number of carriers K	6 817	1 705
Value of carrier number K_{min}	0	0
Value of carrier number K_{max}	6 816	1 704
Duration T_U	1 194,667 μs	298,6667 μs
Carrier spacing $1/T_U$	0,837054 kHz	3,348214 kHz
Spacing between carriers K_{min} and K_{max} , $(K-1)/T_U$	5,71 MHz	5,71 MHz

Mode	8K mode				2K mode			
	1/4	1/8	1/16	1/32	1/4	1/8	1/16	1/32
Guard interval Δ / T_U								
Duration of symbol part T_U	8 192 × T 1 194,667 μs				2 048 × T 298,667 μs			
Duration of guard interval Δ	2 048 × T 298,667 μs	1 024 × T 149,333 μs	512 × T 74,667 μs	256 × T 37,333 μs	512 × T 74,667 μs	256 × T 37,333 μs	128 × T 18,667 μs	64 × T 9,333 μs
Symbol duration $T_S = \Delta + T_U$	10 240 × T 1 493,3 μs	9 216 × T 1 344 μs	8 704 × T 1 269,3 μs	8 448 × T 1 232 μs	2 560 × T 373,3 μs	2 304 × T 336 μs	2 176 × T 317,3 μs	2 112 × T 308 μs

Modulation	Code rate	Guard interval			
		1/4	1/8	1/16	1/32
QPSK	1/2	3,732	4,147	4,391	4,524
	2/3	4,976	5,529	5,855	6,032
	3/4	5,599	6,221	6,587	6,786
	5/6	6,221	6,912	7,318	7,540
	7/8	6,532	7,257	7,684	7,917
16-QAM	1/2	7,465	8,294	8,782	9,048
	2/3	9,953	11,059	11,709	12,064
	3/4	11,197	12,441	13,173	13,572
	5/6	12,441	13,824	14,637	15,080
	7/8	13,063	14,515	15,369	15,834
64-QAM	1/2	11,197	12,441	13,173	13,572
	2/3	14,929	16,588	17,564	18,096
	3/4	16,796	18,662	19,760	20,358
	5/6	18,662	20,735	21,955	22,620
	7/8	19,595	21,772	23,053	23,751

Esta tabla es la de mayor interés para la implantación de la Televisión Digital Terrestre en nuestro país. Ya que pone de manifiesto que según los parámetros adoptados, será el bitrate disponible en un canal de 6 MHz, tal como los que disponemos en Uruguay. En particular notemos que permite bit rates en determinados modos, lo que habilita a transmitir señales de alta definición. Sin embargo, por experiencias conocidas, los valores más utilizables serán los de “mitad de tabla”, alrededor de 13 a 15 Mbps.

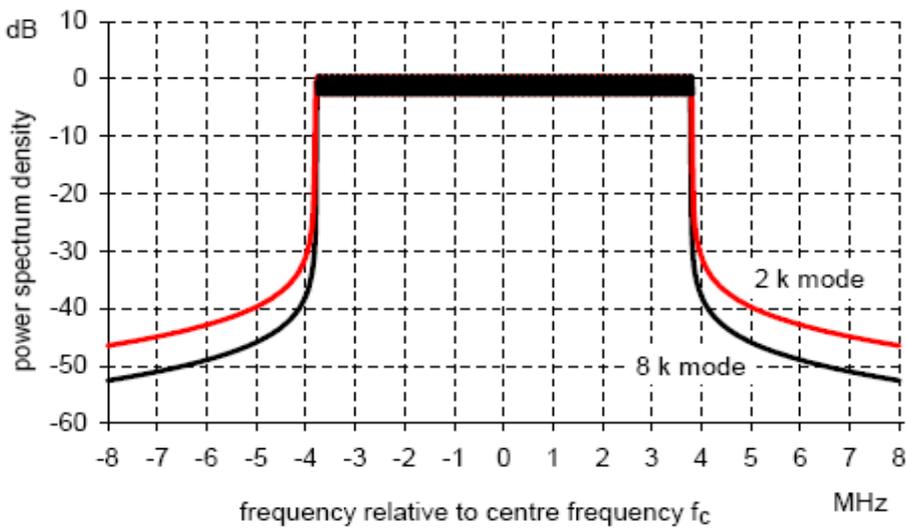
Para canales de 7 MHz:

Parameter	8K mode	2K mode
Number of carriers K	6 817	1 705
Value of carrier number K_{\min}	0	0
Value of carrier number K_{\max}	6 816	1 704
Duration T_U	1 024 μ s	256 μ s
Carrier spacing $1/T_U$	0,976563 kHz	3,90625 kHz
Spacing between carriers K_{\min} and K_{\max} : $(K-1)/T_U$	6,66 MHz	6,66 MHz

