

Modulacions digitals per a senyals de televisió

Javier Gago Barrio

PID_00196634



Els textos i imatges publicats en aquesta obra estan subjectes –llevat que s'indiqui el contrari– a una llicència de Reconeixement-NoComercial-SenseObraDerivada (BY-NC-ND) v.3.0 Espanya de Creative Commons. Podeu copiar-los, distribuir-los i transmetre'ls públicament sempre que en citeu l'autor i la font (FUOC. Fundació per a la Universitat Oberta de Catalunya), no en feu un ús comercial i no en feu obra derivada. La llicència completa es pot consultar a <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/es/legalcode.ca>

Índex

Introducció	5
1. Consideracions generals sobre modulacions digitals	7
1.1. Característiques dels mitjans de propagació	7
1.1.1. Satèl·lit	7
1.1.2. Cable	8
1.1.3. Terrestre	8
1.2. Eficiència espectral de la modulació en funció del nombre de bits per símbol	8
1.3. Filtre previ limitador d'amplada de banda	9
2. Modulacions recomanades per l'estàndard DVB per a la transmissió de televisió digital	12
2.1. Modulació QAM per a televisió per cable DVB-C	14
2.1.1. Càlcul de l'eficiència espectral i velocitat binària en DVB-C	15
2.2. Modulació QPSK per a televisió per satèl·lit DVB-S	16
2.2.1. Càlcul de l'eficiència espectral i velocitat binària en DVB-S	16
2.3. Modulació COFDM per a televisió digital terrestre (TDT) DVB-T	17
2.3.1. Creació de les trames	18
2.3.2. Portadores pilot	18
2.3.3. Transformada inversa de Fourier (IFFT)	19
2.3.4. Inserció de l'interval de guarda per a evitar ecos multicamí	20
2.3.5. Convertidor D/A	20
2.3.6. Codificació jeràrquica	20
2.3.7. Paràmetres DVB-T	21
2.3.8. Càlcul de l'eficiència espectral i la velocitat binària en DVB-T	22
Bibliografia	25

Introducció

En aquest mòdul s'expliquen les modulacions digitals que s'usen en els diferents mitjans de transmissió de televisió digital. En cap cas ens plantegem explicar tota la teoria de la modulació digital, sinó partir d'una explicació prèvia general i explicar com i per què s'utilitzen en els diferents estàndards DVB.

En la figura 1 s'indica el bloc de la cadena televisiva que es desenvolupa en aquest mòdul:

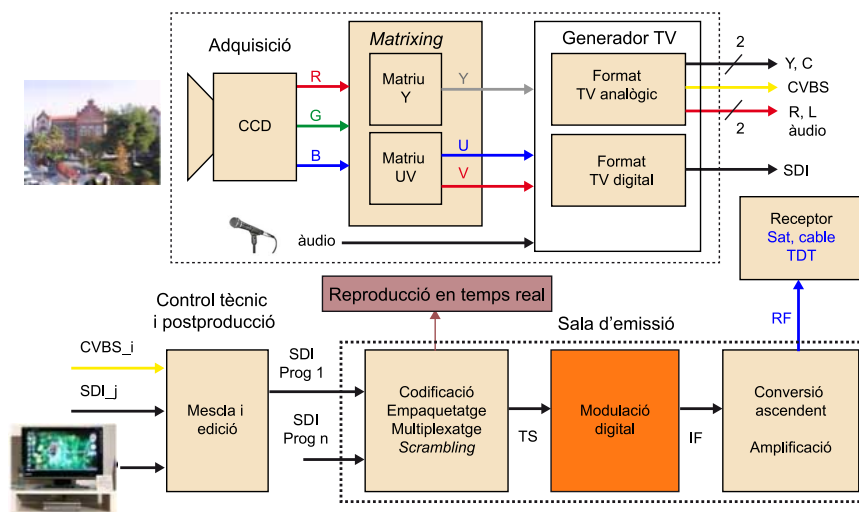


Figura 1. Cadena televisiva. En taronja s'indica el bloc que es desenvolupa en aquest mòdul

Com s'explica en el mòdul "Codificació del senyal de televisió", l'últim bloc per a transmetre el *transport stream* pels diferents canals és el bloc de modulació (QPSK, QAM i OFDM). El procés conjunt de codificació de canal i modulació digital busca optimitzar l'eficiència espectral del senyal, és a dir, el nombre de bits que s'han de transmetre en l'amplada de banda assignada al mitjà de transmissió. D'aquesta manera, s'han estandarditzat tres tècniques de codificació i modulació digital diferents, una per a cada mitjà de transmissió -satèl·lit, cable i xarxes terrestres-, ja que cada mitjà té característiques tècniques i administratives que s'han de tenir en compte en l'elecció de la codificació i la modulació.

Les modulacions consideren els valors de les amplades de banda estàndards de cada mitjà de transmissió (27 MHz a 36 MHz en satèl·lit i entre 6 MHz i 8 MHz per a cable i transmissió terrestre).

L'estàndard DVB per a la transmissió de televisió digital recomana les característiques, tant de les modulacions digitals com de la codificació, per a cadascun d'aquests tres mitjans, segons el diagrama de blocs següent:

Referència bibliogràfica

Per a un estudi detallat de la modulació digital us podeu adreçar a les referències aportades en la bibliografia o en l'assignatura *Sistemes de comunicació*.

