

• MPEG 2 Áudio Camada 3: o mapeamento tempo-frequência usa banco de filtros polifásicos para a divisão nas 32 bandas principais, seguida de uma filtragem usando *Modified Discret Coseno Transformer* (MDCT) para subdivisão em 18 sub-bandas de cada uma das 32 sub-bandas principais, resultando em 576 sub-bandas, provendo um cálculo mais preciso dos limiares de mascaramento.

O quantizador/codificador é mais sofisticado e permite tramas de formato variável. A redundância é acompanhada por um processo de codificação de Huffman, a fim de aproveitar as propriedades estatísticas do sinal de saída do estágio psicoacústico.

O empacotador da trama inclui uma reserva de bits que permite que mais bits sejam usados em porções do sinal que deles necessitem, tornando-se assim num formato *Variable Bit Rate* (BR).

A Camada 3 tem como objeto aplicações em que uma necessidade crítica de baixos débitos binários justifique o sofisticado sistema de codificação que exige grande poder computacional. Permite resultados de alta qualidade a taxas de transmissão muito baixas, como 64Kbps. Pode ser usada em rede de Rede Digital de Serviços Integrados (RDSI), que pode transportar áudio em tempo real com qualidade de CD.

O nível de compressão e de qualidade alcançados por este sistema devem-se principalmente à utilização do processo de codificação por sub-banda, e baseado num modelo psicoacústico do ouvido humano que permite mascarar a percepção de qualquer ruído introduzido no sinal de áudio após o processo de compressão.

4 PADRÕES DE TV DIGITAL

Neste capítulo serão apresentadas as principais características de transmissão e recepção dos três primeiros padrões de TV Digital, a saber:

- a) ATSC: *Advanced Television System Comitee* (Americano)
- b) DVB –T: *Digital Video Broadcasting – Terrestrial* (Europeu)
- c) ISDB – T: *Integrated System Digital Broadcasting – Terrestrial* (Japonês)

Uma imagem de vídeo de alta definição como a de HDTV (*High Definition TV*), quando digitalizada, converte-se em um feixe digital de altíssima taxa de bits da ordem de 1Gbps, velocidade incompatível com a largura de banda de 6MHz reservada para transmissão de um canal de TV. Por essa razão tornou-se necessário comprimir o feixe digital de 1Gbps para uma taxa de bits de aproximadamente 20Mbps.

Essa alta taxa de compressão foi alcançada pela aplicação do algoritmo de compressão denominado MPEG2, igualmente adotado pelos três padrões de TV Digital.

Não somente a imagem, mas também o som sofreu melhorias consideráveis na qualidade, incorporando facilidades para permitir a utilização do som multicanal (mais de dois canais). Nesse caso, foi também necessário comprimir o sinal de áudio digitalizado. Quanto ao áudio, cada padrão de TV Digital escolheu algoritmos de

digitalização e/ou compressão diferentes, que serão comentados quando da descrição de cada um dos padrões.

Além do áudio e vídeo, algumas informações complementares e facilidades operacionais são multiplexadas às informações comprimidas de áudio e vídeo para formar o feixe digital (aproximadamente 20Mbps) que entra no Modulador.

O Modulador, independentemente do padrão, é constituído basicamente por três blocos funcionais, a saber:

- *Codificador*: confere a necessária robustez a interferências ao sinal digitalizado.
- *Estruturador de quadro*: monta a estrutura de quadro de sinal digital e acrescenta a estrutura de quadro de sinal digital e informações de sincronismo e controle.
- *Modulador 8VSB ou COFDM*: efetua a modulação da portadora ou portadoras, e transporta o sinal modulado para a Frequência Intermediária (FI), ocupando um canal de 6MHz de banda.

Após a modulação, segue-se uma etapa de conversão de frequência que transfere o sinal modulado em FI para a frequência do canal de TV Digital desejado. A etapa de conversão segue a de excitação e amplificação de potência, onde então o sinal modulado será inserido na antena de transmissão.

4.1 Sistema ou padrão ATSC

O sistema americano ATSC foi introduzido nos Estados Unidos em 1998, e tem como principal característica ser monoportadora (portadora única) com modulação de amplitude de 8 níveis na versão *8 Vestigial Sideband* (8VSB), ocupando a mesma banda de 6MHz utilizada no sistema analógico. A Figura 28 mostra a estrutura de um transmissor com modulação 8VSB do sistema ATSC.

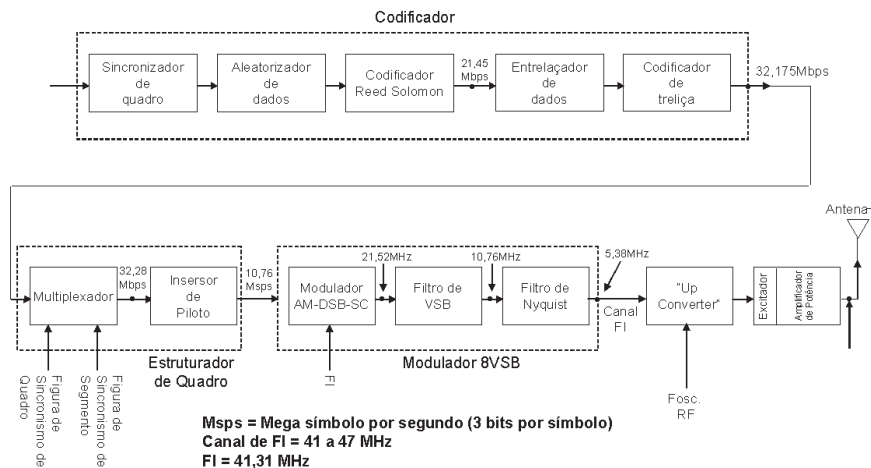


Figura 28 Diagrama do modulador 8VSB

O sistema de compressão de sinal de vídeo é o MPEG2. Esse vídeo comprimido, mais os canais de som comprimido e mais o canal de dados complementares multiplexados formam o feixe digital de taxa de bits constante (19,39Mbps) que entra no modulador. A Figura 28 detalha um diagrama em blocos do Modulador 8VSB completo e circuitos complementares.

Serão a seguir descritas, de forma resumida, as funções de cada bloco que compõe os macroblocos do Codificador, Estruturador de Quadro e Modulador 8VSB.

4.1.1 Codificador

O macrobloco do Codificador é formado pelos blocos do Sincronização de Quadro, Aleatorizador de Dados (*Randomizer*), Codificador *Reed Solomon*, Entrelaçador de Dados e o Codificador de Treliça (*Trellis Encoder*).

4.1.1.1 Sincronizador de quadro

O feixe digital de 19,39Mbps que entra neste bloco é formado por pacotes seqüenciais de 188 bytes, sendo 1 byte de sincronismo (identifica o início do pacote) e 187 bytes de informação útil (dados úteis). Este bloco identifica os pontos de início e o fim de cada pacote e remove o byte de sincronismo, que não tem mais utilidade alguma, antes de injetá-los no Aleatorizador de Dados.

4.1.1.2 *Randomizer* ou aleatorizador

A sua principal função é tornar aleatória a distribuição dos bytes dentro de cada pacote de dados. Esta aleatorização dos bytes é necessária para evitar que, devido à repetição de padrões de dados, o espectro de frequências do sinal modulado possa conter energia concentrada em determinadas frequências deste espectro. Se isso acontecesse, poderia comprometer a imunidade às interferências do sinal transmitido de HDTV e aumentaria a possibilidade de interferência em outros canais de TV, principalmente nos de TV analógica.

O aleatorizador produz um espectro semelhante ao ruído branco e é constituído basicamente por um gerador de *Pseudo Random Bynary Sequence* (PRBS) somado com um somador módulo 2 ao sinal útil de dados.

4.1.1.3 *Reed Solomon*

Este codificador, mostrado na Figura 29, tem como função principal permitir ao receptor detectar e corrigir erros que apareçam no sinal digital demodulado e regenerado. Ele é um *Forward Error Correction Code* (FEC) pertencente à família dos *Bloc Codes* do tipo BCH.

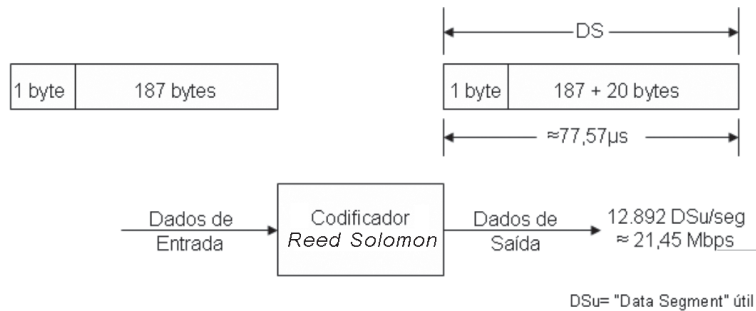


Figura 29 Codificador *Reed Solomon*. Dados de entrada e saída

Para cada 187 bytes ele acrescenta 20 bytes de redundância. O conjunto de 207 bytes assim formado é nomeado de *Data Segment usefull* (DS_U). Esse codificador permite ao receptor detectar e corrigir até 10 bytes errados recebidos em cada DS_U . Este codificador *Reed Solomon*, devido ao acréscimo de bytes de redundância, aumenta a taxa de bits do sinal digital de entrada que era de 19,39Mbps para 21,45Mbps, o que que é equivalente a 12.892 DS_U por segundo. A Figura 29 ilustra os sinais na entrada e saída do codificador *Reed Solomon*.

4.1.1.4 Entrelaçador de dados ou *Data Interleaver*

Tem por principal função embaralhar os bytes do canal de entrada. O objetivo deste embaralhamento é permitir ao desembaralhador, localizado no receptor, espalhar uniformemente os erros causados por interferências do tipo *burst* (ruído impulsivo, por exemplo) que ocorre na transmissão do canal de TV. Interferências desse tipo usualmente provocam erros em cascata no sinal digital demodulado pelo receptor. O decodificador *Reed Solomon* perde eficiência quando os erros aparecem todos agrupados seqüencialmente. Ao permitir espalhar esses erros, o desembaralhador propicia um funcionamento mais eficiente do decodificador *Reed Solomon*.

Este desembaralhador dispersa os dados sobre um intervalo de 4ms, equivalente a 52 segmentos DS_U .

A taxa de *bits* na saída deste bloco é a mesma presente na sua entrada.

A operação deste desembaralhador está sincronizada à figura do sincronismo de quadro (*Frame Sync*) do sistema (veja o bloco *Estruturador de Quadro*).

4.1.1.5 Codificador convolucional ou *Trellis Encoder*

Este codificador age de forma complementar ao codificador *Reed Solomon* e também tem por principal objetivo detectar e corrigir erros introduzidos pelas interferências no canal de televisão. O que o difere do *Reed Solomon* é a maneira de corrigir os erros. Tecnicamente falando, ele é um codificador Convolucional do tipo *Ungerboeck*

Code linear de quatro estados. Para cada dois bits gerados na sua entrada são gerados três bits na sua saída, sendo o primeiro bit de entrada copiado na saída. O segundo bit de entrada gera dois bits na saída, usando um codificador de razão 1/2. Assim, quatro possíveis estados de entrada (2^2) resultam em oito possíveis estados na saída (2^3). Obtém-se, portanto um codificador de treliça de razão 2/3.

Cada um desses três bits de saída é chamado de símbolo. Existem, portanto oito (2^3) símbolos diferentes, e cada símbolo irá representar um estado diferente de amplitude do sinal modulado no bloco modulador.

Na entrada do codificador, um *Data Segment* (DS) representa 207 bytes (DS_u) e mais um byte de sincronismo do DS (veja a Figura 30). Ao passar pelo codificador de treliça de razão 2/3, os 1.656 bits dos 207 bytes e os 8 bits de sincronismo se transformam, respectivamente, em 2.484 bits e 12 bits, ou seja, 828 símbolos e 4 símbolos.

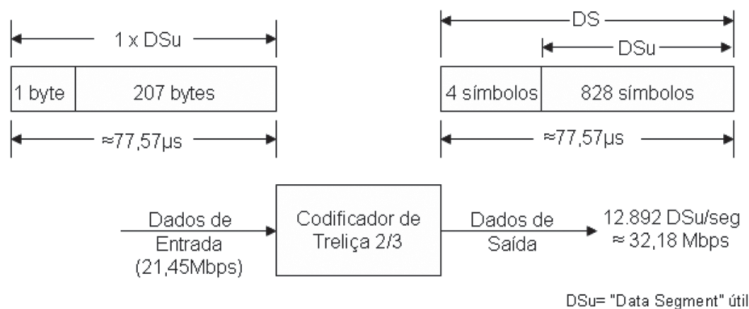


Figura 30 Codificador de treliça - Dados na entrada e saída

A taxa de bits na saída do codificador aumentou na razão de 3/2; ou seja, passou de aproximadamente 21,45Mbps para 32,175Mbps.

4.1.2 Estruturador de quadro

O macrobloco do Estruturador de Quadro é formado pelos blocos do Multiplexador e do Inserir de piloto.

4.1.2.1 Multiplexador

A principal função deste bloco é, a partir dos *Data Segment* (DS) de entrada, montá-los dentro da estrutura de um quadro, como mostrado na Figura 31. Cada quadro (*Data Frame*) consiste em dois campos (*Data Field*), cada um contendo 313 DSs (*Data Segment*).