Mode	8K mode				2K mode			
	1/4	1/8	1/16	1/32	1/4	1/8	1/16	1/32
Guard interval Δ / T_U								
Duration of symbol part T_U	8 192 \times T 1 024 μ s				2 048 \times T 256 μ s			
Duration of guard interval Δ	2 048 \times T 256 μ s	1 024 \times T 128 μ s	512 \times T 64 μ s	256 \times T 32 μ s	512 \times T 64 μ s	256 \times T 32 μ s	128 \times T 16 μ s	64 \times T 8 μ s
Symbol duration $T_S = \Delta + T_U$	10 240 \times T 1 280 μ s	9 216 \times T 1 152 μ s	8 704 \times T 1 088 μ s	8 448 \times T 1 056 μ s	2 560 \times T 320 μ s	2 304 \times T 288 μ s	2 176 \times T 272 μ s	2 112 \times T 264 μ s

Modulation	Code rate	Guard interval			
		1/4	1/8	1/16	1/32
QPSK	1/2	4,354	4,838	5,123	5,278
	2/3	5,806	6,451	6,830	7,037
	3/4	6,532	7,257	7,684	7,917
	5/6	7,257	8,064	8,538	8,797
	7/8	7,620	8,467	8,965	9,237
16-QAM	1/2	8,709	9,676	10,246	10,556
	2/3	11,612	12,902	13,661	14,075
	3/4	13,063	14,515	15,369	15,834
	5/6	14,515	16,127	17,076	17,594
	7/8	15,240	16,934	17,930	18,473
64-QAM	1/2	13,063	14,515	15,369	15,834
	2/3	17,418	19,353	20,491	21,112
	3/4	19,595	21,772	23,053	23,751
	5/6	21,772	24,191	25,614	26,390
	7/8	22,861	25,401	26,895	27,710

El espectro resultante en un canal de 8 MHz con un intervalo de guarda 1/4 es:



Donde vemos que hay un uso eficiente del espectro, teniendo todo el ancho de banda la misma densidad espectral de potencia. La potencia transmitida cae marcadamente fuera del canal y puede ser filtrada para minimizar interferencia a canales adyacentes.

Incluimos las siguientes figuras del trabajo de Maddocks [6] para aclarar aspectos de la modulación COFDM.

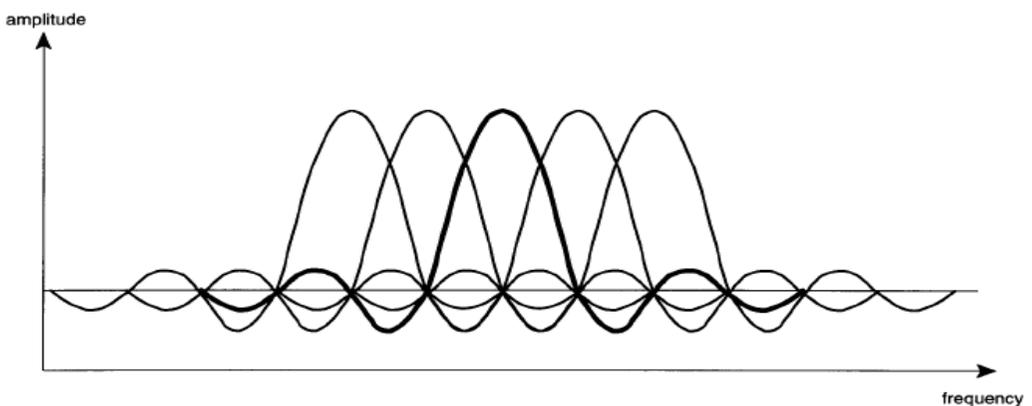


Fig. 7 - Carriers with orthogonal frequency spacing.

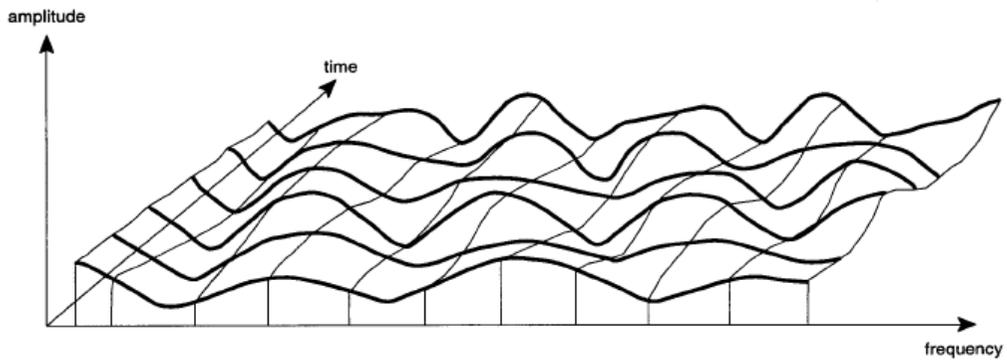


Fig. 10 - Multipath channel response.