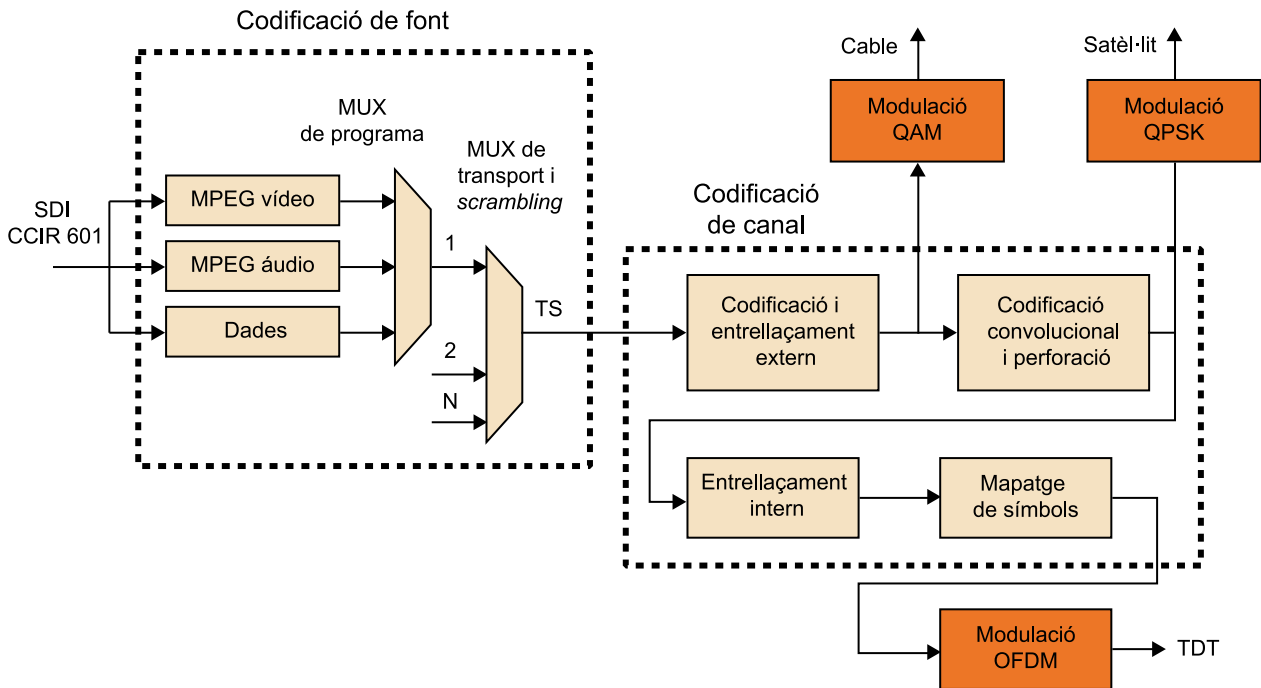


Figura 2. Diagrama de blocs del procés de codificació i modulació digital segons la norma DVB

Cada sistema de transmissió necessita un nivell de codificació de canal diferent abans de la modulació digital i, a més, requereix diferents tipus de modulació. No obstant això, en tots els esquemes de modulació hi ha un pas previ, que és el filtratge de Nyquist, per a limitar en banda el senyal digital evitant interferències intersímbols (ISI).

La sortida del procés de modulació serà un senyal analògic modulad en una portadora intermèdia en el cas de satèl·lit o cable, o diverses portadores OFDM en el cas terrestre (o TDT). El pas següent, que es veu en el mòdul "Transmissió i recepció del senyal de televisió", és la conversió a canal de radiofreqüència (RF) i la seva amplificació posterior per a ser transmès a la xarxa de difusió.

1. Consideracions generals sobre modulacions digitals

En aquest primer apartat es veuen les característiques dels mitjans de propagació per a entendre, posteriorment, el perquè de l'ús de diferents modulacions digitals. Un altre aspecte que veiem és el de l'eficiència espectral, també important en la transmissió de senyals digitals, i que suggereix l'aparició dels símbols a partir dels bits per a augmentar aquesta eficiència. I, finalment, s'analitza el filtre de Nyquist previ a qualsevol modulació digital.

1.1. Característiques dels mitjans de propagació

El senyal de televisió es pot difondre en *streaming* o bé per satèl·lit, cable o xarxa terrestre. Per a retransmetre'l en condicions s'han de conèixer les condicions tècniques i administratives que exigeix cada mitjà, i les característiques dels senyals que hi circulen. En funció d'aquests paràmetres s'escollirà el tipus de modulació digital aplicat al senyal de televisió.

En concret interessa conèixer factors com l'amplada de banda disponible per canal, la relació senyal-soroll (SNR) o portadora-soroll (CNR) del senyal modulat en el canal corresponent, i la probabilitat de rebots o efecte multicamí en la transmissió.

A continuació analitzarem aquests efectes en els tres mitjans de transmissió tradicionals. Cal dir que tots els paràmetres de modulació i dels sistemes detectors i correctors d'errors estan normalitzats en la norma DVB per a transmissió de televisió digital. Hi ha una normativa per a cada mitjà de transmissió: DVB-S (satèl·lit), DVB-C (cable) i DVB-T (terrestre). Aquesta última més coneguda com a TDT (televisió digital terrestre).

1.1.1. Satèl·lit

Per a transmetre el senyal per satèl·lit s'usen portadores en la banda de 4 GHz a 6 GHz, per la qual cosa les amplades de banda dels canals poden ser més grans que en els canals per cable o terrestres, en els quals les portadores són inferiors. El valor normalitzat està entre 27 MHz i 36 MHz, ja que la modulació del senyal de televisió analògica es du a terme en FM.

Atès que el senyal ha de recórrer 36.000 km fins al satèl·lit, la relació SNR o CNR en la recepció és molt petita, de prop de 10 dB o menys, i per aquest motiu el senyal analògic es modula en FM i necessita més codi per a corregir errors en el senyal digital.

L'avantatge de la transmissió per satèl·lit és que és una transmissió neta, sense rebots per desadaptació d'impedàncies ni interferències per transmissió multicamí.

Per a escollir el tipus de modulació digital, s'ha de tenir en compte que els subsistemes electrònics del satèl·lit no estan optimitzats per a la modulació en amplitud.

1.1.2. Cable

La transmissió per cable, igual que la terrestre, requereix portadores inferiors a 1 GHz i amplades de banda per canal de 6 MHz als EUA i 7 MHz o 8 MHz a Europa, ja que en aquest cas s'utilitza modulació en AM amb banda lateral vestigial (BLV), per tant, la xarxa de cable està preparada per a la modulació en amplitud.

Al contrari que en satèl·lit, la recepció del senyal és bona, amb un SNR superior a 30 dB, ja que la distància recorreguda entre repetidors és petita, la qual cosa permet la modulació en AM en analògic i la reducció de codi corrector d'errors en digital. No obstant això, la transmissió per cable sol estar afectada pels ecos provocats per la desadaptació d'impedàncies per línies mal acabades en la xarxa i aquest aspecte s'ha de tenir en compte en escollir el tipus de modulació digital i els seus paràmetres.