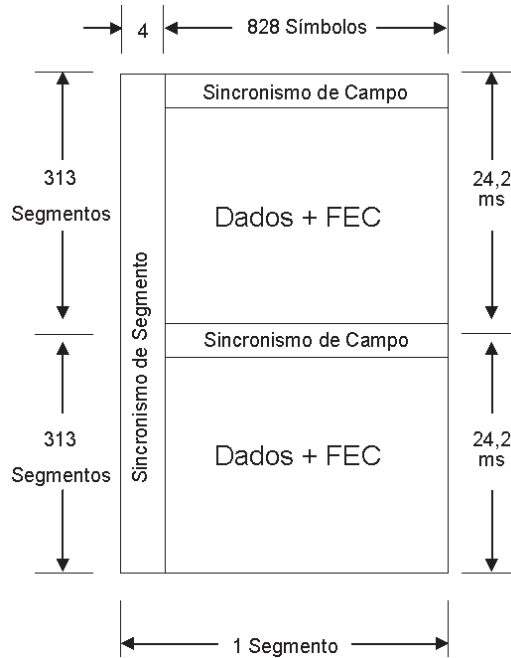


Figura 31 Estrutura do quadro

O primeiro DS de cada campo contém o sinal ou figura de sincronismo de quadro (*Data Field Sync*). Esta figura permite ao receptor identificar os campos em que os DSs foram agrupados e também provê a seqüência de treinamento utilizada pelo equalizador do receptor.

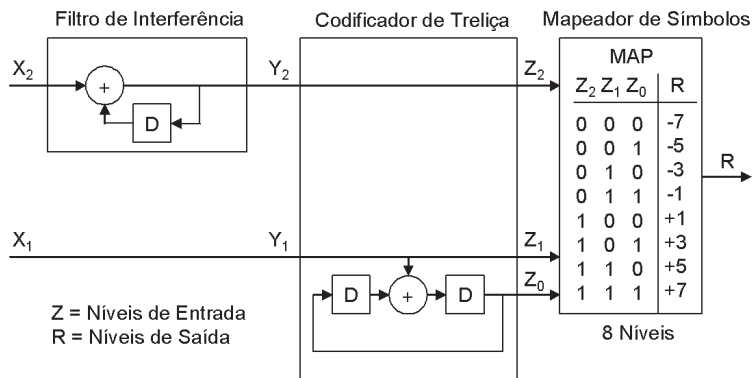


Figura 32 Mapeador de símbolos

Cada segmento carrega nos quatro primeiros símbolos a figura de sincronismo do segmento (*Data Field Sync*) que serve para o receptor localizar o início de cada segmento.

Multiplexador acrescenta as figuras do sincronismo de quadro (*Data Field Sync*) e do sincronismo de segmento (*Data Segment Sync*), geradas externamente aos DSs de entrada para compor o sinal de saída do multiplexador.

A taxa de bits na saída do multiplexador é agora de apenas 32,28Mbps, ou seja, aproximadamente 10,76 Mega símbolos por segundo.

4.1.2.2 Inersor de piloto

Neste bloco o sinal digital é convertido, símbolo por símbolo, em um dos oito níveis nominais de tensão, conforme a equivalência mostrada na Figura 32. Um pequeno sinal DC (+1,25) é acrescentado a cada símbolo, de modo que na modulação 8VSB este sinal gere um piloto em fase e na mesma frequência da portadora suprimida pelo modulador AM-DSB-SC que sucede ao bloco do Inersor de Piloto.

Esse resíduo de portadora (piloto) permite ao receptor realizar a detecção síncrona do sinal 8VSB. A potência deste piloto está aproximadamente a 11,3dB abaixo da potência média do sinal de dados modulado em 8VSB. Isso corresponde a aproximadamente 7% da potência total transmitida.

4.1.3 Modulador 8VSB

O bloco Modulador 8VSB é formado pelos blocos AM-DSB-SC, Filtro de VSB e Filtro de Nyquist. A Figura 28 ilustra esses três blocos que constituem o modulador 8VSB.

4.1.3.1 Modulador AM-DSB-SC (*Amplitude Modulated – Double Side Band-Suppressed Carrier*)

A principal função deste bloco é modular uma portadora senoidal na Frequência Intermediária (FI) com os oito possíveis estados de amplitude, mais o componente DC do piloto do sinal de entrada (saída do bloco multiplexador). Essa modulação é de amplitude, com a dupla banda lateral e portadora suprimida (AM-DSB-SC). A pequena tensão DC do piloto gera, na saída do modulador, um resíduo de portadora na FI. A banda de frequências ocupada pelo sinal modulado é de 21,52MHz (2 x 10,76MHz). A banda útil do sinal modulador é igual à sua taxa de símbolos, ou seja, 10,76MHz.

4.1.3.2 Filtro de VSB (*Vestigial Side Band*)

A principal função deste bloco é filtrar o sinal de AM-DSB para reduzir a banda ocupada por este sinal (21,52MHz) que está muito acima da banda de 6MHz reser-

vada para transmissão do canal de televisão. O sinal resultante dessa filtragem ocupa a banda lateral superior do sinal AM-DSB e um vestígio muito pequeno da banda lateral inferior. Nesse sinal, a frequência do resíduo de portadora (piloto) está apenas 310kHz acima do limite inferior da banda ocupada pelo sinal na saída do filtro.

De uma forma simplificada, pode-se dizer que a banda do sinal na saída do filtro é de 10,76MHz (21,52MHz: 2).

Note-se que esta banda ainda é significativamente superior à banda-objetivo de 6MHz.

4.1.3.3 Filtro de Nyquist

A principal função deste bloco é afinar o sinal de 10,76MHz de banda a banda do canal de televisão (6MHz). Para tal, utiliza-se um filtro de Nyquist com coeficiente de *roll off* próximo de zero. Este filtro tem a propriedade de reduzir a banda do sinal praticamente pela metade, sem provocar Interferência Intersimbólica (ISI).

Com isso, consegue-se reduzir a banda do sinal à saída do bloco para, aproximadamente, 5,38MHz (10,76MHz: 2), valor que cabe perfeitamente dentro da banda de 6MHz do canal de televisão.

A Figura 33 mostra a ocupação do canal de televisão pelo sinal modulado em 8VSB.

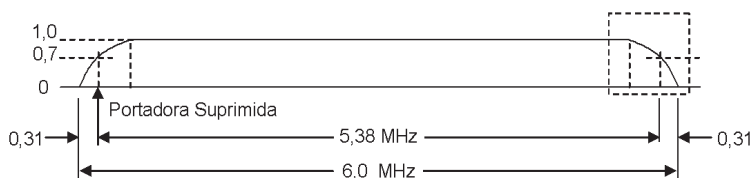


Figura 33 Ocupação do canal (normal)

A saída deste bloco contém então um sinal de televisão digital modulado em 8VSB, e confinado em uma banda de 6MHz, na frequência intermediária de 44MHz (padrão brasileiro), que vai de 41MHz a 47MHz.

Para chegar até a antena transmissora, esse sinal precisa ainda ser convertido para a frequência do canal de TV autorizado (usando um *up converter*) e amplificado através de um circuito excitador seguido de um amplificador de potência.

4.1.4 Canal de som

Para o canal de som, o ATSC escolheu o padrão AC3 Dolby Digital, que é o mesmo padrão usado para os discos DVD. Esse padrão permite configurações de

áudio desde um canal (Mono) até seis canais (Multicanal). Utiliza um algoritmo proprietário de compressão do sinal conhecido genericamente por *perceptual coding*. Com essa técnica, é possível reduzir-se substancialmente as taxas de bits, sem uma perda sensível na qualidade do som. No modo multicanal com seis canais (chamado de 5.1), após a compressão, a taxa útil de bits é de 384Kbps.

4.2 Sistema padrão DVB-T

O sistema europeu de televisão digital teve os seus principais parâmetros definidos em junho de 1996, por meio do documento *DVB Document AO12 for Digital Terrestrial Television*. Esse documento contempla de forma generalizada a versão *Standard* e a versão HDTV da TV Digital.

Os europeus optaram por implantar a versão *Standard*, que permitia mais de um canal de TV Digital em cada banda de 8MHz (padrão europeu). Foi somente em 1998, com a decisão da Austrália, que o padrão HDTV teve a sua introdução no mercado mundial.

O Brasil foi o primeiro país que, entre 1999 e 2000, testou em laboratório e em campo a versão HDTV para uma banda de 6MHz (banda adotada no Brasil e em outros países).

O padrão DVB-T se diferencia fundamentalmente da ATSC no método de modulação empregado. O método usado pelo ATSC é de monoportadora modulada em amplitude com banda lateral vestigial (8VSB). O método usado pelo DVB-T é o de multiportadora (milhares) modulada em QPSK, 16QAM ou 64QAM e multiplexadas por divisão de frequência (FDM).

Esse método de modulação é conhecido por *Coded Orthogonal Frequency Multiplex* (COFDM) em que a palavra *coded* significa que o sinal digital antes de ingressar no modulador OFDM é codificado por código corretor de erro que aumenta significativamente a robustez do sinal digital às interferências providas do meio de transmissão.

Da mesma forma que no ATSC, pode-se distinguir no DVB-T três macroblocos que compõem o Modulador COFDM, a saber: o bloco Codificador, o bloco Estruturador de Quadro e o bloco Modulador OFDM. A Figura 34 ilustra o diagrama em blocos do Modulador COFDM. Serão a seguir descritas, de forma resumida, as funções de cada bloco que compõe os macroblocos supracitados.

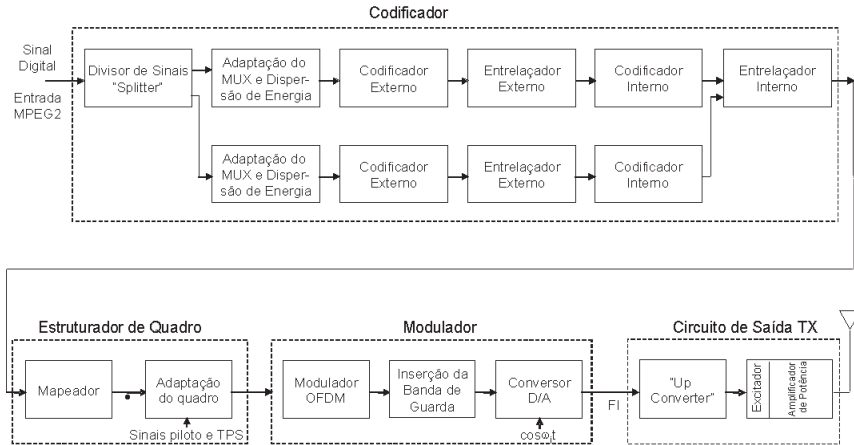


Figura 34 Modulador COFDM – DVB-T

4.2.1 Codificador

De forma geral, o Codificador possui as mesmas funções do Codificador ATSC e é implementado com os mesmos blocos funcionais. Serão, portanto, enfatizadas apenas as diferenças significativas.

Ele é formado pelos blocos Divisor de Sinais *Splitter*, Adaptação de Mux e Dispersão de Energia, Codificador Externo, Entrelaçador Externo, Codificador Interno e Entrelaçador Interno.

4.2.1.1 Divisor de sinais (*Splitter*)

No caso de DVB-T, o sinal digital de entrada pode ser separado em dois feixes com conteúdos digitais diferentes, para formar a estrutura hierárquica. Assim, por exemplo, um feixe poderá conter um sinal de TV digital *Standard* e o outro feixe um sinal de outro canal de TV digital destinado ao serviço móvel.

O bloco Divisor de Sinais efetua a divisão do feixe original de dados.

Para um canal único de HDTV, será utilizado apenas um feixe digital e, portanto, existirá sinal digital apenas em uma das saídas do Divisor de Sinais.

Uma diferença fundamental entre o padrão ATSC e o DSV-T é que no ATSC o sinal digital de entrada tem uma taxa de bits constante de 19,39Mbps, independentemente do conteúdo digital do feixe. No DVB-T, essa taxa de bits é variável dependendo da configuração do sistema. Assim, modulações das subportadoras com menor número de estados e *code rate* menores do Codificador Interno (menores as frações do *code rate*) levam a taxa de bits menores para o sinal digital de entrada. Como exemplo,

uma modulação em QPSK (4 estados) leva uma taxa útil de bits na entrada menor que uma modulação em 16QAM (16 estados) ou 64 QAM (64 estados). Da mesma forma, um *code rate* de 1/2 leva uma taxa de bits menor que um *code rate* de 3/4.

O uso de diferentes métodos de modulação e diferentes *code rate* altera não só a taxa útil de bits, mas também a imunidade do sinal digital a interferências. Normalmente, quanto mais robusto à interferência é um sinal digital modulado, menor é a taxa útil de bits disponíveis.

Para melhor entendimento inicial dos conceitos básicos envolvidos, será suposto que o sinal digital à saída do Divisor de Sinais seja único e imaginado a princípio como um sinal de HDTV. Quando abordarmos a transmissão hierárquica (veja o item 4.2.6), serão feitas as considerações sobre a existência dos dois feixes digitais na saída do *Splitter*.

4.2.1.2 Adaptação do Mux e dispersão de energia

O sinal digital proveniente do Mux MPEG2 (sinal de vídeo + som + dados) aparece na forma mostrada na Figura 35, em que cada pacote é formado por 187 bytes de carga útil (*payload*) e 1 byte de sincronismo (*Sync byte*).

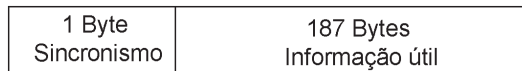


Figura 35 Pacote de MPEG2

A seguir, esses pacotes sofrem um processo de aleatorização dos dados cuja função é idêntica à descrita para o bloco Aleatorizador de Dados do ATSC (veja o item 4.1.1.2). Após a aleatorização, os pacotes de dados são organizados, como mostrado na Figura 36, e injetados no bloco do Codificador Externo.