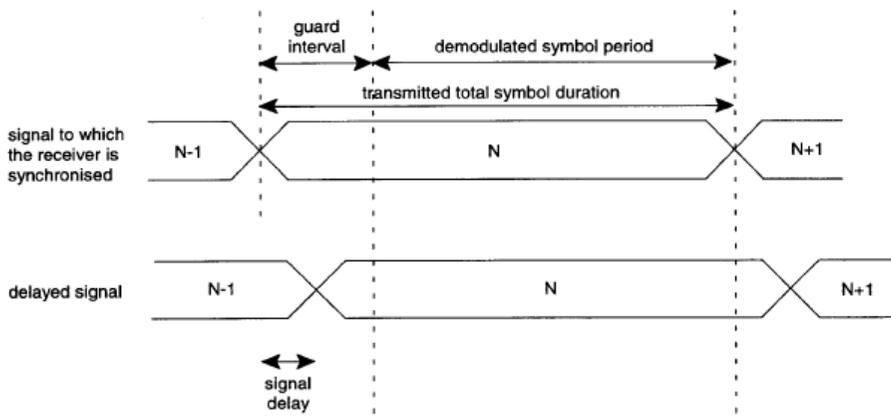


Fig. 11 - Multipath with a delay of less than the guard interval.

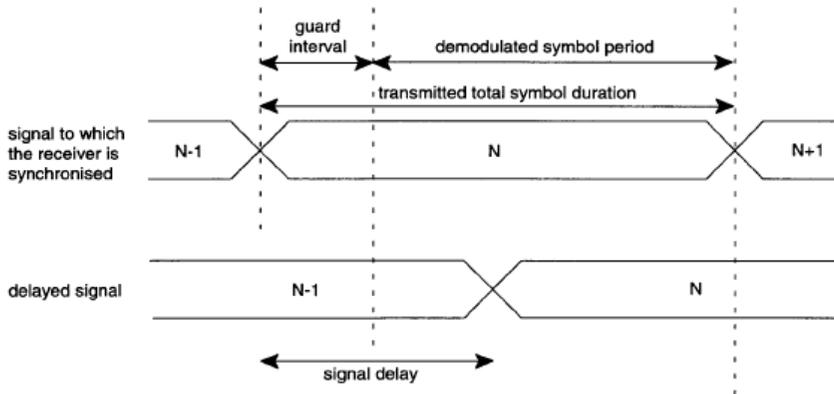


Fig. 12 - Multipath delay exceeding the guard interval.