1.1.3. Terrestre

La transmissió terrestre és la que presenta més inconvenients, especialment si la recepció és mòbil amb antenes simples (telefonía mòbil). Es disposa d'un amplada de banda igual que en la transmissió per cable, ja que les portadores estan en la mateixa banda i la modulació també és AM BLV.

Aquest tipus de transmissió està condicionada des del transmissor inicial fins al receptor final pel problema de les reflexions multicamí dels senyals d'RF enviats per antena, per la qual cosa es requereix una modulació especial, amb més protecció contra aquest tipus d'errors, que s'explicarà més endavant.

1.2. Eficiència espectral de la modulació en funció del nombre de bits per símbol

L'eficiència espectral d'una modulació digital es defineix com la relació entre el nombre de bits que conté el símbol que s'enviarà per cada hertz d'amplada de banda que ocupa el senyal.

Un senyal digital és una seqüència d'uns i zeros que electrònicament es representen mitjançant un voltatge que varia entre un valor alt i un valor baix de tensió. La modulació digital consisteix a generar una senoide, amb una freqüència, amplitud i fase determinades per al valor actual del senyal digital. En la versió més simple, solament hi haurà dues senoides diferents: una per al valor 1 i una altra per al valor 0; per tant, solament serà necessari variar un dels paràmetres (amplitud, freqüència o fase) i mantenir la resta constants. La modulació així formada tindrà una amplada de banda al voltant de la freqüència portadora, que serà la freqüència mitjana de la senoide.

Una modulació simple transmet un sol bit (1 o 0) per cada senoide; és a dir, té una eficiència espectral d' $1/BW$, ja que per a transmetre 1 bit es necessiten BW Hz. Si agrupem els bits en un símbol (si cada n bits formen un símbol), s'augmenta l'eficiència espectral, a força d'augmentar la probabilitat d'error en la detecció del símbol.

1.3. Filtre previ limitador d'amplada de banda

El procés de modulació digital requereix un filtratge previ del senyal digital amb la finalitat de limitar l'amplada de banda infinita d'aquest. El filtre dissenyat per a aquest efecte ha de complir dues condicions:

- Limitar l'amplada de banda al valor que requereix el canal de comunicació.
- Evitar que la resposta impulsional del filtre distorsioni el propi senyal.

L'efecte limitador de banda del filtre té com a contrapartida una reposada temporal transitòria infinita. Encara que es tracti d'una resposta esmorteïda en el temps, pot interferir amb la resposta permanent, i alterar el valor dels bits o símbols següents. Aquest efecte es diu *interferència intersimbòlica* (ISI).

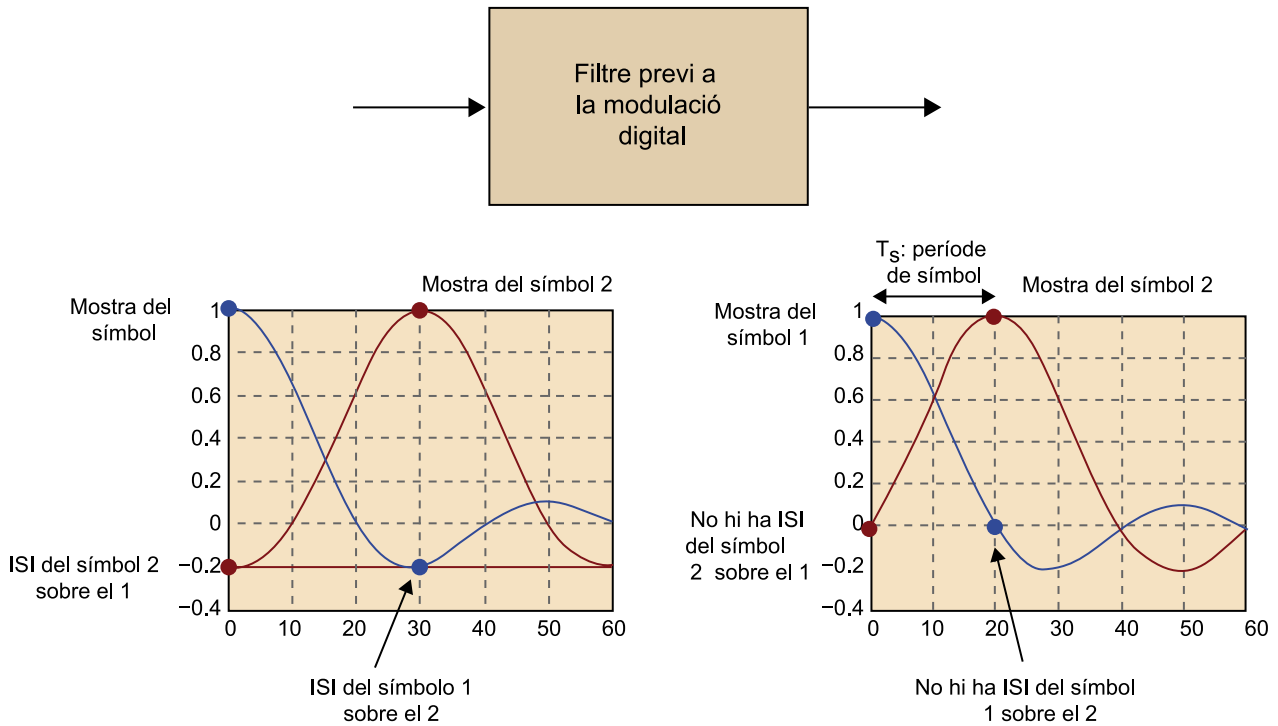


Figura 3. Filtre previ a la modulació digital i efecte de la interferència intersimbòlica (ISI)

Per evitar l'efecte ISI s'ha de complir el **primer criteri de Nyquist**: "La resposta temporal ha de passar per zero en els instants de mostreig, és a dir, en els múltiples del període de símbol, T_s ".

Un dels filtres que compleix aquest criteri és l'anomenat *raised cosine filter* (filtre de cosinus alçat) o, més comunament, *filtre de Nyquist*. Aquest filtre té una resposta freqüencial que depèn del període del símbol T i d'un factor α anomenat *roll-off* o *d'excés de banda* que pot prendre valors entre 0 i 1.