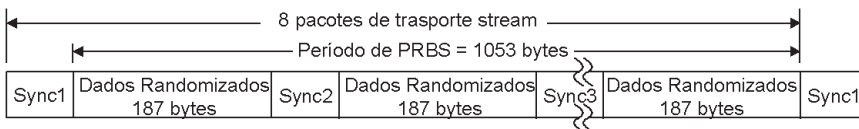


Figura 36 Pacotes randomizados. Bytes de sincronismo e bytes de dados randomizados

4.2.1.3 Codificador externo

Este codificador tem a mesma função descrita para o codificador *Reed Solomon* do ATSC (veja o item 4.1.1.3) e é um FEC (*Forward Error Corrector*) do mesmo tipo que o do ATSC. A única diferença é que ele aumenta 16 bytes de redundância em

vez de 20 bytes acrescentados pelo ATSC. Isso diminui ligeiramente a robustez do sistema às interferências.

A Figura 37 ilustra os pacotes de dados na saída do codificador já protegidos pelos 16 bytes de paridade.

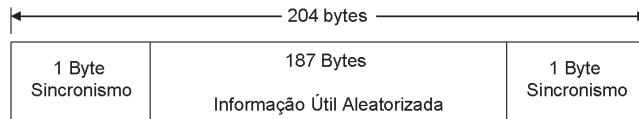


Figura 37 Pacotes protegidos de erros pelo Teed Solomon

Devido à presença de bytes de paridade, este bloco aumenta em aproximadamente 1,0851 vezes, $(204/188)$ a taxa de bits do sinal digital.

4.2.1.4 Entrelaçador externo

Este bloco tem a mesma função do bloco Entrelaçador de Dados do ATSC (veja item 4.1.1.4).

Após o entrelaçamento de bytes de profundidade igual a 12 (I-12), os pacotes se apresentam como na Figura 38. O entrelaçador utilizado é do tipo *Convolutional byte-wise*. O processo de embaralhamento convolutivo é baseado na abordagem de Forney, que é compatível com a abordagem de Ramsey tipo III para $I = 12$. Esse processo não introduz alterações na taxa de bits do sinal na entrada.



Figura 38 Estrutura de dados após entrelaçamento externo de bytes

4.2.1.5 Codificador interno

Este codificador pertence à família dos códigos convolucionais punctuados e está baseado em um código-mãe cuja razão de código (*code rate*) é de $1/2$, ou seja, para cada bit de entrada saem dois na saída. A função deste codificador é igual e complementar à codificação *Reed Solomon*, ou seja, permitir ao receptor detectar e corrigir erros introduzidos por interferências presentes no meio de transmissão.

O codificador convolutivo usado no DVB-T é semelhante ao codificador treliça usado no ATSC. A principal diferença é que o *code rate* no ATSC é único e igual a $2/3$, enquanto no DVB-T, a partir do *code rate*-mãe de $1/2$, através do processo de punção, é possível escolher outros *code rates*. Assim, pode-se configurar o Codificador Interno para trabalhar com os *code rate* de $1/2$, $2/3$, $3/4$, $5/6$ e $7/8$.

Note-se que agora a taxa de bits na saída do codificador, em relação à entrada, depende do *code rate* escolhido. Quanto menor for o valor da fração, maior será a taxa de bits de saída em relação à entrada.

A expressão abaixo permite calcular a taxa de bits (*bit rate*) na saída do codificador em função da taxa de bits na entrada e do valor do *code rate*:

$$\text{Taxa de bits na saída} = \text{Taxa de bits na entrada} \times \frac{1}{\text{coderate}} \quad (8)$$

Exemplo: para *code rate* de 3/4: Taxa de bits de saída = Taxa de bits de entrada x 4/3.

Quanto menor for a fração do *code rate*, menor é a diferença entre as taxas de bits de entrada e saída, mas pior é a robustez a interferências que o código confere ao sistema. Assim, por exemplo, um *code rate* de 1/2 dobra a taxa de bits do sinal à saída, mas confere muito mais robustez ao sistema do que um *code rate* de 5/6, cuja taxa de bits na saída é apenas 1,2 vezes maior que a de entrada.

Note-se, entretanto, que cada vez que se utiliza um *code rate* mais robusto, diminui-se a taxa de bits disponível na entrada do Modulador e, portanto, diminui a definição da imagem.

4.2.1.6 Entrelaçador interno

Este entrelaçador é constituído por três blocos funcionais distintos, a saber: Demultiplexador, Entrelaçador de Blocos e Entrelaçador de Símbolos (veja a Figura 28). As funções resumidas de cada um desses blocos estão a seguir descritas.

- *Demultiplexador*: o demultiplexador divide o feixe de entrada em dois feixes de saída, para a modulação QPSK ou quatro feixes de saída para a modulação 16QAM, ou ainda seis feixes para a modulação 64QAM;
- *Entrelaçador de blocos*: os entrelaçadores em número de 2 (QPSK), 4 (16QAM) ou 6 (64QAM), embaralham os bits contidos em blocos de 126 bits em cada bloco.

Como cada símbolo no OFDM tem 1512 subportadoras úteis no modo 2K e 6.048 subportadoras úteis no modo 8K, serão necessários 12 conjuntos de blocos em paralelo para transmitir um símbolo no modo 2K ou 48 conjuntos no modo 8K.

Calculando $12 \times 126 = 1.512$ (modo 2K):

a) $48 \times 126 = 6.048$ (modo 8K)

Como o número de subportadoras utilizadas é uma constante para um dado modo de operação, é fácil verificar que o número de bits por símbolo (Nbits) depende do método de modulação.

A equação geral será:

$$\text{Nbit/s} = "v" \times 1512 \text{ (modo 2K) (9) e}$$

$$\text{Nbit/s} = "v" \times 6048 \text{ (modo 8K) (10)}$$

Onde Nbit/s = número de bits por segundo

"v" = número de bits por estado da subportadora

Então: QPSK "v" = 2 Nbit/s = 2 x 1.512 = 3.024

16QAM "v" = 4 Nbit/s = 4 x 1.512 = 6.048

64QAM "v" = 6 Nbit/s = 6 x 1.512 = 9.072

Note-se que o embaralhamento é feito exclusivamente nos bits úteis.

Na saída do Embaralhador de Blocos, os "v" bits (2, 4 ou 6) são agrupados para corresponder a um dos estados da subportadora que vai ser modulada. Assim, a saída do circuito agrupado será formada por seqüências de "v" bits, em que o primeiro bit, o mais significativo, será representado pela saída do entrelaçador 10 e assim sucessivamente. (veja a Figura 24).

- *Entrelaçador de Símbolo*: os sinais agrupados em "v" bits (2, 4 ou 6 bits) são seqüencializados para formar um símbolo OFDM, em que cada uma das 1.512 subportadoras no modo 2K ou 6.048 subportadoras no modo 8K assumirão um dos 2^v estados possíveis. O embaralhamento dos sinais digitais de "v" bits será realizado dentro do próprio símbolo em que estão inseridos.

De uma forma geral, os embaralhamentos providos pelo macrobloco do Entrelaçador Interno têm uma função global semelhante à exercida pelo Entrelaçador Externo, ou seja, permitir que o Decodificador Interno, de forma organizada, trabalhe mais eficientemente possível para evitar que *burst* de erros introduzidos no meio de transmissão venham a degradar a recepção do sinal.

4.2.2 Estruturador de quadro

O bloco Estruturador de Quadro tem como principais funções mapear o sinal de entrada dentro de uma estrutura de quadro adequada, e inserir nesta estrutura os sinais que terão a responsabilidade de enviar as configurações do receptor, ou *Transmission Parameter Signals* (TPS), e as informações transportadas pelos pilotos para o sincronismo de quadro, sincronismo de frequência, estimação de canal e identificação do modo de transmissão.

Este macrobloco é constituído pelos seguintes blocos funcionais: Mapeador e Estruturador de Quadro.

4.2.2.1 Mapeador

O Mapeador permite estabelecer uma relação entre os “v” bits (2, 4 ou 6 bits) oriundos do bloco Entrelaçador de Símbolos e os estados de fase/amplitude das subportadoras da modulação OFDM.

Assim, as figuras 39a, 39b e 39c utilizam o código de Gray para mapear os “v” bits nos respectivos estados das modulações em QPSK, 16QAM e 64QAM.

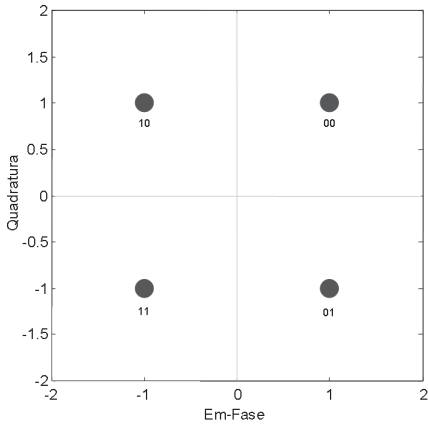


Figura 39a Constelação QPSK

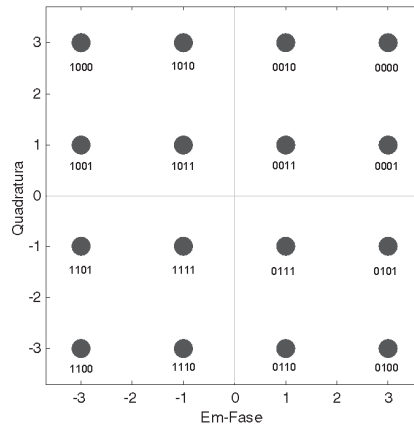


Figura 39b Constelação 16 QAM

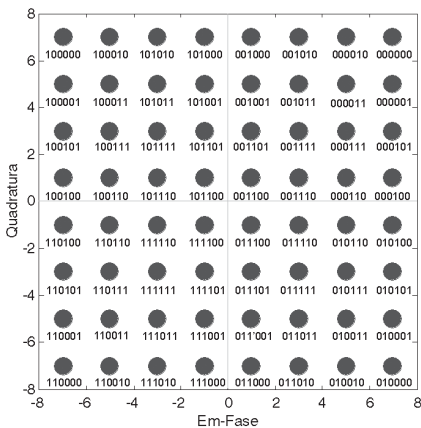


Figura 39c Constelação 64QAM

Por exemplo, numa subportadora modulada em 16QAM (veja a Figura 39b), nos 4 bits que identificam um estado, no código de Gray, os dois primeiros bits identificam o quadrante em que se encontra o estado e os outros dois bits identificam a posição do estado dentro do quadrante. Por exemplo, a seqüência 1011 identifica um determinado estado do segundo quadrante (veja a Figura 39b).

Na modulação hierárquica, dois feixes digitais com diferentes modulações podem ser mapeados em um único feixe de dados. Entretanto, a modulação hierárquica será objeto de um capítulo à parte (veja o item 4.2.6).

4.2.2.2 Adaptação de quadro

Aos sinais mapeados pelo Mapeador, são acrescentados os sinais de piloto e TPS, para compor a arquitetura de quadro do COFDM.

A Tabela 2 resume os valores dos principais parâmetros de símbolo COFDM. Os valores dados na tabela só dependem do modo 2K ou 8K. Não dependem do método de modulação escolhido, do valor do *code rate* do FEC convolucional, e nem do valor da banda de guarda escolhida. São valores adotados como básicos pelo grupo que definiu o padrão DVB-T.

TABELA 2

Principais parâmetros do Símbolo OFDM

| Parâmetro | Modo 8K | Modo 2K |
|---|-------------|-------------|
| Número de portadoras K | 6817 | 1705 |
| Número da portadora inferior Kmin | 0 | 0 |
| Número da portadora superior Kmax | 6816 | 1704 |
| Duração de Tu | 1194.667us | 298.6667us |
| Espaçamento de portadoras 1/Tu | 0.837054kHz | 3.348214kHz |
| Espaçamento entre a portadora inferior e superior | 5.71MHz | 5.71MHz |

Note que o número total de subportadoras é maior que o número de subportadoras usadas para transmitir o feixe digital útil presente na entrada do Estruturador de Quadro. Essa diferença prende-se ao fato que parte dessas subportadoras são utilizadas para a transmissão das informações contidas nos pilotos, como já foi mencionado.

A transmissão do sinal digital composto se faz pela transmissão seqüencial dos símbolos OFDM. A cada 1.194,667 μ s no modo 8K e 298,666 μ s no modo 2K, é enviada a parte útil do símbolo (Tu). Note que esses valores são válidos somente para o canal de TV de 6MHz de banda.

Cada 68 símbolos OFDM formam um quadro e cada quatro quadros constituem um superquadro. Cada símbolo tem duração de Ts, e esta duração é composta de duas partes:

$$T_s = T_u + \Delta \quad (11)$$

onde:

Tu = tempo útil do símbolo e dado pela Tabela 2

Δ = Intervalo de guarda (veja a descrição no item 4.2.3.2)

4.2.3 Modulador

4.2.3.1 Modulador OFDM

Na modulação *Orthogonal Frequency Division Multiplex* (OFDM), as subportadoras formam um conjunto de funções ortogonais entre si, ou seja, a integral do produto entre duas quaisquer destas funções dentro do intervalo de um símbolo é nula.

É essa ortogonalidade que garante que a interferência intersimbólica nas frequências das subportadoras seja nula. A Figura 40 ilustra o efeito da ortogonalidade. Por outro lado, ela garante também que a banda ocupada pelo sinal modulado de OFDM seja a menor possível. Isso permite que o sinal modulado em OFDM caiba dentro do canal de 6MHz de banda da TV Digital.

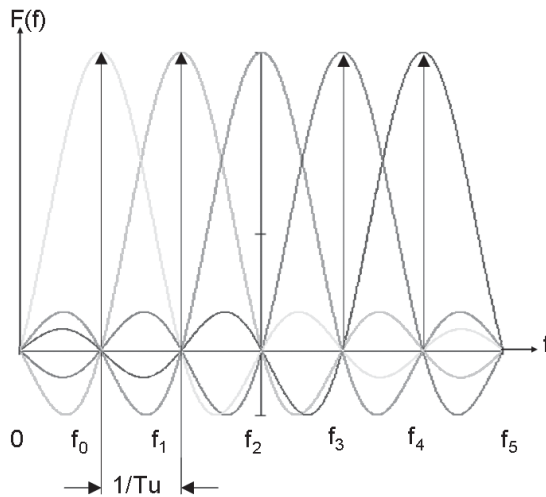


Figura 40 Ortogonalidade da modulação OFDM

Note, na Figura 40, que a frequência da primeira subportadora (f_0) é exatamente igual ao inverso da duração do símbolo ($1/T_u$).