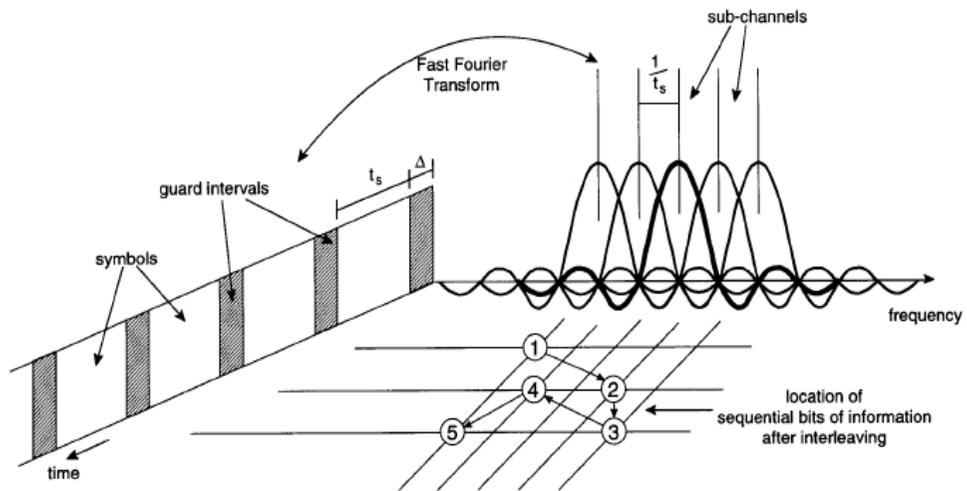
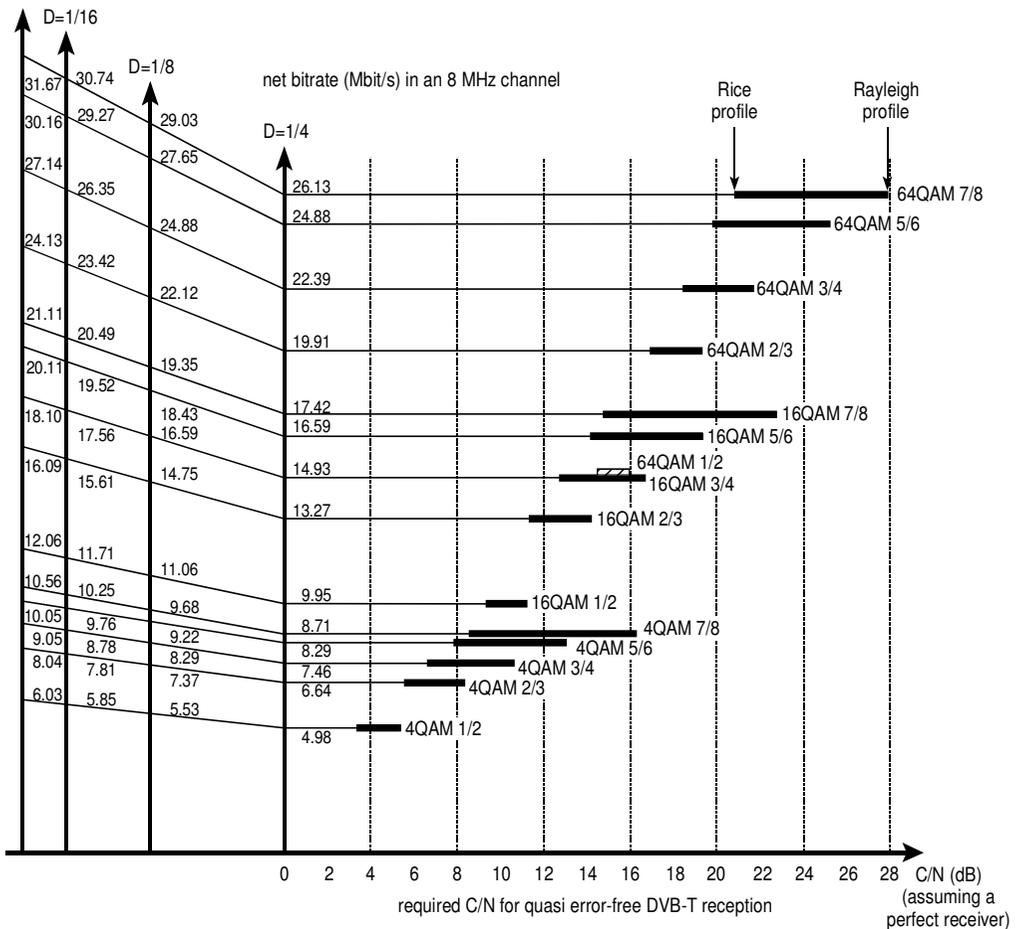


Fig. 13 - Spectral and temporal representation of a COFDM signal.

Podemos ver C/N y bit rate neto en función de los diversos parámetros de transmisión [7]:

$D=1/32$



Se constata por múltiples fuentes que el sistema DVB-T cumple una serie de **características** sumamente positivas, gracias a la modulación COFDM, modulación con múltiples portadoras y con *forward error correction*.

Estas características son:

- **Tolerancia a interferencia multicamino** (el popular “fantasma” de la televisión analógica). Debido a la existencia de múltiples portadoras, la interferencia por multipath no es igual sobre todas ellas, permitiendo obtener la señal original utilizando la corrección de errores.
- **Recepción en dispositivos móviles**. Se han hecho pruebas de DVB-T en receptores móviles a velocidades de hasta 200 km/h [8] y [12].
- **Recepción en interiores**. [9]
- **Tolerancia a interferencias co-canal**. Permite realizar redes de una sola frecuencia (SFN). [9]
- **Tolerancia a interferencias de canales adyacentes**. [9]
- **Modulación jerárquica**, permitiendo transmisión simultánea del mismo programa con alta y baja resolución con más facilidad de recepción en el último caso, con tan solo un pequeño freeze al pasar de uno a otro. Para una explicación detallada de la modulación jerárquica ver el artículo de Nokes y Mitchell [10].
- **Posibilidad de realizar Single Frequency Networks** [11]

Cable: DVB-C

El estándar europeo para transmisión por cable es por lejos el más difundido a nivel mundial y está definido en la norma EN 300 429 V1.2.1 (1998-04) [13]. También en Uruguay se utiliza para televisión para abonados desde hace un par de años. Utiliza modulación QAM 16, 32, 64, 128 o 256.

A continuación un diagrama de bloques del sistema en el head-end y en recepción. DVB-C tiene en común con DVB-S la codificación de los datos hasta el interleaver de convolución.