En la figura 4 es representa la funció de transferència del filtre de Nyquist per a tres valors de α :

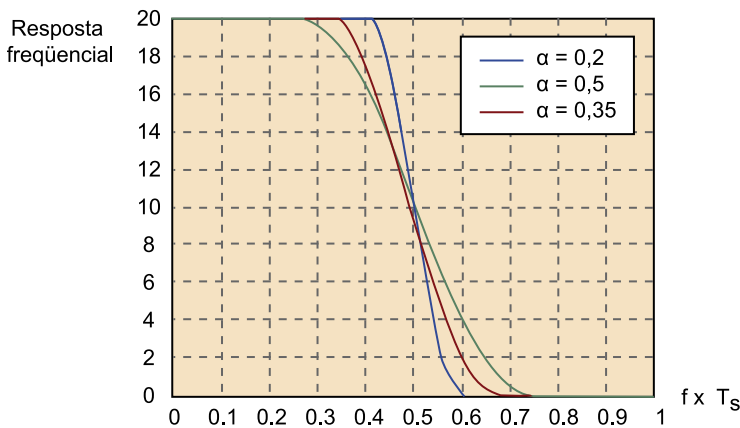


Figura 4. Funció de transferència del filtre de Nyquist per a tres valors del factor *roll-off*

La figura següent mostra la resposta temporal d'aquests tres filtres de Nyquist:

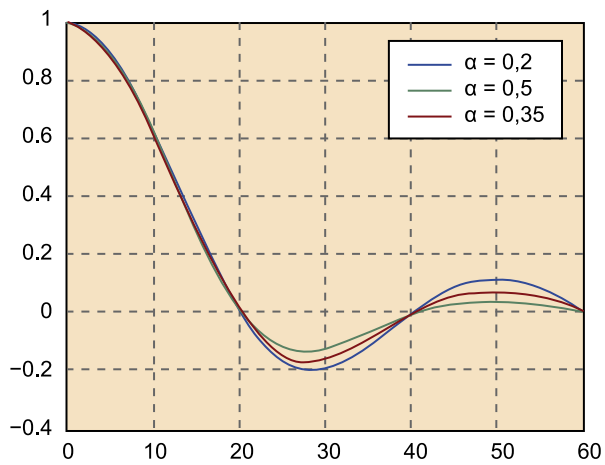


Figura 5. Resposta temporal del filtre de Nyquist per a tres valors del factor roll-off

Es pot comprovar que en els instants múltiples del període de símbol T_s la resposta temporal val 0, per la qual cosa no hi ha interferències intersimbòliques (ISI).

L'amplada de banda de transmissió quan s'usa aquest tipus de filtres està determinada per l'expressió següent:

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

2. Modulacions recomanades per l'estàndard DVB per a la transmissió de televisió digital

Recordem que el DVB és l'organisme designat per a regular els procediments de transmissió del senyal de televisió digital i les seves normes són acceptades per gairebé tots els països i continents a excepció dels EUA i el Japó, on coexisteixen amb altres sistemes.

Les normes DVB es basen en l'estàndard MPEG per a la compressió, multiplexatge i sincronització dels senyals d'àudio i vídeo. L'estàndard DVB defineix, a més, els tipus de modulació i els codis de correcció d'error, i els mecanismes d'accés condicional als serveis i programes. El DVB ha elaborat uns estàndards diferents per a cada mitjà de radiodifusió: l'estàndard per a transmissió per satèl·lit es diu DVB-S, el de transmissió per cable es diu DVB-C, i el de transmissió terrestre, DVB-T, més conegut a Europa com a TDT.

Bloc	Paràmetre	DVB-C	DVB-S	DVB-T
Font	Codificació de vídeo	MPEG-2 vídeo (MP@ML)		
	Codificació d'àudio	MPEG-2 àudio (capa 2)		
	Multiplexatge	MPEG-2 capa de sistema		
	<i>Scrambling</i>	DVB-CSA v3 128 bits		
Canal	Paquet de transport	188 bytes		
	Aleatoritzador	$1 + D^{14} + D^{15}$		
	Codi extern	Reed-Solomon (204, 188, M = 8 bits)		
	Entrellaçament	Furney, profunditat D = 12		
	Codi intern	No n'hi ha	Continu $r_C = 1/2, 2/3, 3/4, 5/6$ o $7/8$	
Modulació	Factor <i>roll-off</i>	15%	35%	-
	Modulació	QAM 16 a 64	QPSK	OFDM 2K/8K
	BW canal	8 MHz (6 o 7)	27 MHz a 36 MHz	6 MHz, 7 MHz o 8 MHz

Característiques de la normativa DVB per a senyals de televisió

Per les característiques diferenciades de cada mitjà de propagació ja comentades, el tipus de modulació recomanat en DVB-S, DVB-C i DVB-T és diferent:

- **La transmissió per satèl·lit**, com que la recepció és molt feble i amb soroll molt significatiu, necessita la modulació més robusta contra el soroll: la QPSK.

Com que els equips de transmissió per satèl·lit usen amplades de banda grans (36 MHz) per a poder transmetre la televisió analògica modulada en FM, poden suportar transmissions digitals de baixa eficiència espectral, com la QPSK, que necessitin una amplada de banda més gran per a una mateixa velocitat de transmissió.

- **La transmissió per cable** es pot permetre estalviar en amplada de banda, usant una amplada de canal analògic (6 MHz, 7 MHz o 8 MHz), a força d'utilitzar una modulació amb més eficiència espectral, com les QAM. En concret s'usen 16-QAM, 32-QAM o 64-QAM. Els requeriments d'SNR per a aquest tipus de modulacions no són un impediment en aquest tipus de transmissió, que es pot permetre regenerar el senyal en punts estratègics de la xarxa.
- **La transmissió terrestre** és la que presenta més problemes a causa de les reflexions multicamí de la propagació electromagnètica enviada per l'antena, motiu pel qual no va ser possible utilitzar-la fins que no es va desenvolupar amb èxit la modulació OFDM, després d'anys de funcionament de la televisió digital per satèl·lit i per cable. Encara que el DVB-T estàndard s'usa principalment a Europa, en canals de 8 MHz en UHF, també està preparat per a canals de 7 MHz (VHF Europa, Austràlia, etc.) i 6 MHz (Amèrica, Japó, Corea, etc). També ha estat dissenyat per a coexistir amb transmissions de televisió analògica gràcies a la bona protecció d'interferències contra canals adjacents o en el propi canal.