No modo 8K, f_0 vale 837,054Hz e no modo 2K vale 3.348,214Hz. Esses valores calculados de f_0 ($f_0 = 1/T_u$) decorrem da necessidade absoluta de manter a ortogonalidade entre as subportadoras.

Cada subportadora vai agora ser modulada em QPSK, 16QAM ou 64QAM por um dos conjuntos de “v” mapeados pelo bloco posterior (Mapeador). A cada conjunto de “v” bits (2, 4 ou 6 bits) corresponderá um determinado estado de fase/amplitude da subportadora. Durante um símbolo (T_u), os estados das subportadoras permanecem inalterados. No próximo símbolo, elas adquirirão novos estados em fun-

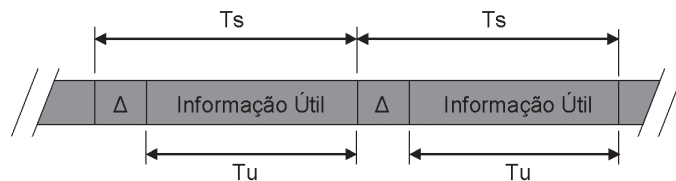
ção dos novos conjuntos de “v” bits que se apresentam na entrada dos moduladores de cada subportadora.

É importante salientar que os estados das subportadoras, dentro da transmissão de um símbolo, carregam a informação do espectro de frequências discretizadas do sinal OFDM. Para convertê-lo ao domínio do tempo, é utilizada uma ferramenta matemática conhecida por *Inverse Fast Fourier Transformer* (IFFT). Todas essas operações de modulação e obtenção pela aplicação do algoritmo IFFT do sinal modulado em OFDM são realizadas digitalmente através de processadores digitais.

O sinal OFDM assim obtido está na forma digital e pronto para ser injetado no próximo bloco, onde será inserida a banda ou intervalo de guarda.

4.2.3.2 Inserção de banda de guarda

A banda ou intervalo de guarda é um intervalo de tempo vazio de informação útil adicionado antes da transmissão de cada símbolo. Esta banda de guarda tem por função eliminar ou diminuir significativamente a interferência entre símbolos quando o sinal interferente é um eco do sinal principal, mas o valor de atraso sofrido por este eco é menor que o valor da banda de guarda. Esses ecos são produzidos por reflexões do sinal principal em obstáculos existentes no espaço entre o transmissor e o receptor.



T_s = Tempo de um símbolo T_u = Tempo do símbolo $k = \Delta/T_u$ k = Razão de guarda

Figura 41 Intervalo de guarda - Definições

A Figura 41 ilustra a transmissão de dois símbolos encabeçados pelos seus respectivos intervalos de guarda (Δ). É denominada Razão de guarda (k) a relação entre o valor do intervalo de guarda e o tempo útil (T_u), ou seja:

$$k = \frac{\Delta}{T_u} \text{ guard ratio}$$

A Figura 42 mostra a recepção dos símbolos do sinal principal e do mesmo sinal atrasado (eco) de um valor menor que Δ .

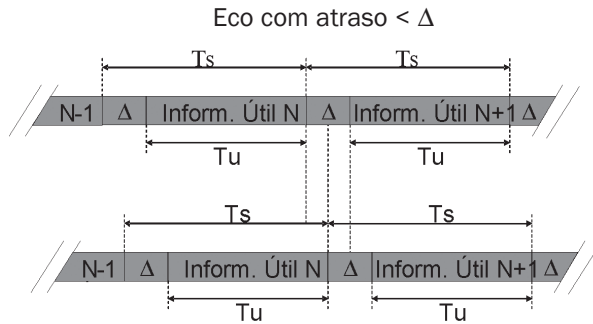


Figura 42 Intervalo de guarda com atraso menor que Δ

Pode-se ver que nesse caso não há interferência entre símbolos N e N + 1. A Figura 43 ilustra o caso em que o atraso (a) é maior que Δ . Nesse caso existe interferência entre os símbolos N e N + 1, e a recepção sofrerá uma degradação no seu desempenho, tanto maior quanto maior for o valor do atraso e maior for a amplitude do eco.

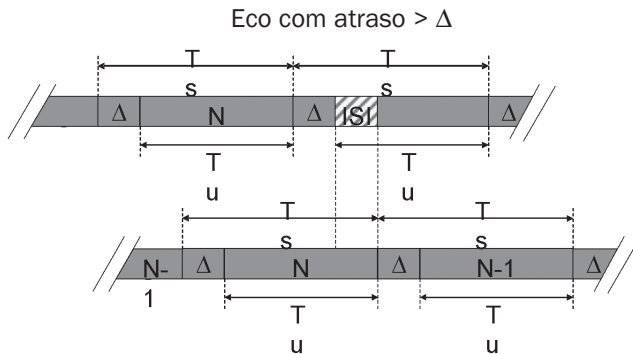


Figura 43 Intervalo de guarda com atraso maior que Δ

De uma forma geral, pode-se dizer que a banda de guarda confere a modulação COFDM do DVB-T a sua boa imunidade à interferência de multipercursos (ecos) cujos atrasos caíam dentro desta banda de guarda. Na prática, para manter a ortogonalidade entre as subportadoras, a banda de guarda é preenchida com uma cópia (Prefixo Cíclico) da parte final do símbolo OFDM, como mostrado na Figura 44.

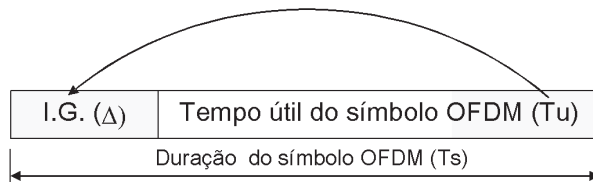


Figura 44 Intervalo de guarda por uma cópia da parte final do símbolo OFDM

O DVB-T permite utilizar quatro valores diferentes para a razão de guarda (Δ/T_u).

A Tabela 3 mostra, para os modos 2K e 8K, a duração dos intervalos de guarda para a razão de guarda 1/4, 1/8, 1/16 e 1/32.

Quanto maior a duração do intervalo de guarda, mais robusto à distorção de multipercurso (ecos) é o sinal COFDM, mas menor é a taxa útil de bits do sinal digital na entrada do Modulador.

A taxa de bits do feixe digital na entrada do Modulador DVB-T (sinal de entrada de bloco Divisor de Sinais) é uma variável que depende da configuração do sistema DVB-T.

TABELA 3

Duração do Intervalo de Guarda para DVB-T

| Modo | Modo 8K | | | | Modo 2K | | | |
|--|----------|-------|--------|--------|---------|-------|-------|-------|
| Intervalo de guarda Δ/T_u | 1/4 | 1/8 | 1/16 | 1/32 | 1/4 | 1/8 | 1/16 | 1/32 |
| Duração do símbolo T_u (μ s) | 8192.T | | | | 2048.T | | | |
| | 1194,667 | | | | 298,667 | | | |
| Duração do Intervalo de guarda Δ (μ s) | 2048T | 102T | 512T | 256T | 2048T | 102T | 512T | 256T |
| Duração do Símbolo | 10240T | 9216T | 8704T | 8448T | 2560T | 2304T | 2176T | 2112T |
| $T_s = T_u + \Delta$ (μ s) | 1493,3 | 144,0 | 1269,3 | 1232,0 | 373,3 | 336,0 | 317,3 | 308,0 |

A equação que permite calcular, aproximadamente, o valor desta taxa de bits para um canal de 6MHz de banda é a seguinte:

$$r_{b(i)} = 5,0625 \times \log_2 M \times CR_s \times CR_c \times 1/1+k \quad (12)$$

onde:

$r_{b(i)}$ = Taxa de bits em Mbps na entrada do Modulador DVB-T

M = Número de estados da subportadora, sendo:

M = 4 para QPSK, M = 16 para 16QAM e M = 64 para 64QAM

CR_s = 188/204 (*code rate do outer code*)

CR_c = 1/2, 2/3, 3/4, 5/6 ou 7/8 (*code rate inner code*)

K = 1/4, 1/8, 1/16 ou 1/32 (razão de guarda)

De uma maneira geral, quanto menor for a taxa de bits na entrada ($r_{b(i)}$), maior será a robustez do sistema às interferências, e vice-versa. Por sua vez, quanto menor $r_{b(i)}$, menor será a qualidade da imagem que se pode obter.

O DVB-T é, portanto, um sistema configurável em que os parâmetros podem ser ajustados para satisfazer às exigências dos diferentes serviços prestados, tendo-se em conta o compromisso entre a qualidade da imagem e a robustez às interferências.

4.2.4 Conversor D/A

Todas as operações de obtenção do sinal de OFDM realizadas nos blocos anteriores acontecem no domínio dos sinais digitais. Existe, portanto, na saída do bloco Inserção do Intervalo de Guarda, um sinal digital que representa o sinal modulado em OFDM, já inserida digitalmente a banda de guarda. Agora é necessário converter esse sinal para o domínio analógico, com a finalidade de poder confiná-lo à banda de 6MHz. Essa conversão é realizada por um conversor D/A (digital/analógico). A partir dessa conversão, o sinal é transferido para ocupar a região do espectro em torno da frequência de FI, ou seja, de 41MHz a 47MHz.

4.2.5 Circuito de saída de transmissão

Este circuito é composto por dois blocos: *Up-Converter* (conversor para cima) e Amplificador de Potência. O primeiro tem a função de transferir o sinal de FI para a frequência do canal de televisão designado à transmissão do sinal de TV. O segundo tem a função de amplificar o sinal transferido e inseri-lo na antena de transmissão de TV *Broadcasting*.

4.2.6 Transmissão hierárquica

O que foi visto nos itens anteriores abordou exclusivamente a transmissão de um sinal à entrada do Modulador DVB-T contemplado com uma única configuração de parâmetros do DVB-T, não importando se a transmissão era de apenas um canal ou vários canais multiplexados. O fato significativo é que, não importando o conteúdo do feixe digital de entrada, todo esse conteúdo está efetuado pela mesma configuração e, portanto, exige o mesmo grau de robustez às interferências.

O DVB-T permite criar, a partir do diferente conteúdo do sinal de entrada do Modulador DVB-T, dois sinais com diferentes graus de robustez às interferências. Por exemplo, pode-se ter um canal de boa definição para a recepção fixa, mas não de grande robustez à interferência e outro canal de definição mais pobre destinado à transmissão móvel, mas de robustez mais elevada. A esse tipo de transmissão de canais com diferentes configurações dentro do mesmo sinal modulado dá-se o nome de Transmissão Hierárquica.

A utilização de diferentes configurações torna necessária a utilização do bloco Divisor de Sinais (veja o item 4.2.1.1), que separa os dois feixes hierarquizados, e a duplicação dos blocos funcionais Adaptação de Mux e Dispersor de Energia, Codificador Externo, Entrelaçador Externo e Codificador Interno. Com essa duplicação, pode-se ter dois feixes com diferente razão de código (*code rate*) para o Codificador

Interno. O mapeamento desses dois feixes para formar novamente um só feixe permite utilizar tipos modulações diferentes para os dois feixes, mas a escolha destas modulações não é de forma independente uma da outra. Na verdade, existem duas combinações possíveis: ou os dois feixes estão modulados em QPSK ou um está modulado em QPSK e o outro em 16QAM. Quando os dois feixes são QPSK, o que apresenta maior robustez à interferência é denominado de alta prioridade (e indicado pelos dois primeiros bits das palavras de quatro bits). Quando os feixes são em QPSK e 16QAM, o feixe QPSK (os dois primeiros bits da palavra de seis bits) é considerado de alta prioridade e o feixe 16QAM, de baixa prioridade.

Nesses mapeamentos de um feixe dentro de outro, pode-se utilizar espaçamentos diferentes entre as constelações QPSK ou QPSK e 16QAM. Esse fator de espaçamento é chamado de α e pode ter valores de $\alpha = 1$, $\alpha = 2$ e $\alpha = 4$. Para $\alpha = 1$, o espaçamento entre as constelações é o normal, como apresentado nas figuras 39-b e 39-c. Para $\alpha = 2$, as constelações QPSK estão separadas como na Figura 31. Lembrar que nessa figura os primeiros dois bits indicam o quadrante em que estão as constelações e correspondem ao feixe QPSK de alta prioridade, e o restante, dois bits, indica a posição de estados dentro de cada constelação e corresponde aos estados de feixes QPSK de baixa prioridade. Note-se também que a modulação combinada de dois feixes QPSK corresponde a uma modulação de 16QAM.

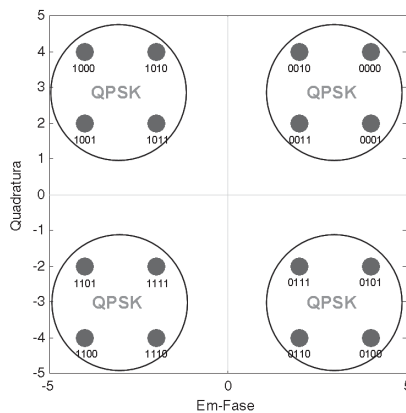


Figura 45 Constelação 16-QAM com $\alpha = 2$

Com a separação das constelações maior que o caso de $\alpha = 1$ (normal), o feixe de alta prioridade ganha maior robustez às interferências do que existia em $\alpha = 1$. Em compensação, os estados dentro das constelações estão mais próximos entre si, o que reduz a sua robustez em relação à de $\alpha = 1$.