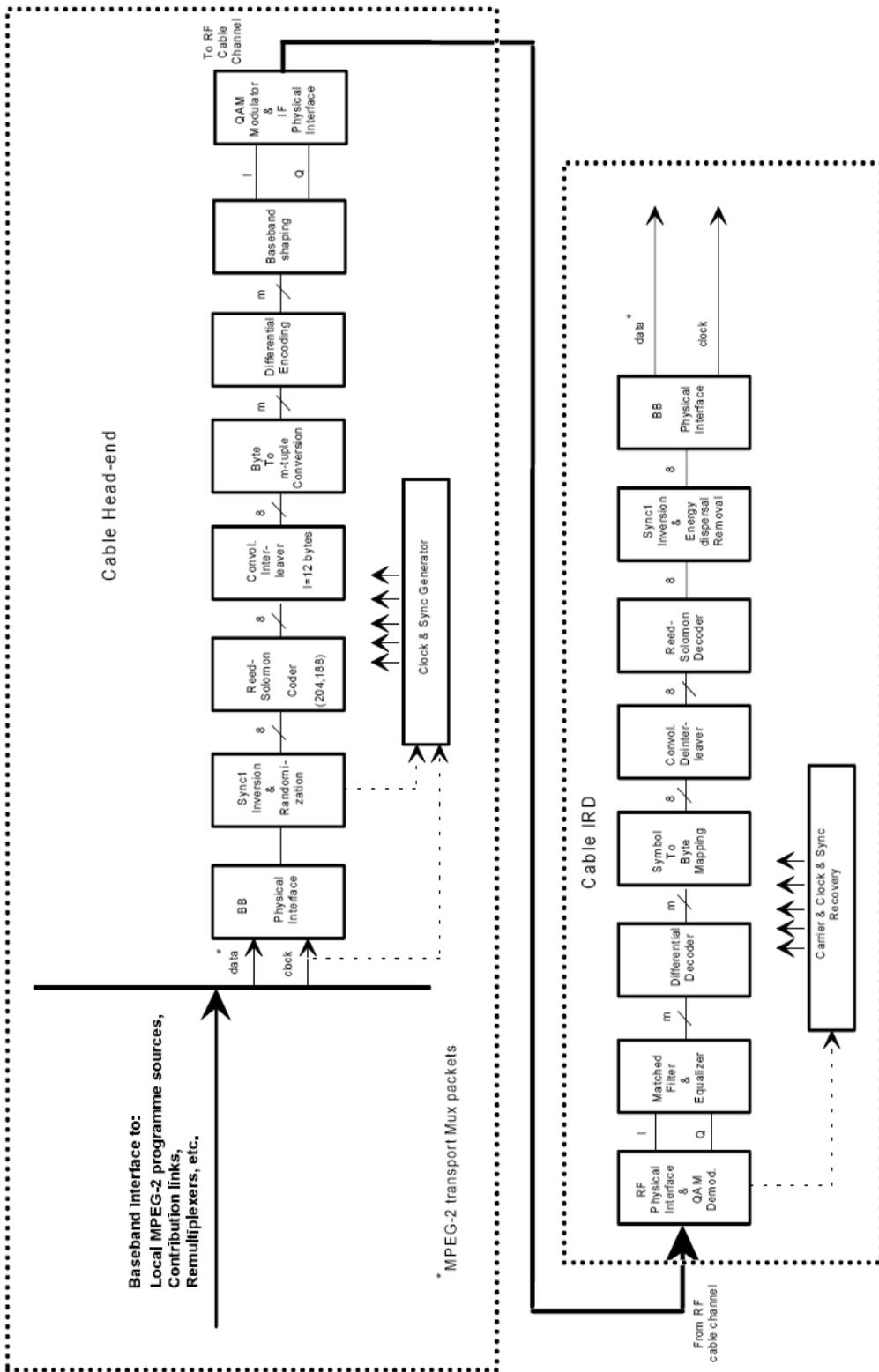
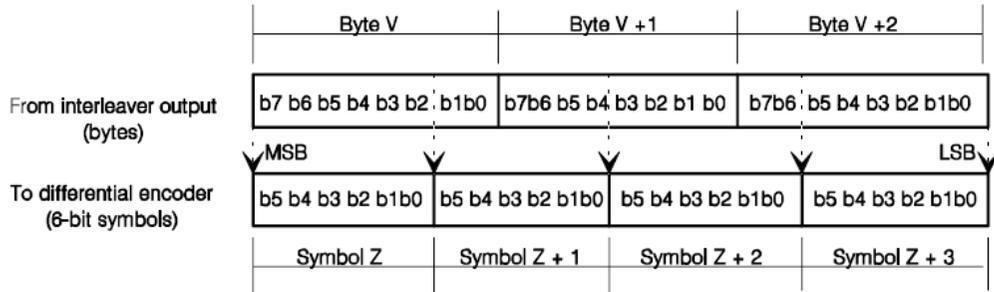


Figure 1: Conceptual block diagram of elements at the cable head-end and receiving site

Mapeo de bytes a símbolos

Para el caso de modulación QAM de 2^m el proceso mapea k bytes en n símbolos, de tal forma que $8k = n \times m$