Cada sistema de transmissió requereix una codificació de canal i una modulació digital pròpia. A continuació es presenta el diagrama de blocs dels tres sistemes DVB:

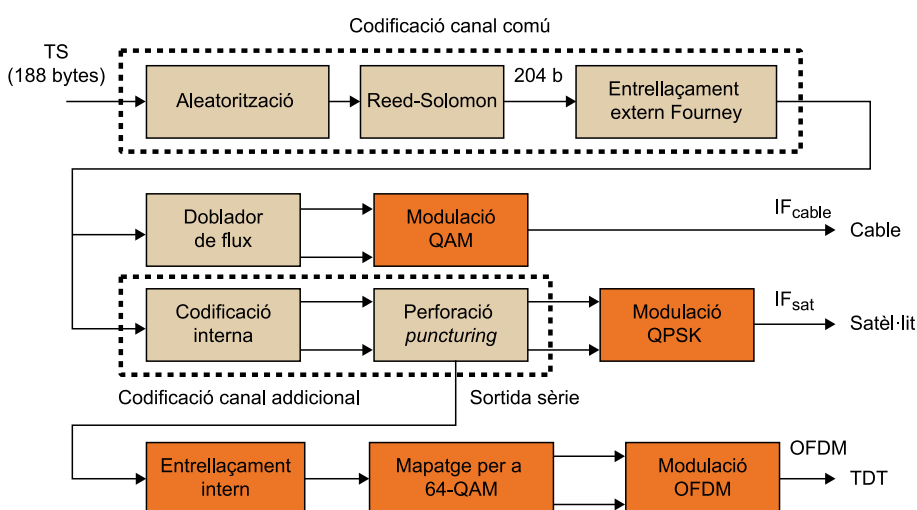


Figura 6. Diagrama de blocs de la codificació de canal i la modulació digital en DVB

Nota

Els processos de codificació de canal s'expliquen amb detall en el mòdul "Codificació del senyal de televisió". El que es detalla a continuació són els processos de modulació digital.

2.1. Modulació QAM per a televisió per cable DVB-C

La modulació per DVB-C requereix tres nivells de codificació de canal previs: la dispersió d'energia, el Reed-Solomon (RS) i l'entrellaçament extern de Fourny. El mapatge dels símbols que sorgeixen d'aquest últim és una simple ramificació en dos fluxos que es corresponen amb els senyals I i Q que s'usaran per a la modulació en la quadratura QAM corresponent:

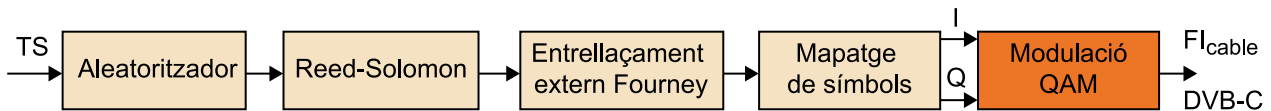


Figura 7. Diagrama de blocs de la codificació de canal i la modulació digital en DVB-C

Les modulacions QAM són modulacions d'amplitud en quadratura que es basen a dividir el flux de dades en dos fluxos paral·lels (I i Q) i agrupar un conjunt de bits en un sol símbol de canal. El flux I es modula amb una portadora, i el Q amb la mateixa portadora desfasada $\pi/2$. Els diferents símbols es corresponen amb diferents valors d'amplitud, per la qual cosa el senyal de sortida QAM és una senoide que pot tenir diferents valors discrets d'amplitud i de fase.

El nombre d'estats totals, és a dir, la suma dels estats de I i de Q dona nom a la modulació.

Exemple

Si hi ha un bit per a I i un altre per a Q, en total hi ha 2 bits i, per tant, 4 estats diferents (2 estats per a I i 2 per a Q): la modulació és 4-QAM.

Aquesta és la modulació en quadratura més senzilla, i també es denomina *modulació QPSK*.

Bits de I/Q	Bits/símbol	Nre. d'estats	Modulació
1	2	4	4-QAM o QPSK
2	4	16	16-QAM
3	8	64	64-QAM
4	16	256	256-QAM

Característiques principals de les modulacions QAM

La transmissió per cable utilitza modulacions QAM d'un nombre de bits més elevat que la transmissió per satèl·lit, des de la 16-QAM fins a la 256-QAM. A tall d'exemple, amb 64-QAM aconseguim velocitats de 38,5 Mbps en canals de 8 MHz. Els canals solen tenir una amplada de banda de 8 MHz, encara que també hi ha la possibilitat de 7 MHz. El factor *roll-off* del filtre d'entrada és de $\alpha = 0,15$.

2.1.1. Càlcul de l'eficiència espectral i velocitat binària en DVB-C

A partir de les dades de l'apartat anterior, es pot calcular l'eficiència espectral de la transmissió per cable.

Suposem un canal de transmissió europeu de 8 MHz d'amplada de banda. L'equació (2) dóna el valor de l'amplada de banda del senyal modulad digitalment, però cal tenir en compte que, quan es torna a modular en amplitud per a situar-la en el canal corresponent, l'amplada de banda es dobla perquè apareixen dues bandes laterals al voltant de la portadora. Per tant, l'amplada de banda que hem de considerar és B_{canal} :

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

Essent T_S el temps de símbol.