A Figura 45 mostra a situação para $\alpha = 2$ na combinação QPSK e 16QAM. Aqui, os dois primeiros bits de cada estado representam a modulação QPSK de alta prioridade, e os restantes quatro bits representam a modulação 16QAM de baixa prioridade. Usando raciocínio análogo ao usado para a combinação QPSK/QPSK, pode-se observar que a modulação QPSK é mais robusta que a QPSK para $\alpha = 1$ e a 16QAM é menos robusta que a 16QAM para $\alpha = 1$. Note-se que o feixe combinado representa uma modulação em 64QAM.

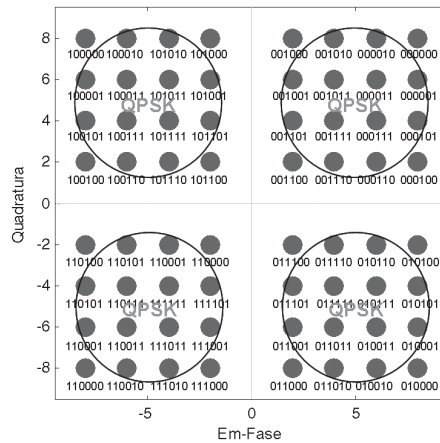


Figura 46 Constelação 64QAM com $\alpha = 2$

As figuras 47 e 48 representam as constelações para QPSK/QPSK e QPSK/16QAM para $\alpha = 4$.

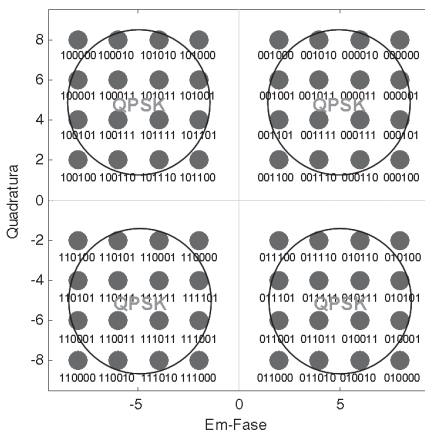


Figura 47 Constelação 16QAM com $\alpha = 4$

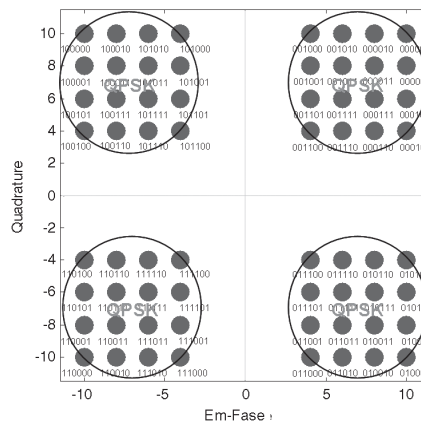


Figura 48 Constelação 64QAM com $\alpha=4$

Para cálculo das taxas de bits na entrada do Modulador DVB-T para os dois canais hierárquico, podem ser aplicadas as equações seguintes:

Para feixe QPSK de alta prioridade:

$$R_{b1(i)} = 9,33088 \times CR_{c1} \times \frac{1}{1 + 1/k} \text{ (Mbps)} \quad (13)$$

onde CR_{c1} = *code rate* escolhido para o feixe 1 e k = razão de guarda escolhida.

Para o feixe QPSK de baixa prioridade:

$$R_{b2(i)} = 9,33088 \times CR_{c2} \times \text{ (Mbps)} \quad (14)$$

onde CR_{c2} = *code rate* escolhido para o feixe 2.

Para o feixe 16QAM de baixa prioridade:

$$R_{b2(i)} = 18,66176 \times CR_{c2} \times \frac{1}{1 + 1/k} \text{ (Mbps)} \quad (15)$$

onde CR_{c2} = *code rate* escolhido para o feixe 2.

Nota: o valor de k tem que ser o mesmo para os dois feixes.

Exemplo:

Feixe 1: QPSK, $CR_{c1} = 1/2$ e $k = 1/8$

Feixe 2: 16QAM, $CR_{c2} = 5/6$ e $k = 1/8$

$$R_{b1(i)} = 9,33088 \times 1/2 \times \frac{1}{1 + 1/8} = 4,147 \text{ Mbps}$$

$$R_{b2(i)} = 18,66176 \times 5/6 \times \frac{1}{1 + 1/8} = 13,8235 \text{ Mbps}$$

Neste exemplo, o feixe 1 poderia ser usado para uma transmissão móvel, pois a modulação QPSK e os valores escolhidos de CR_{c1} e k conferem grande robustez às interferências. O feixe 2, menos robusto, mas com uma taxa de bits maior, poderia ser usado para recepção fixa de televisão com uma alta qualidade de imagem.

4.2.7 Canal de som para DVB-T

O sistema de codificação/compressão de som utilizado pelo padrão europeu é denominado *Masking Pattern Universal Sub-band Integrated Coding and Multiplexing* (Musicam).

O Musicam emprega técnicas psicométricas de codificação especificadas pelo padrão MPEG2 Audio Layer II. É um sistema de compressão digital que aproveita as características de mascaramento do ouvido para o som de nível mais baixo e de frequências próximas a um certo som proeminente.

Pode oferecer canais na configuração mono, estéreo e multicanal para taxas de bits de até 384Kbps (ou mais).

Não é compatível com o canal AC3 Dolby do padrão americano ou o AAC do padrão japonês.

4.3 Sistema ISDB-T

O sistema japonês ISDB-T é uma evolução do sistema DVB-T, usando o mesmo sistema de multiplexadoras, modulação OFDM e inserção de intervalo de guarda. Em virtude de a maioria da funcionalidade dos circuitos já ter sido comentada no item anterior, aqui serão comentados apenas os itens adicionais introduzidos. O padrão ISDB possui três modos de multiplexadoras: 2K, 4K e 8K. Uma inovação deste sistema é a segmentação de banda que divide a largura de 6MHz do canal em 13 segmentos e, conforme o tipo de transmissão escolhida, utiliza um ou mais segmentos para cada camada, com a possibilidade de transmitir até três feixes de dados simultâneos com modulações diferentes entre si.

A Figura 49 ilustra a segmentação do canal de RF em 13 segmentos de banda.

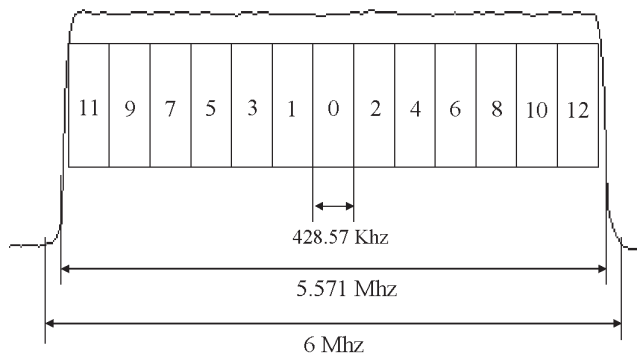


Figura 49 Espectro do canal de RF segmentado

Pode-se dividir o sistema ISDB-T em três blocos: remultiplexação, codificação de canal e modulação. A Figura 50 ilustra um diagrama básico do sistema ISDB-T.

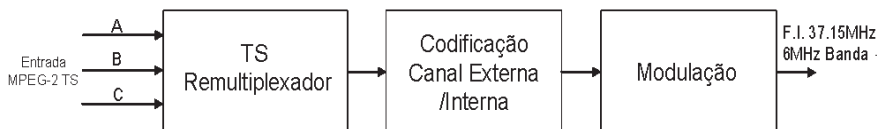


Figura 50 Diagrama básico do modulador ISDB-T

O modulador recebe três seqüências de pacotes de dados chamados de *Transport Stream* (TS) que contém informação multiplexada comprimida de vídeo, áudio e dados. O sistema ISDB-T possui duas interfaces de entrada, a DVB-SPI *Digital Video Broadcasting Synchronous Parallel Interface* e a *Asynchronous Serial Interface* ASI. As entradas são denominadas de camadas A, B e C. Na transmissão hierárquica, essas camadas são utilizadas realizando-se atribuições aos 13 segmentos de RF para cada feixe de dados das camadas.

O estágio de codificação é dividido por um bloco de codificação externa e interna. O estágio de codificação externa é fixo, formado por um aleatorizador de dados e um codificador *Reed Solomon* com entrelaçador de bytes. O estágio de codificação interna é flexível, formado pelo codificador convolucional de taxa-mãe 1/2 com ajuste de puncionamento para 1/2, 2/3, 3/4, 5/6, 7/8 com entrelaçamento de bits e símbolos. O primeiro estágio de modulação é formado por uma modulação primária que pode ser escolhida entre QPSK, 16-QAM ou 64-QAM. As camadas A, B e C são combinadas e entrelaçadas no tempo (100, 200 ou 400ms) e em freqüência por um algoritmo aleatorizador. Uma estrutura de sincronismo é adicionada com a inserção de pilotos de referência, sinalização e controle. O segundo estágio de modulação é formado por um modulador OFDM que opera com IFFT de tamanho 2k, 4k ou 8k. Na saída do modulador OFDM é adicionado um prefixo cíclico que garante a robustez do sistema contra *interferência intersimbólica*. Os sinais são convertidos para analógico em banda básica de 6MHz na freqüência central de 37,15MHz.

4.3.1 Remultiplexação

O remultiplexador recebe três TS MPEG-2 e agrupa-os em um único TS MPEG-2. O agrupamento é realizado em pacotes MPEG-2 TS (TSP), como pode ser visto na Figura 51. O tamanho do TS remultiplexado varia com o intervalo de guarda utilizado, como pode ser visto na Tabela 4. A remultiplexação ainda tem a função de mapear os pacotes de dados de entrada para suas respectivas camadas no estágio de codificação de canal. Para isso, um sinal de controle é enviado do remultiplexador até o bloco de codificação de canal.

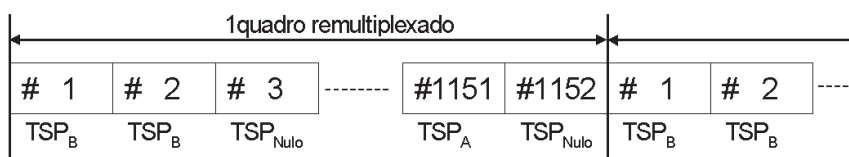


Figura 51. Exemplo da remultiplexação do *transport stream* (Modo 2k, intervalo de guarda = 1/8)

TABELA 4

Configuração do quadro multiplexado

| Modo | Intervalo de guarda | | | |
|------|---------------------|------|------|------|
| | 1/4 | 1/8 | 1/16 | 1/32 |
| 2k | 1280 | 1152 | 1088 | 1056 |
| 4k | 2560 | 2304 | 2176 | 2112 |
| 8k | 5120 | 4608 | 4352 | 4224 |

4.3.2 Codificação de canal

A Figura 52 ilustra o diagrama de blocos do estágio de codificação do sistema ISDBT.

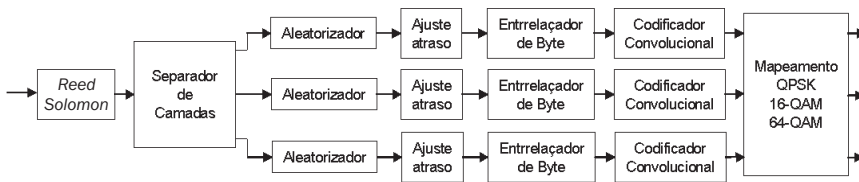


Figura 52 Diagrama do codificador de canal

A saída do remultiplexador é formada por pacotes de 188 bytes. Cada pacote possui 1 byte de sincronismo (47_{HEX}) e 187 bytes de informação útil. A Figura 53 ilustra um pacote de dados originado na saída multiplexador.

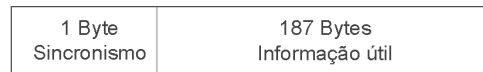


Figura 53 Pacote de dados na saída do codificador MPEG-2

4.3.2.1 Reed Solomon (codificação externa)

A codificação externa é constituída por um código de bloco do tipo *Reed Solomon* $RS_{(n,k,t)}$, onde k é a entrada, n é a saída e t é a capacidade de correção de erros. No sistema ISDB-T é utilizado como entrada $k = 188$ e $n = 204$ de saída. A distância mínima pode ser calculada por $d_{min} = n - k + 1$. Esse código possui 16 símbolos de *paridade* = $n - k$ e capacidade de correção $t = (d_{min} - 1) / 2$. A Figura 54 ilustra um pacote de dados originado na saída do codificador *Reed-Solomon*, em que cada símbolo possui $m = 8$ bits.

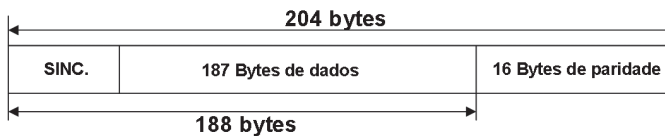


Figura 54 Pacote com *Reed-Solomon* RS(204,188,8)

Código polinomial gerador: $g(x) = (x+\lambda_0)(x+\lambda_1)(x+\lambda_2)\dots(x+\lambda_{15})$, onde $\lambda = 02_{\text{HEX}}$

Polinômio gerador de campo: $p(x) = x^8 + x^4 + x^3 + x^2 + 1$

Para realizar a implementação desse código, foi necessário acrescentar 51 bytes e preenchê-los com zeros. O codificador possui a configuração RS (255, 239, $t = 8$).

4.3.2.2 Separação do TS

O TS na saída do codificador *Reed Solomon* é dividido em 204 bytes e ordenado em três camadas de acordo com a remultiplexação. Nesse processo, cada TS é direcionado para sua respectiva camada A, B ou C. Se a transmissão hierárquica não é utilizada, todo TS é direcionado para uma única camada.

A Figura 55 ilustra o processo de divisão do TS.