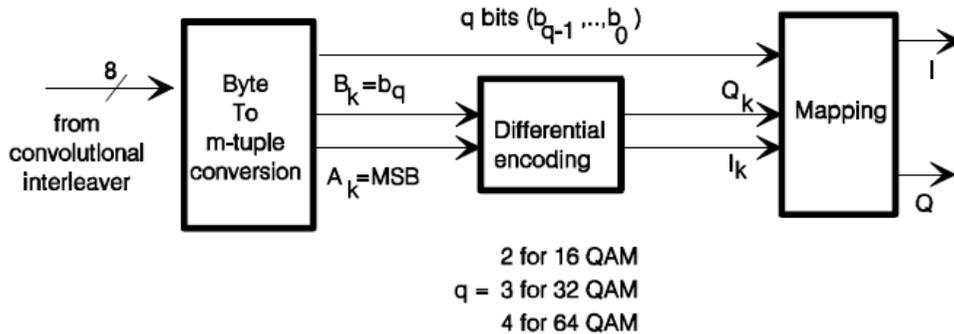
Para 64-QAM donde $m = 6$, $k = 3$ y $n = 4$,



Se utiliza una codificación diferencial de la siguiente forma:

$$I_k = \overline{(A_k \oplus B_k)} \cdot (A_k \oplus I_{k-1}) + (A_k \oplus B_k) \cdot (A_k \oplus Q_{k-1})$$

$$Q_k = \overline{(A_k \oplus B_k)} \cdot (B_k \oplus Q_{k-1}) + (A_k \oplus B_k) \cdot (B_k \oplus I_{k-1})$$



Modulación

Como fue dicho la modulación es QAM de 16, 32, 64, 128 o 256 puntos en el diagrama de constelación.

16-QAM

$I_k Q_k = 10$	Q	$I_k Q_k = 00$
1011 ○	1001 ○	0010 ○
1010 ○	1000 ○	0000 ○
1101 ○	1100 ○	0100 ○
1111 ○	1110 ○	0101 ○
$I_k Q_k = 11$		$I_k Q_k = 01$

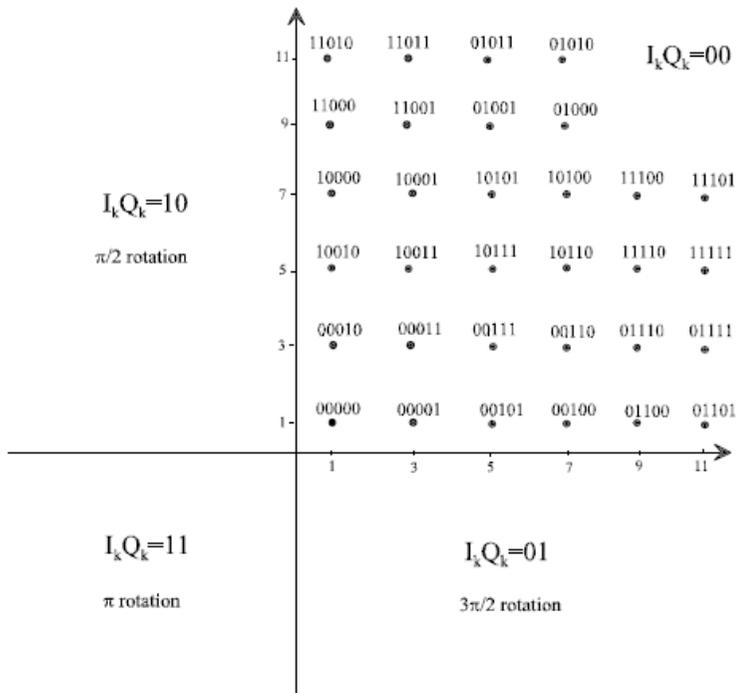
32-QAM

$I_k Q_k = 10$	Q	$I_k Q_k = 00$
10111 ○	10011 ○	00110 ○
10010 ○	10101 ○	00100 ○
10110 ○	10100 ○	00000 ○
11011 ○	11001 ○	01000 ○
11111 ○	11101 ○	01001 ○
11010 ○	11110 ○	01010 ○
$I_k Q_k = 11$		$I_k Q_k = 01$