Amb les dades de la modulació i de l'amplada de banda del canal, la freqüència del símbol val:

$$f_S = \frac{1}{T_S} = \frac{B_c}{1+\alpha} = \frac{8 \cdot 10^6}{1+0,15} \approx 7\text{MHz} \quad (3)$$

Oficialment es pren un valor de 6.875 MHz. El normal en les xarxes europees de qualitat és utilitzar 64-QAM, però el pitjor cas quant a velocitat binària seria usar una 16-QAM. En aquest últim cas, el símbol és de 4 bits i, per tant, la velocitat binària bruta serà:

$$R_b = 4 \cdot f_S = 4 \cdot 6.875 = 27,5\text{Mbps} \quad (4)$$

L'eficiència espectral bruta (sense el codi Reed-Solomon) valdrà:

$$\frac{27,5}{8} = 3,437 \text{ bps per Hz} \quad (5)$$

Per a calcular la velocitat binària útil, és a dir, la dels bits d'informació exclouent els bits afegits per a corregir errors, s'ha de multiplicar pel factor Reed-Solomon (r_{RS}), que val 188/204, ja que el codi Reed-Solomon transforma paquets de 188 bytes en 204 bytes. Per tant, la velocitat binària útil val:

$$R_u = R_b \cdot r_{RS} = 27,5 \cdot 188/204 = 25,34\text{Mbps} \quad (6)$$

I l'eficiència espectral útil val:

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

En el millor cas, la transmissió mitjançant 64-QAM és possible, i els valors de flux i eficiència bruts i útils es multipliquen per 6/4, ja que tenim 6 bits per símbol, enfront de 4 bits per símbol en 16-QAM.

2.2. Modulació QPSK per a televisió per satèl·lit DVB-S

La modulació per a transmissió per satèl·lit DVB-S és la QPSK o 4-QAM. Requereix un nivell de codificació de canal extra respecte a la DVB-C, ja que el mitjà és més sorollós. Es tracta d'una codificació interna seguida d'un procés de perforació que ofereix a la sortida dos fluxos digitals en paral·lel que s'usaran com a senyals I i Q per a la modulació QPSK.

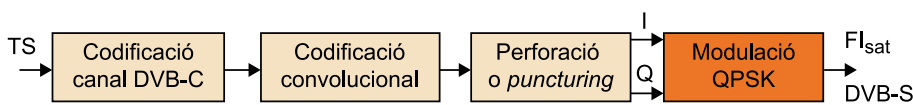


Figura 8. Diagrama de blocs de la codificació de canal i la modulació digital en DVB-S

El senyal resultant de la modulació QPSK se situa en un canal amb una amplada de banda entre 26 MHz i 54 MHz. El factor *roll-off* del filtre d'entrada val $\alpha = 0.35$.

2.2.1. Càlcul de l'eficiència espectral i velocitat binària en DVB-S

Amb les dades de la modulació i de l'amplada de banda del canal, la freqüència del símbol val:

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

Com que la modulació QPSK usa 2 bits per símbol, el flux binari brut serà:

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

Per a calcular la velocitat binària útil s'ha de multiplicar pel factor Reed-Solomon (r_{RS}) i pel factor *code rate* del codi intern (r_c , codificació convolucional o contínua). En el cas pitjor, amb una SNR mínima, per a garantir un servei acceptable ($BER < 10^{-10}$), el factor r_c del codi convolutiu serà d'1/2. Amb aquestes dades, la velocitat binària útil, o flux útil, val:

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

I l'eficiència espectral útil val:

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

Per a fer coincidir la R_u del satèl·lit amb la del cable, se sol augmentar la capacitat del canal augmentant la freqüència de símbol de 24,4 MHz a 27,5 MHz. Encara que d'aquesta manera s'entra en la banda d'atenuació del filtre d'entrada, el senyal solament s'atenua 1 dB i no s'incrementa el nombre d'errors apreciablement. En aquest cas, la velocitat binària útil serà:

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

I l'eficiència espectral útil valdrà:

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

És a dir, s'aconsegueix el mateix flux útil que amb transmissió per cable, però amb més amplada de banda, és a dir, amb menys eficiència espectral.

En cas de tenir una màxima SNR, el coeficient r_c del codi intern pot augmentar fins al valor 7/8. Per tant, els paràmetres de velocitat i eficiència espectral augmenten proporcionalment, és a dir, es multipliquen per 7/4 (resultat de canviar el r_c d'1/2 a 7/8).

2.3. Modulació COFDM per a televisió digital terrestre (TDT) DVB-T

A diferència de les modulacions QAM, que solament disposen d'una portadora per a enviar la informació, la modulació COFDM (*coded orthogonal frequency division multiplex*) necessita múltiples portadores per a enviar els bits dels senyals I i Q també multiplexats en freqüència. Els símbols tenen una durada T_U i cadascun es modula en QAM sobre les múltiples portadores (cadascuna amb una modulació QAM diferent). S'escull un alt nombre de portadores, N , les freqüències de les quals estan separades $1/T_U$ per a evitar les interferències en l'espectre freqüencial d'una portadora sobre les portadores adjacents: aquesta és la condició d'ortogonalitat.

En la pràctica, els senyals procedents de les reflexions multicamins se sumen al senyal directe i es perd la condició d'ortogonalitat, llavors apareixen interferències intersimbòliques. Per a evitar aquest efecte no desitjat s'afegeix un **interval de seguretat**, Δ , al període de símbol, T_U , durant el qual, si es produeix una nova recepció, el receptor la rebutja automàticament. Per tant, el valor final del període de símbol T_S augmenta el valor $T_S = T_U + \Delta$. L'interval de seguretat és igual o inferior a $T_U/4$.

La modulació COFDM per a DVB-T requereix dos nivells de codificació de canal extra respecte a DVB-S, que es fan a partir del flux en sèrie del procés de perforació i consisteixen en un entrellaçament intern i un mapatge de símbols OFDM:

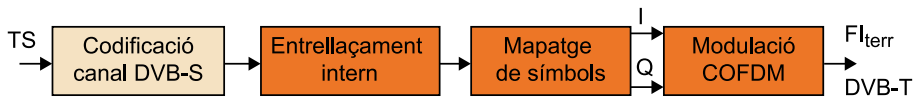


Figura 9. Diagrama de blocs de la codificació de canal i la modulació digital en DVB-T

L'entrellaçament intern és un *interleaving* de bit formant matrius de 126 paraules de 2, 4 o 6 bits, depenent de la modulació escollida per a cada portadora (QPSK, 16-QAM o 64-QAM).