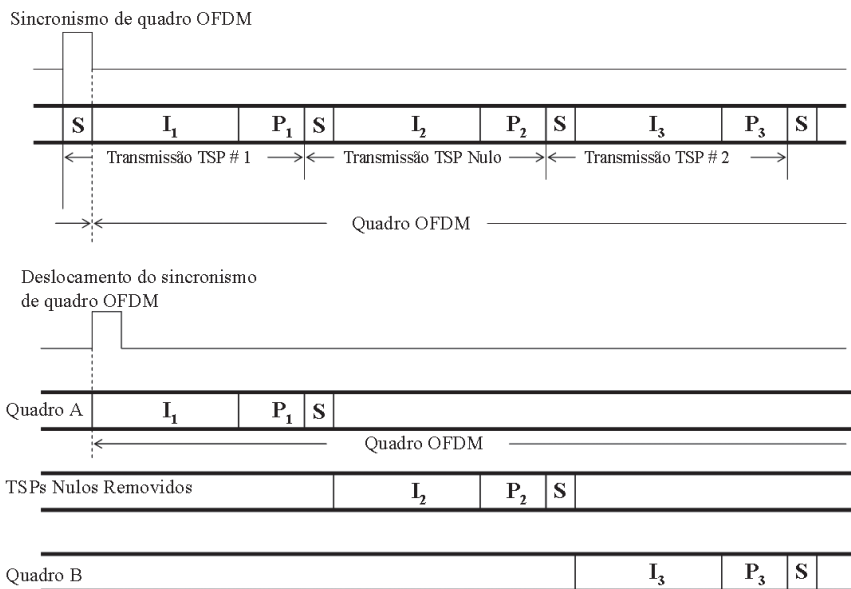


Figura 55 Processo de divisão do TS

4.3.2.3 Aleatorizador (dispersor de energia)

Com objetivo de espalhar os dados entrantes do codificador MPEG-2 e eliminar seqüências repetidas de zeros e uns que poderiam gerar um nível DC causando uma *interferência intersimbólica*, os dados são serializados e somados a uma seqüência binária pseudo-aleatória PRBS formada pelo gerador polinomial $1 + x^{14} + x^{15}$.

Os registradores de deslocamento desse gerador PRBS são carregados com uma seqüência inicial “100101000000”. O tamanho da seqüência do aleatorizador de dados é de $2^{15} - 1 = 32767$.

A Figura 56 ilustra o esquema do aleatorizador/desaleatorizador de dados utilizado.

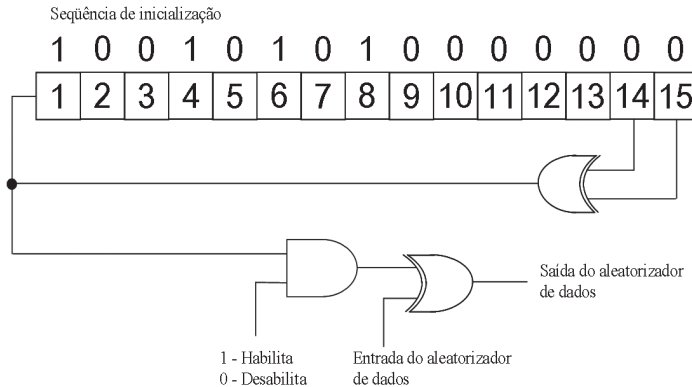


Figura 56 Aleatorizador/desaleatorizador de dados

4.3.2.4 Ajuste de atraso

O entrelaçador de byte tem como objetivo realizar a compensação de atraso das três camadas de dados. A Tabela 5 ilustra os valores de atraso para as configurações possíveis no sistema.

TABELA 5

Ajuste de Atraso do Entrelaçador de Bytes

| Modulação | Taxa | Ajuste de atraso (número de TSPs transmitidos) | | |
|---------------|------|--|------------|------------|
| | | Modo 2k | Modo 4k | Modo 8k |
| DQPSK QPSK | 1/2 | 12 x N-11 | 24 x N-11 | 48 x N-11 |
| | 2/3 | 16 x N-11 | 32 x N-11 | 64 x N-11 |
| | 3/4 | 18 x N-11 | 36 x N-11 | 72 x N-11 |
| | 5/6 | 20 x N-11 | 40 x N-11 | 80 x N-11 |
| | 7/8 | 21 x N-11 | 42 x N-11 | 84 x N-11 |
| 16QAM | 1/2 | 24 x N-11 | 48 x N-11 | 96 x N-11 |
| | 2/3 | 32 x N-11 | 64 x N-11 | 128 x N-11 |
| | 3/4 | 36 x N-11 | 72 x N-11 | 144 x N-11 |
| | 5/6 | 40 x N-11 | 80 x N-11 | 160 x N-11 |
| | 7/8 | 42 x N-11 | 84 x N-11 | 168 x N-11 |
| 64QAM | 1/2 | 36 x N-11 | 72 x N-11 | 144 x N-11 |
| | 2/3 | 48 x N-11 | 96 x N-11 | 192 x N-11 |
| | 3/4 | 54 x N-11 | 108 x N-11 | 216 x N-11 |
| | 5/6 | 60 x N-11 | 120 x N-11 | 240 x N-11 |
| | 7/8 | 63 x N-11 | 126 x N-11 | 252 x N-11 |

N = número de segmentos utilizados.

4.3.2.5 Entrelaçador de bytes

O entrelaçador de bytes tem como objetivo espalhar os pacotes provenientes do *Reed Solomon* e do aleatorizador (dispersor de energia) para aumentar sua eficiência perante erros de bloco. Como pode ser visto na Figura 57 ele é constituído por um entrelaçador convolucional com $I = 12$ ramos e registradores, de deslocamento com tamanho $M = 17$ bytes. Cada ramo possui $(I-1) \times 17$ registradores e cada símbolo tem tamanho de 8 bits. Os 12 ramos estão conectados ciclicamente na saída do *Reed-Solomon* e transferem 1 símbolo de cada vez em cada ramo.

O ramo $I = 0$ não possui memória, e os símbolos são transferidos imediatamente para a saída. Dessa forma, os símbolos de sincronismo são enviados no ramo $I = 0$. A Figura 58 ilustra um pacote proveniente da saída do entrelaçador de bytes.

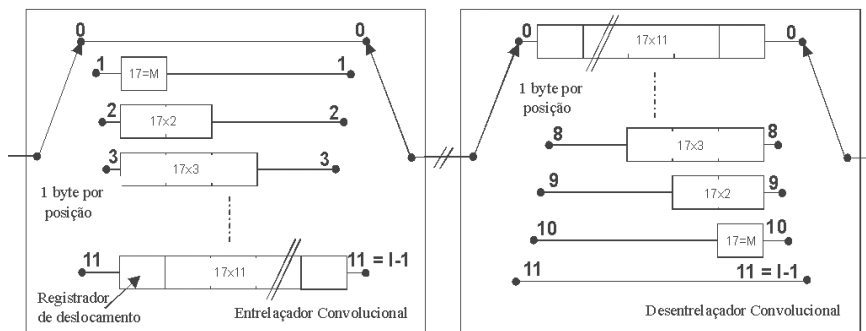


Figura 57 Diagrama do entrelaçador/desentrelaçador

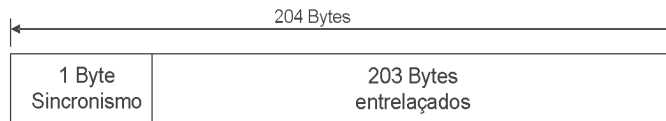


Figura 58 Pacote de dados na saída do entrelaçador de bytes

4.3.2.6 Codificação convolucional

A codificação é formada por um codificador convolucional com puncionamento. Tem a função de acrescentar bits para aumentar a capacidade de correção de bits. Ele é constituído por um código convolucional de taxa-mãe $R = 1/2$ e 64 estados. O código convolucional gerado para saída X é $G_1 = 171_{OCT}$ e para a saída Y é $G_2 = 133_{OCT}$.

A Figura 59 ilustra o diagrama desse codificador convolucional.

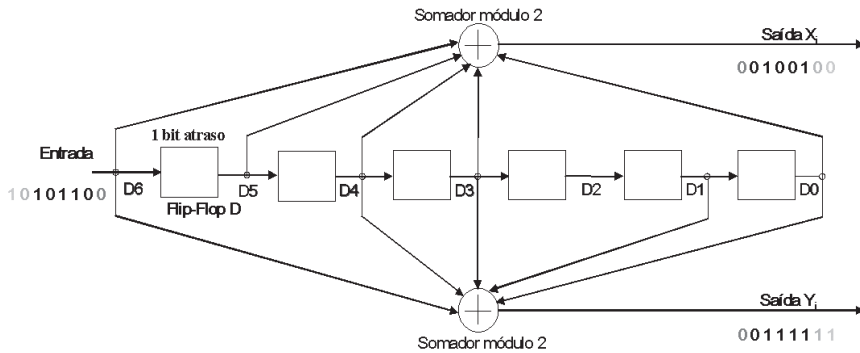


Figura 59 Codificador convolucional (2,1,6) de taxa 1/2

Codificador Convolucional (n,k,m)

onde:

$$G_1 = 1\ 1\ 1\ 1\ 0\ 0\ 1 = 1 + D + D^2 + D^3 + D^6$$

$$G_2 = 1\ 0\ 1\ 1\ 0\ 1\ 1 = 1 + D^2 + D^3 + D^5 + D^6$$

n = saída (número de somadores módulo 2)

k = entrada

m = memória (número de registradores de deslocamento)

O Código convolucional, descrito anteriormente, possui taxa-mãe 1/2. Para alterar essa taxa, é utilizado um punçãoamento e consegue-se as taxas de 2/3, 3/4, 5/6 e 7/8 como pode ser visto na Figura 60 e Tabela 6.

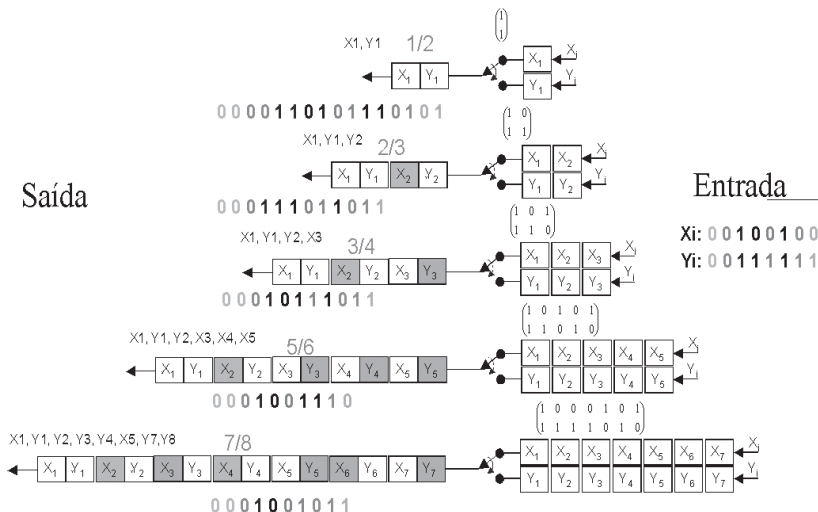


Figura 60 Punçãoamento do código convolucional

TABELA 6

Característica do Puncionamento

| Código | Taxa do código | | | | | | | | | | | |
|--------|-------------------|-------------------|----------------|-------------------|--------------|-------------------|----------------|-------------------|--------------------|-------------------|------------------------|-------------------|
| | K | G ₁ | G ₂ | 1/2 | | 2/3 | | 3/4 | | 5/6 | | 7/8 |
| | | | P | d _{free} | P | d _{free} | P | d _{free} | P | d _{free} | P | d _{free} |
| 7 | 71 _{oct} | 33 _{oct} | X=1 Y=1 | 10 | X=10 Y=11 | 6 | X=101 Y=110 | 5 | X=10101 Y=11010 | 4 | X=1000101 Y=1111010 | 3 |

P = puncionamento
d_{free} = distância livre

4.3.3 Modulação

A Figura 61 ilustra o diagrama de blocos do estágio de modulação do sistema ISDB-T.

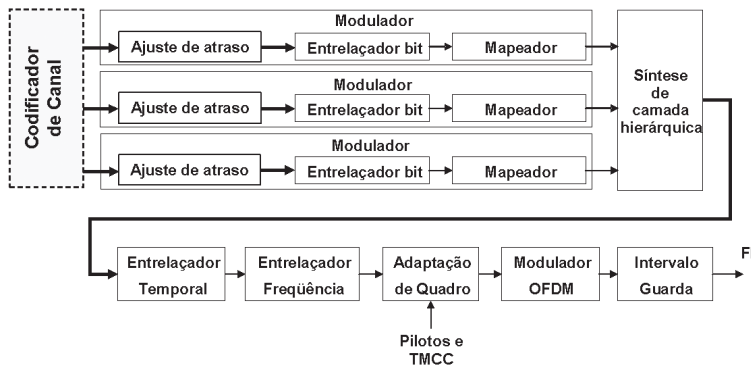


Figura 61 Diagrama em blocos do modulador

4.3.4 Ajuste de atraso

O entrelaçador de bits tem como função realizar um entrelaçamento com atraso de 120 símbolos complexos (I+jQ) com tamanho fixo para cada configuração de modulação como pode ser visto na Tabela 7, onde N representa o número de segmentos usados em cada camada.

TABELA 7

Ajuste do atraso do Bit Interleaver

| Modulação | Quantidade de bits atrasados | | |
|------------|------------------------------|------------|------------|
| | Modo 2k | Modo 4k | Modo 8k |
| DQPSK/QPSK | 384xN-240 | 768xN-240 | 1536xN-240 |
| 16QAM | 768xN-480 | 1536xN-240 | 3072xN-240 |
| 64QAM | 1152xN-720 | 2304xN-720 | 4608xN-720 |

4.3.5 Entrelaçamento de bits e mapeamento

O entrelaçamento de bits é constituído por um conversor serial/paralelo de tamanho variável de acordo com o método de modulação acrescido de um atraso de bit.