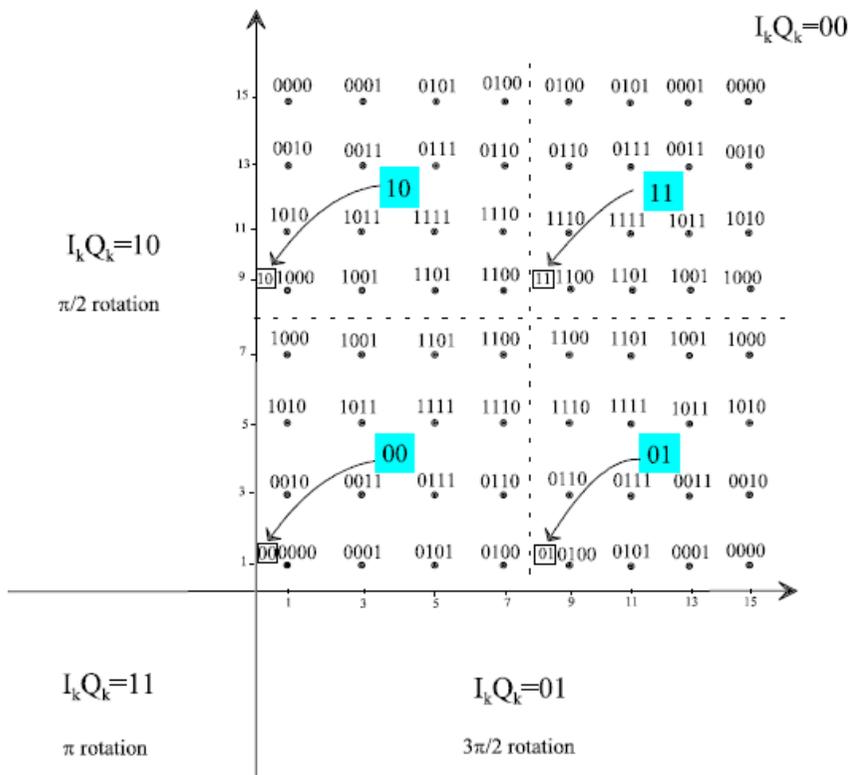
64-QAM

$I_k Q_k = 10$	Q	$I_k Q_k = 00$
101100 ○	101110 ○	001000 ○
101101 ○	101111 ○	001001 ○
101001 ○	101011 ○	001101 ○
101000 ○	101010 ○	001100 ○
110100 ○	110101 ○	010000 ○
110110 ○	110111 ○	010010 ○
111110 ○	111111 ○	011010 ○
111100 ○	111101 ○	011000 ○
$I_k Q_k = 11$		$I_k Q_k = 01$

$I_k Q_k$ are the two MSBs in each quadrant



256 QAM



Antes de la modulación las señales I y Q son pasadas por un filtro de raíz cuadrada. El factor de roll-off es de 0,15.

$$H(f) = 1 \text{ for } |f| < f_N(1 - \alpha)$$

$$H(f) = \left\{ \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sin \frac{\pi}{2f_N} \left[\frac{f_N - |f|}{\alpha} \right] \right\}^{\frac{1}{2}} \text{ for } f_N(1 - \alpha) \leq |f| \leq f_N(1 + \alpha)$$

$$H(f) = 0 \text{ for } |f| > f_N(1 + \alpha)$$

donde

$$f_N = \frac{1}{2T_g} = \frac{R_g}{2}$$

es la frecuencia de Nyquist y el factor de roll-off es $\alpha = 0,15$.

Finalmente obtenemos una tabla con ejemplos de bit rates posibles según ancho de banda y modulación empleada:

Useful bit rate R_U (MPEG-2 transport layer) [Mbit/s]	Total bit rate R_U' incl. RS(204,188) [Mbit/s]	Cable symbol rate [Mbaud]	Occupied bandwidth [MHz]	Modulation scheme
38,1	41,34	6,89	7,92	64-QAM
31,9	34,61	6,92	7,96	32-QAM
25,2	27,34	6,84	7,86	16-QAM
31,672 PDH	34,367	6,87	7,90	32-QAM
18,9	20,52	3,42	3,93	64-QAM
16,0	17,40	3,48	4,00	32-QAM
12,8	13,92	3,48	4,00	16-QAM
9,6	10,44	1,74	2,00	64-QAM
8,0	8,70	1,74	2,00	32-QAM
6,4	6,96	1,74	2,00	16-QAM

Al ser el cable un medio mucho más controlado que el satélite o el terrestre, se consiguen tasas de transmisión mucho más altas. En el caso de Uruguay, para canales de 6 MHz DVB-C habilita el envío de 38,8 Mbps utilizando modulación 256 QAM.

Conclusiones

Se han visto los métodos de modulación utilizados por DVB en sus distintas versiones de satélite, terrestre y cable. Al ser distinta la realidad en cada uno de ellos respecto a la relación señal ruido, a la presencia de interferencias o ruidos, es distinta la modulación utilizada en cada uno de estos

medios. Dado un ancho de banda y un medio que introduce determinado nivel de ruido, lo que se busca es maximizar la capacidad de transmisión del medio y la tasa de bits por segundo.

En ese sentido, la tasa disponible para DVB-C es mucho mayor que para DVB-T, ya que es un medio mucho más controlado.