El mapatge de símbols OFDM consisteix en l'agrupació de les matrius anteriors en grups de 12 (mode 2K) o 48 (mode 8K) per a formar els símbols OFDM de 1.512×2 bits (mode 2K en QPSK) fins a 6.048×6 bits (mode 8K en 64-QAM). Aquests símbols modularan les 1.512 o 6.048 portadores útils que es defineixen més endavant. La sortida del mapatge de símbols és un flux paral·lel de dades que representen als senyals I i Q usats per a la modulació QAM de cadascuna de les portadores del procés COFDM.

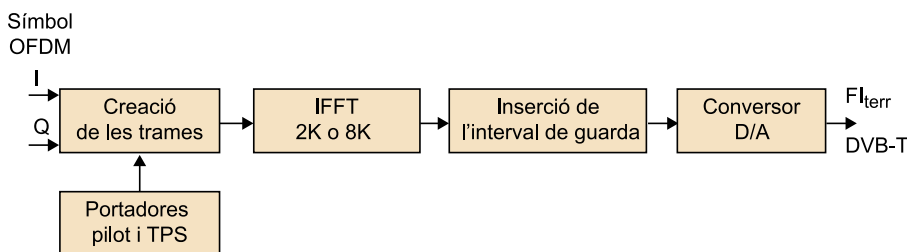


Figura 10. Diagrama de blocs de la modulació OFDM en DVB-T

A continuació s'explica breument la funció de cada bloc.

2.3.1. Creació de les trames

El flux DVB-T s'organitza en trames formades per 68 símbols: quatre trames consecutives formen una supertrama de 272 símbols, que permeten la transmissió d'un nombre enter de paquets amb protecció Reed-Solomon (RS) de 204 bytes.

2.3.2. Portadores pilot

Per ajudar el receptor a adquirir el senyal i informar-lo dels paràmetres de modulació, el senyal OFDM inclou portadores sense modular per bits d'informació. Hi ha tres tipus de portadores:

- **Portadores pilot contínues** (*continual pilots*): per a la sincronització del receptor en freqüència i fase.
- **Portadores pilot disperses** (*scattered pilots*): per a la regeneració del canal en amplitud i fase.

- **Portadores TPS** (*transmission parameter signalling*): amb informació del mode transmès.

Les portadores pilot contínues estan en posicions fixes, les portadores pilot disperses es desplacen per tres posicions en cada nou símbol i totes dues tenen un nivell superior de potència a les portadores TPS. Les contínues i les disperses són modulades per una seqüència pseudoaleatòria, que permet la sincronització i l'avaluació del canal (estimació de l'alteració del canal a causa de múltiples trajectes).

Les portadores TPS senyalitzen els paràmetres de transmissió. Es transmeten a molt baixa velocitat mitjançant una modulació tan robusta com la BPSK diferencial (1 bit/símbol), la qual cosa permet una adquisició accelerada del senyal i una ràpida resposta del receptor davant un canvi eventual en els paràmetres. Totes les TPS transmeten simultàniament la mateixa informació i aquesta redundància permet descodificar la informació TPS encara que el senyal no compleixi les condicions mínimes per a ser descodificat. La informació TPS es transmet una vegada per trama i, com que la trama conté 68 símbols, la informació TPS ocupa 68 bits.

2.3.3. Transformada inversa de Fourier (IFFT)

A causa de l'elevat nombre de portadores utilitzades, aquestes no es modulen individualment sinó que el procés té lloc per mitjà de la transformada inversa de Fourier (IFFT) en 2.048 punts (mode 2K) o 8.192 (mode 8K). La figura següent presenta aquest algorisme i es pot veure com s'assigna el símbol s_k a la portadora f_k , i com se sumen totes les portadores per a obtenir el senyal final OFDM. Abans de la modulació, el símbol es filtra amb un prefiltrer $h_s(t)$ que limita temporalment la durada del símbol al seu període útil, T_U . Aquest prefiltrer és una finestra temporal rectangular centrada en $T_U/2$ i d'amplada T_U .

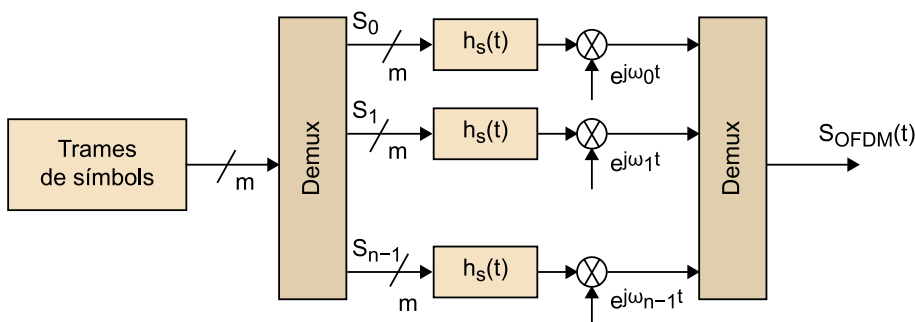


Figura 11. Diagrama de blocs de la IFFT per a crear les multiportadores modulades OFDM

A continuació presentem l'equació matemàtica d'aquest algorisme i es pot apreciar que es tracta de l'algorisme de càlcul d'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 les equacions

T_U : període de símbol útil (sense incloure l'interval de guarda)

ω_k : freqüència angular de la portadora k

$h_S(t)$: resposta rectangular del prefiltratge de la modulació de cada portadora

2.3.4. Inserció de l'interval de guarda per a evitar ecos multicamí

En el mode 8K, la llarga durada del símbol, 896 μs en canals de 8 MHz, combinada amb el màxim interval de guarda, 224 μs en el cas de $T_S/4$, permet una recepció satisfactòria en presència d'ecos multicamí. Això permet desplegar xarxes de transmissió terrestre emetent per un sol canal, fins i tot a desenes de quilòmetres de distància de l'emissor.

L'espaiat entre freqüències del mode 2K, que és 4 vegades superior al del mode 8K, retalla les distàncies màximes entre emissor i receptor en un factor de 4 i, per contra, l'efecte Doppler en la recepció mòbil l'afecta 4 vegades menys, la qual cosa permet velocitats del receptor mòbil de fins a 250 km/h en els canals més alts de la banda d'UHF en mode 2K, mentre que en mode 8K el màxim és 4 vegades menor.