4.3.5.1 DQPSK

As figuras 62 e 63 ilustram o diagrama de blocos do modulador e sua respectiva constelação.

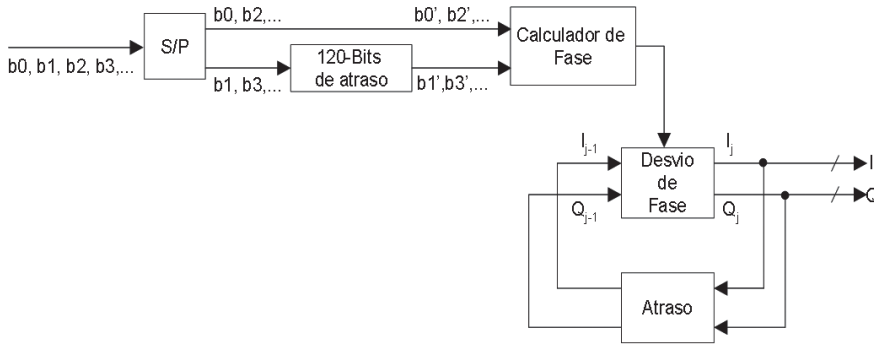


Figura 62 Modulador DQPSK

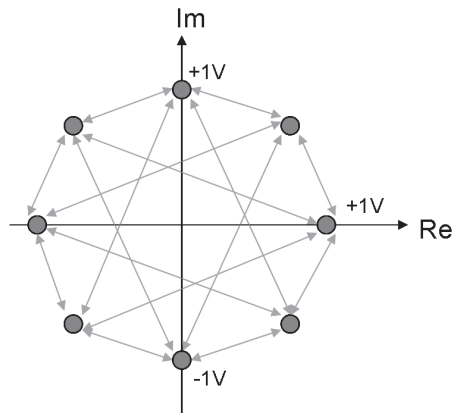


Figura 63 Constelação DQPSK

4.3.5.2 QPSK

As figuras 64 e 65 ilustram o diagrama de blocos do modulador e sua respectiva constelação.

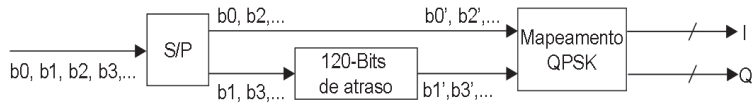


Figura 64 Modulador QPSK

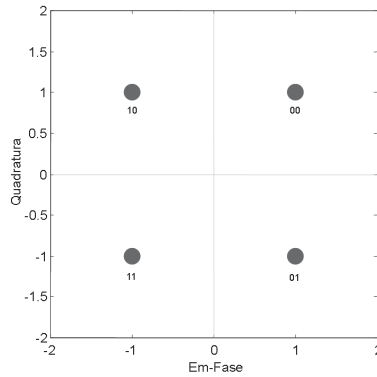


Figura 65 Constelação QPSK

4.3.5.3 16-QAM

As figuras 66 e 67 ilustram o diagrama de blocos do modulador e sua respectiva constelação.

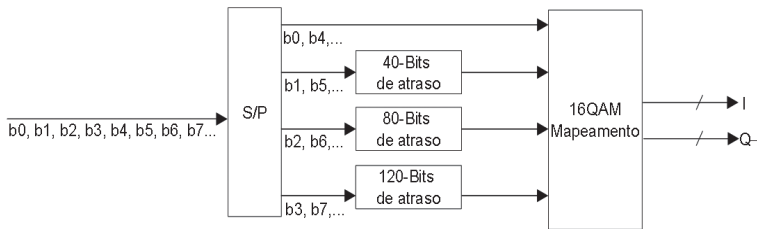


Figura 66 Modulador 16-QAM

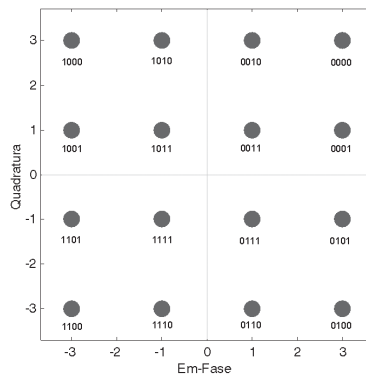


Figura 67 Constelação 16-QAM

4.3.5.4 64-QAM

As figuras 68 e 69 ilustram o diagrama de blocos do modulador e sua respectiva constelação.

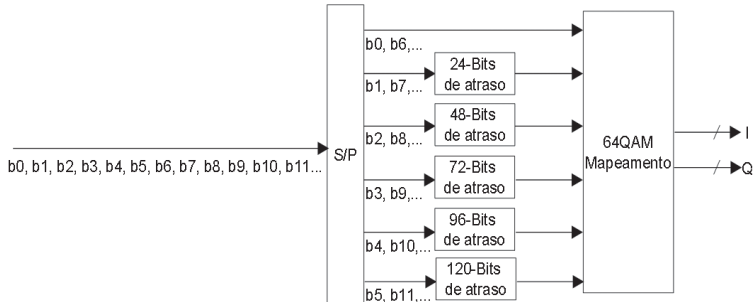


Figura 68 Modulador 64-QAM

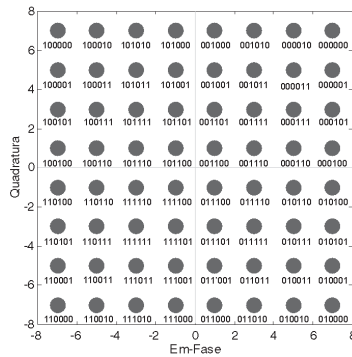


Figura 69 Constelação 64-QAM

4.3.5.5 Fator de normalização

Com o objetivo de manter a potência média constante em todas as modulações utilizadas, usa-se um fator de normalização na constelação como pode ser visto na Tabela 8.

TABELA 8

Fator de Normalização

| Esquema de modulação | Fator de normalização |
|----------------------|-----------------------|
| DQPSK | $c = z / \sqrt{2}$ |
| QPSK | $c = z / \sqrt{2}$ |
| 16-QAM | $c = z / \sqrt{10}$ |
| 64-QAM | $c = z / \sqrt{42}$ |

4.3.6 Segmento de dados

Como pode ser visto na Figura 70, os segmentos de dados são formados por um conjunto de símbolos complexos provenientes do estágio de mapeamento. O conjunto de 96 símbolos complexos em 204 símbolos OFDM forma um segmento de dados no modo 2k, O conjunto de 192 símbolos complexos em 204 símbolos OFDM forma um segmento de dados no modo 4k. O conjunto de 384 símbolos complexos em 204 símbolos OFDM forma um segmento de dados no modo 8k.

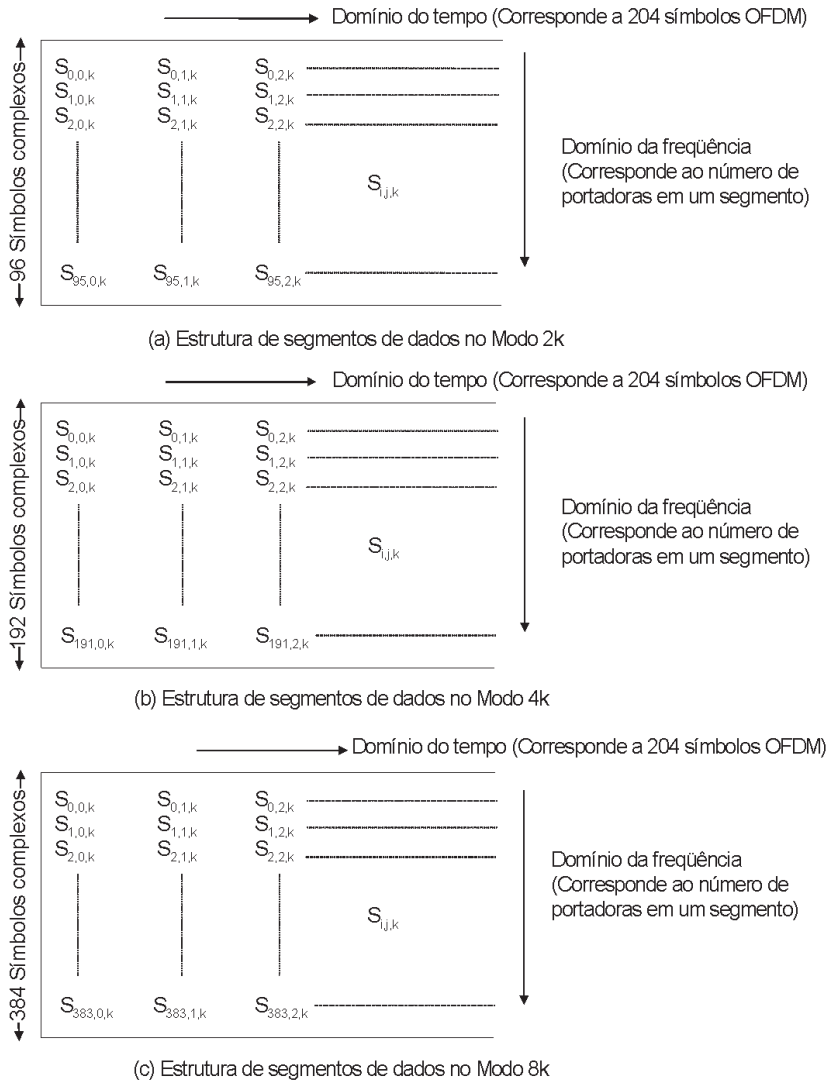


Figura 70 Estrutura de segmentos de dados. (a) Modo 2k, (b) Modo 4k e (c) Modo 8k

4.3.7 Síntese das camadas de dados

Depois da codificação de canal e mapeamento, os segmentos de dados são combinados formando um único segmento de dados como pode ser visto na Figura 71.

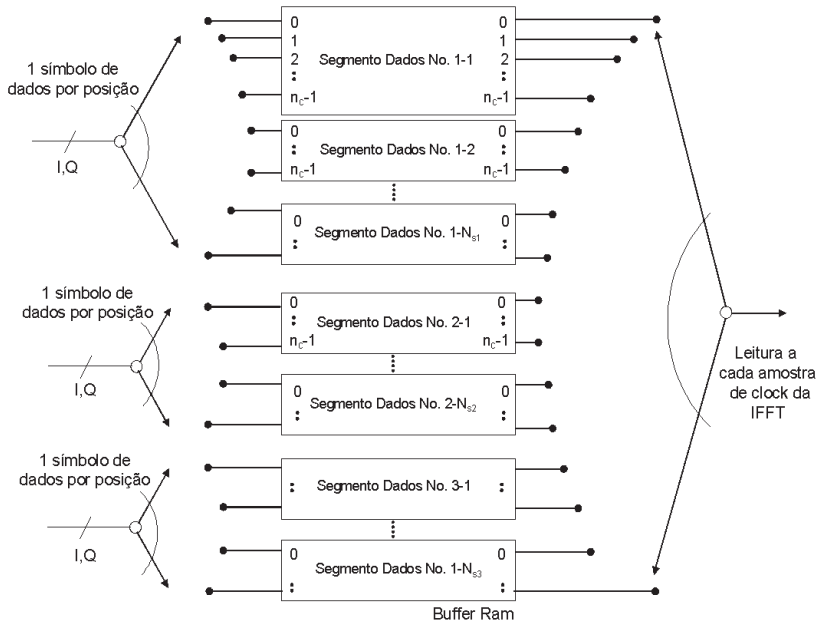


Figura 71 Combinador de segmento de dados

4.3.8 Entrelaçador temporal

Depois do sintetizador de camadas, o sinal é entrelaçado. O entrelaçador temporal é formado por um entrelaçador de blocos que tem como objetivo entrelaçar as subportadoras dentro de vários símbolos OFDM. O entrelaçador temporal atua separadamente em cada segmento OFDM de dados e é combinado ciclicamente na saída. O tamanho do entrelaçamento pode ser ajustado variando-se o parâmetro I como pode ser visto na Equação 16.

$$\pi(i) = I \cdot \text{mod}(5 \cdot i, N_c), \quad (16)$$

onde:

I = Ajuste do tamanho do entrelaçador

i = Entrada do entrelaçador temporal

$\pi(i)$ = Saída do entrelaçador temporal

N_c = Número de portadoras. $N_c = 96, 192$ ou 384 para os modos 2k, 4k e 8k, respectivamente.

O Atraso gerado pelo entrelaçador temporal pode ser calculado usando-se a Equação 17:

$$A_{TI} = T_F (204 * N_F - N_{SA}) \tag{17}$$

- A_{TI} = Atraso do entrelaçador temporal
- T_F = Duração do símbolo OFDM
- N_F = Número de quadros OFDM atrasados
- N_{SA} = Número de símbolos para ajuste

As figuras 72, 73 e 74 ilustram gráficos de dispersão do entrelaçador temporal nos modos 2k, 4k e 8k, respectivamente. Os valores típicos de atraso para esse entrelaçador podem ser visualizados na Tabela 9.