DVB-T al estar prevista para transmisión aérea, sufre una mayor presencia de ruidos, interferencias, “fantasmas” y demás. Por eso se prevé una mayor redundancia a la hora de modular, que la hacen más “robusta” pero que lleva a menores tasas de bits por segundo. Al implantar la televisión digital terrestre en Uruguay se deberá tener especial atención a los parámetros opcionales de transmisión para ajustar adecuadamente el compromiso entre mayor tasa de bits por segundo o recepción más segura.

Referencias:

[1] ETSI EN 301 701 V1.1.1 (2000-08) European Standard (Telecommunications series) “Digital Video Broadcasting (DVB); OFDM modulation for microwave digital terrestrial television”

[2] EN 300 421 V1.1.2 (1997-08), European Standard (Telecommunications series), “Digital Video Broadcasting (DVB); Framing structure, channel coding and modulation for 11/12 GHz satellite services”

[3] EN 302 307 V1.1.1 (2005-03), European Standard (Telecommunications series), “Digital Video Broadcasting (DVB); Second generation framing structure, channel coding and modulation systems for Broadcasting, Interactive Services, News Gathering and other broadband satellite applications”

[4] ETSI EN 301 210 V1.1.1 (1999-03) “Digital Video Broadcasting (DVB); Framing structure, channel coding and modulation for Digital Satellite News Gathering (DSNG) and other contribution applications by satellite”

[5] ETSI EN 300 744 V1.5.1 (2004-11), European Standard (Telecommunications series), “Digital Video Broadcasting (DVB); Framing structure, channel coding and modulation for digital terrestrial television”

[6] Maddocks, MCD, “AN INTRODUCTION TO DIGITAL MODULATION AND OFDM TECHNIQUES”, BBC Research Department Report, RD1993/10

[7] ETSI, “Digital Video Broadcasting (DVB). Implementation guidelines for DVB terrestrial services; Transmission aspects”

[8] Oliphant A. y Christ P., “VALIDATE & MOTIVATE: COLLABORATIVE R&D TO SPEED UP THE LAUNCH OF DIGITAL TERRESTRIAL TV “, BBC R&D, UK and Deutsche Telekom Berkom, Germany

[9] Pullen I R, (BBC Research and Development, Kingswood Warren), “DTT COVERAGE – PREDICTIONS AND MEASUREMENT”

[10] Nokes C., Mitchell J, (BBC R&D), “POTENTIAL BENEFITS OF HIERARCHICAL MODES OF THE DVB-T SPECIFICATION”

[11] Jesús M. Fernández, J. Capdevila, R. García, S. Cabanillas, S. Mata, A. Mansilla and Jose M. Fernández, Engineering R&D - RETEVISION S.A., “SINGLE FREQUENCY NETWORKS FOR DIGITAL VIDEO BROADCASTING”

[12] Peter Pogrzeba, Ralf Burow (Deutsche Telekom Berkom Germany), Gérard Faria (IT IS France), Andrew Oliphant (BBC R&D United Kingdom), “LAB & FIELD TESTS OF MOBILE APPLICATIONS OF DVB-T”

[13] ETSI EN 300 429 V1.2.1 (1998-04), “Digital Video Broadcasting (DVB); Framing structure, channel coding and modulation for cable systems”

Bibliografía:

www.wikipedia.org términos DVB-T, DVB-S, Error Correction and Detection.

Stott, J H (BBC), “Explaining some of the magic of COFDM”, Proceedings of the 20th International Television Symposium 1997

Oliphant A (BBC), “VALIDATE Verifying the European specification for digital terrestrial TV and preparing for the launch of services”, Proceedings of the 20th International Television Symposium 1997

Shelswell P., “The COFDM Modulation System, The heart of Digital Audio Broadcasting”, BBC Research Department Report, RD1996/8

Whitaker, Jerry, “DTV – The revolution in Electronic Imaging”, McGraw-Hill, 1998, ISBN 0-00-069626-8

Robin M., Poulin M., “Digital Television Fundamentals – Design and Installation of Video and Audio Systems”, McGraw-Hill, 1998, ISBN 0-07-053168-4

Bartlett E R, “Cable Television Handbook”, McGraw-Hill, 2000, ISBN 0-07-006891-7

NDS, “ATSC Digital Television Technology Seminar”, Marzo 22, 1999, Buenos Aires, Argentina

Ciciora W, Farmer J, Large D, Adams M, “Modern Cable Television Technology – Video, Voice and Data Communications”, 2nd Edition, Morgan Kaufmann, 2004, ISBN 1-55860-828-1

Couch L,” Digital and Analog Communication Systems”, Seventh Edition, Prentice Hall, 2007, ISBN 0-13-142492-0

Couch L,” Digital and Analog Communication Systems”, Seventh Edition, Prentice Hall, 2007, ISBN 0-13-142492-0

Carlson B, Crilly P, Rutledge J, “Communication Systems”, Fourth Edition, McGraw-Hill, 2002, ISBN 0-07-121028-8