2.3.5. Convertidor D/A

El senyal de sortida del modulador COFDM ha de ser un senyal analògic que es correspongui amb la suma de totes les portadores, cadascuna modulada en diferents tipus de QAM amb els símbols corresponents. Aquestes portadores tenen valors entorn d'un valor central, que és el de la freqüència intermèdia (F_i) de 36,15 MHz, i la diferència entre la més alta i la més baixa és de 8 MHz (amplada de banda del canal).

Per a això, s'ha de convertir el senyal digital que s'obté a la sortida del bloc IFFT en senyal analògic amb un convertidor D/A adequat.

2.3.6. Codificació jeràrquica

El DVB-T també permet una codificació QAM no uniforme caracteritzada per una major distància entre estats adjacents que pertanyen a quadrants diferents que entre estats adjacents del mateix quadrant, tal com es veu en la constel·lació de la figura següent:

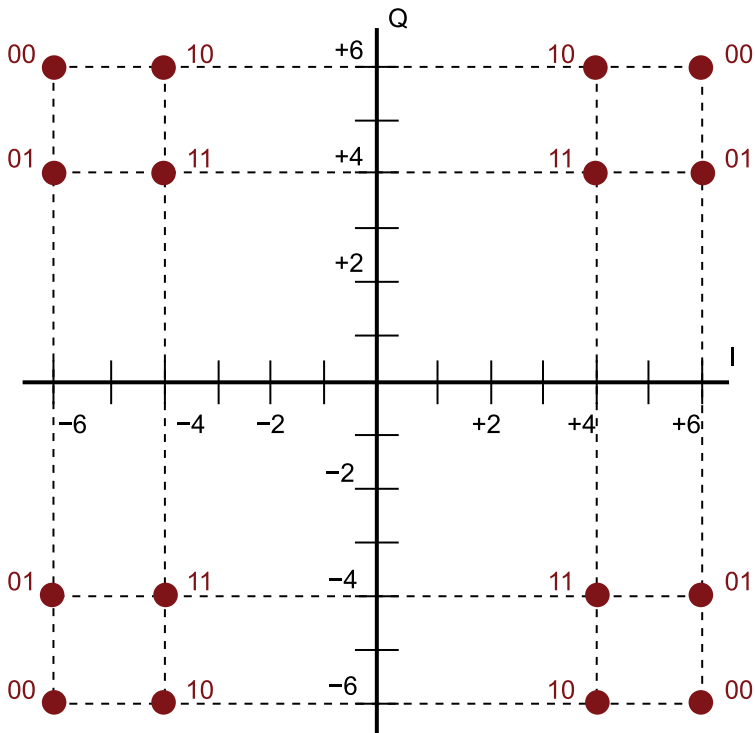


Figura 12. Constel·lació d'una modulació 16-QAM no uniforme

Amb la modulació no uniforme es poden enviar dos tipus de senyals simultàniament amb prioritats diferents: els 2 bits de més pes es modulen en QPSK i transporten el programa prioritari, la resta de bits es modula amb una QAM menys sòlida i constitueix el programa de menys prioritats que requereix condicions de millor SNR o CNR (relació portadora-soroll). El flux prioritari és molt robust però la velocitat binària és més baixa que la del flux secundari, que, per contra, és menys robust contra els errors.

Aquesta codificació amb prioritats es pot aplicar a la transmissió de diferents programes pel mateix canal, que es poden rebre en diferents condicions de soroll. També es pot enviar el mateix programa que es pot reproduir amb diferent definició (SD o HD) en funció de les condicions de recepció.

2.3.7. Paràmetres DVB-T

Els paràmetres dels modes 2K i 8K es resumeixen en la taula següent:

Paràmetre	8 k / 8 MHz	8 k / 7 MHz	2 k / 8 MHz	2 k / 7 MHz
Nre. de portadores total N'	6.817 (0 a 6.816)		1.705 (0 a 1.704)	
Nre. de portadores útils (dades)	6.048		1.512	
SPC (portadores disperses)	524		131	
CPC (portadores contínues)	177		45	
TPS (portadores de senyalització)	68		17	

Paràmetre	8 k / 8 MHz	8 k / 7 MHz	2 k / 8 MHz	2 k / 7 MHz
Durada del símbol útil T_S	896 μ s	1.024 μ s	224 μ s	256 μ s
Espaiat de les portadores $1/T_S$	1116.07 Hz	976.65 Hz	4464.28 Hz	3906.25 Hz
Diferència entre portadores extremes	7,61 MHz	6,66 MHz	7,61 MHz	6,66 MHz
Interval de seguretat Δ	$T_S/4, T_S/8, T_S/16$ o $T_S/32$			
Modulació de les portadores	QPSK, 16-QAM o 64-QAM			
Modes jeràrquics	$\alpha = 1$ o $\alpha = 2$ o $\alpha = 4$			

Paràmetres de l'OFDM terrestre en mode 8k i 2k

2.3.8. Càlcul de l'eficiència espectral i la velocitat binària en DVB-T

El flux binari brut en OFDM es calcula com:

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

La velocitat binària útil serà:

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

Exemple

Suposem una transmissió OFDM amb les dades següents:

- 8 MHz de canal
- Mode 8K
- Modulació 64-QAM ($64 = 2^6$, és a dir, 6 bits per símbol)
- Interval de guarda $1/4$
- Factor taxa de codi o *code rate* del codi convolutiu $r_c = 2/3$

Les dades per a calcular els fluxos seran:

- Durada del símbol: $T_S = T_U + \Delta = 1120 \mu$ s
- Freqüència dels símbols: $f_S = 1/T_S = 892,857$
- Nombre de bits per portadora (64-QAM): $n_{bp} = 6$
- Nombre de portadores actives: $N_p = 6.048$

Amb aquestes dades, el flux brut val:

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

I el flux útil:

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

Amb aquesta velocitat, típica en una transmissió DVB-T, depenent de la relació entre la qualitat d'imatge i el nombre de programes que s'han d'enviar, es podria transmetre en el mateix múltiplex de 4 a 6 programes de televisió.

I l'eficiència espectral útil valdrà:

Lectura de la fórmula

f_S : freqüència dels símbols (símbols/s)
 $f_S = 1/T_S$
 T_S : durada del símbol
 n_{bp} : nombre de bits per portadora
 N_p : nombre de portadores actives

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

Bibliografia

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