TABELA 9

Atrasos gerados pelo Entrelaçador Temporal

| Tamanho (l) | Modo 2k | | Tamanho (l) | Modo 4k | | Tamanho (l) | Modo 8k | |
|-------------|-----------------------------------|-------------|-------------|-----------------------------------|-------------|-------------|-----------------------------------|-------------|
| | Número de símbolos OFDM atrasados | Atraso (ms) | | Número de símbolos OFDM atrasados | Atraso (ms) | | Número de símbolos OFDM atrasados | Atraso (ms) |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 4 | 380 | 95.76 | 2 | 190 | 95.76 | 1 | 95 | 95.76 |
| 8 | 760 | 191.52 | 4 | 380 | 191.52 | 2 | 190 | 191.52 |
| 16 | 1504 | 379.00 | 8 | 760 | 379.00 | 4 | 380 | 379.00 |

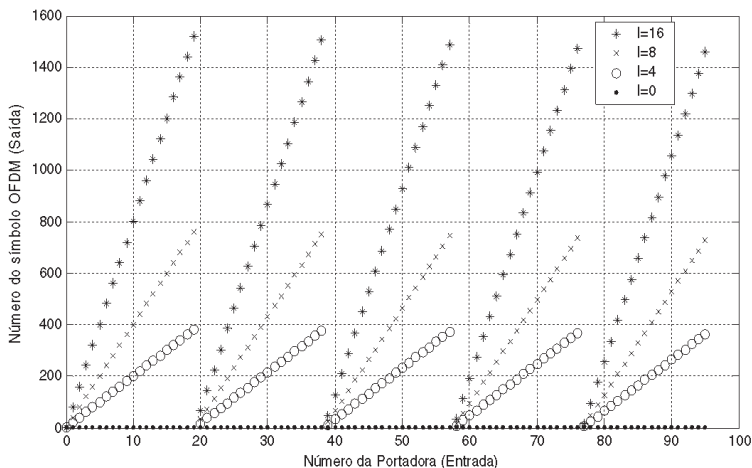


Figura 72 Espalhamento do entrelaçador temporal no modo 2k

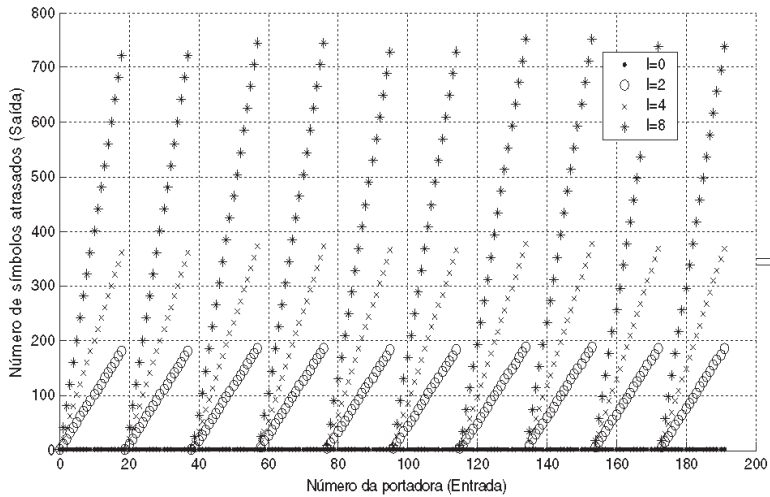


Figura 73 Espalhamento do entrelaçador temporal no modo 4k

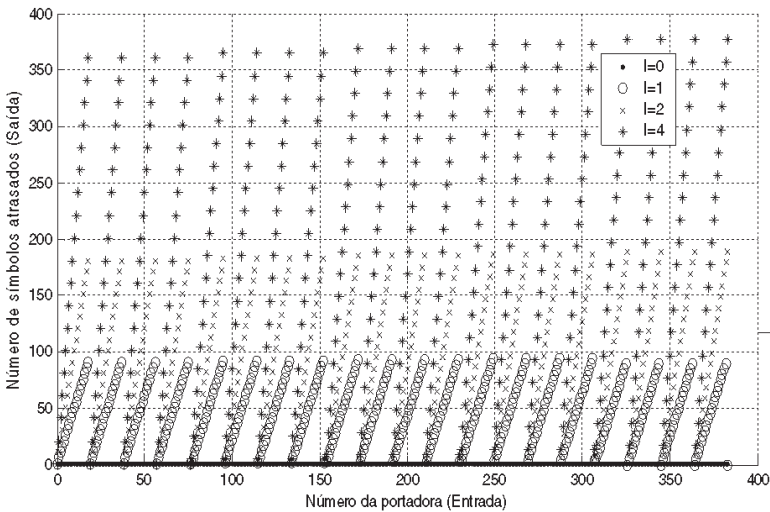


Figura 74 Gráfico de dispersão do entrelaçador temporal no modo 8k

4.3.8.1 Entrelaçamento em frequência

Durante a divisão do TS, os segmentos de dados são direcionados para suas respectivas camadas (parcial, diferencial ou coerente) de modulação para serem entrelaçados.

O entrelaçamento entre segmentos somente é utilizado quando se utilizam dois os mais segmentos dentro de uma mesma camada e é usado para maximizar os efeitos do entrelaçamento em frequência. A Figura 75 ilustra o diagrama de blocos do entrelaçamento de frequência.

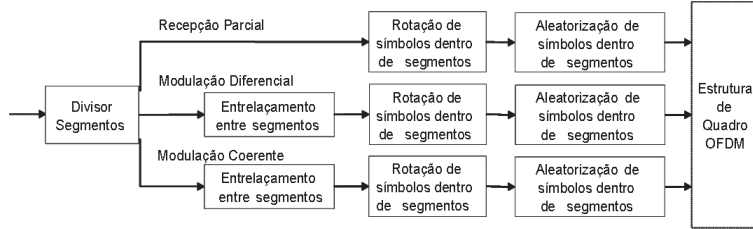


Figura 75 Configuração do entrelaçamento de frequência

4.3.9 Entrelaçamento entre segmentos

O entrelaçamento entre segmentos é utilizado para espalhar os símbolos complexos provenientes da modulação diferencial (DQPSK) ou coerente (QPSK, 16-QAM e 64-QAM) entre segmentos como pode ser visto na Figura 76.

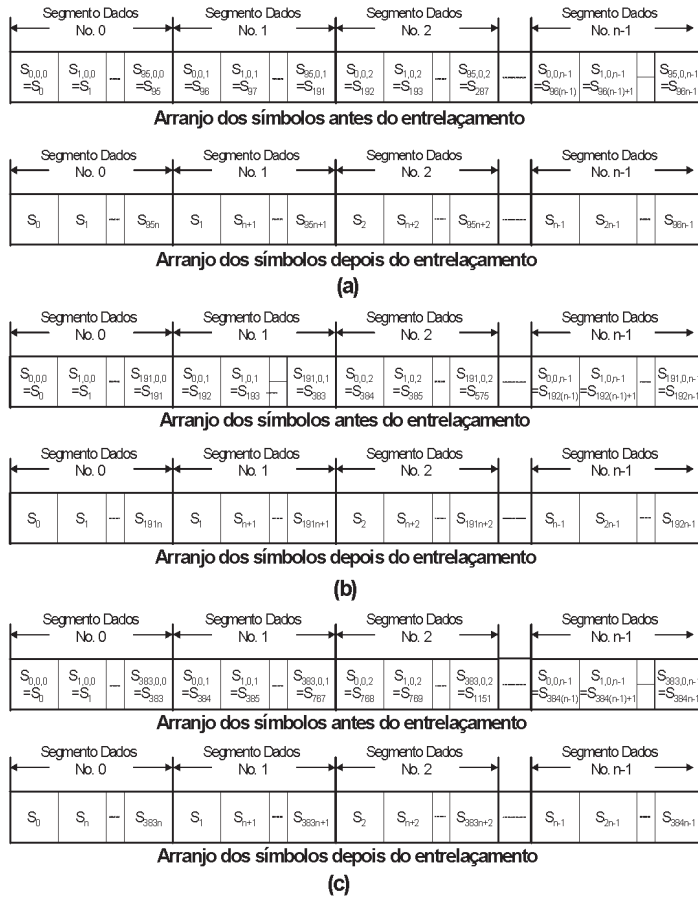


Figura 76 Entrelaçamento entre segmentos. (a) Modo 2k, (b) Modo 4k e (c) Modo 8k

4.3.9.1 Entrelaçamento dentro de segmentos

O entrelaçamento dentro de segmentos ocorre em dois passos: rotação de fase e aleatorização de portadoras.

A Figura 77 ilustra a rotação de fase realizada nos modos 2k, 4k e 8k. Depois a aleatorização é realizada de acordo com as tabelas 10, 11 e 12 e figuras 78, 79 e 80 para os modos 2k, 4k e 8k, respectivamente.

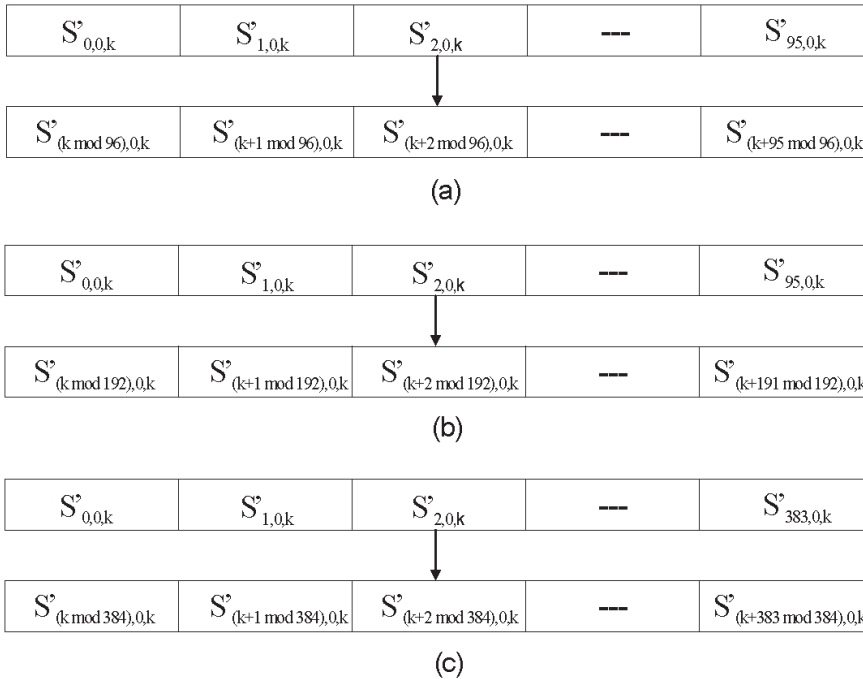


Figura 77 Rotação de fase das portadoras. (a) Modo 2k. (b) Modo 4k. (c) Modo 8k

TABELA 10

Aleatorizador de portadoras dentro de segmentos no Modo 2k

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Entrada | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 |
| Saída | 80 | 93 | 63 | 92 | 94 | 55 | 17 | 81 | 6 | 51 | 9 | 85 | 89 | 65 | 52 | 15 | 73 | 66 | 46 | 71 | 12 | 70 | 18 | 13 |
| Entrada | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 | 33 | 34 | 35 | 36 | 37 | 38 | 39 | 40 | 41 | 42 | 43 | 44 | 45 | 46 | 47 |
| Saída | 95 | 34 | 1 | 38 | 78 | 59 | 91 | 64 | 0 | 28 | 11 | 4 | 45 | 35 | 16 | 7 | 48 | 22 | 23 | 77 | 56 | 19 | 8 | 36 |
| Entrada | 48 | 49 | 50 | 51 | 52 | 53 | 54 | 55 | 56 | 57 | 58 | 59 | 60 | 61 | 62 | 63 | 64 | 65 | 66 | 67 | 68 | 69 | 70 | 71 |
| Saída | 39 | 61 | 21 | 3 | 26 | 69 | 67 | 20 | 74 | 86 | 72 | 25 | 31 | 5 | 49 | 42 | 54 | 87 | 43 | 60 | 29 | 2 | 76 | 84 |
| Entrada | 74 | 73 | 74 | 75 | 76 | 77 | 78 | 79 | 80 | 81 | 82 | 83 | 84 | 85 | 86 | 87 | 88 | 89 | 90 | 91 | 92 | 93 | 94 | 95 |
| Saída | 83 | 40 | 14 | 79 | 27 | 57 | 44 | 37 | 30 | 68 | 47 | 88 | 75 | 41 | 90 | 10 | 33 | 32 | 62 | 50 | 58 | 82 | 53 | 24 |

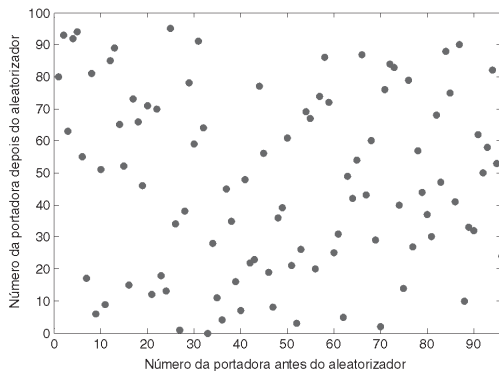


Figura 78 Gráfico de dispersão do aleatorizador de portadoras dentro de segmentos no modo 2k

TABELA 11

Aleatorizador de portadoras dentro de segmentos no Modo 4k

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|----------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Entrada | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 |
| Saída | 98 | 35 | 67 | 116 | 135 | 17 | 5 | 93 | 73 | 168 | 54 | 143 | 43 | 74 | 165 | 48 | 37 | 69 | 154 | 150 | 107 | 76 | 176 | 79 |
| Entrada | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 | 33 | 34 | 35 | 36 | 37 | 38 | 39 | 40 | 41 | 42 | 43 | 44 | 45 | 46 | 47 |
| Saída | 175 | 36 | 28 | 78 | 47 | 128 | 94 | 163 | 184 | 72 | 142 | 2 | 86 | 14 | 130 | 151 | 114 | 68 | 46 | 183 | 122 | 112 | 180 | 42 |
| Entrada | 48 | 49 | 50 | 51 | 52 | 53 | 54 | 55 | 56 | 57 | 58 | 59 | 60 | 61 | 62 | 63 | 64 | 65 | 66 | 67 | 68 | 69 | 70 | 71 |
| Saída | 105 | 97 | 33 | 134 | 177 | 84 | 170 | 45 | 187 | 38 | 167 | 10 | 189 | 51 | 117 | 156 | 161 | 25 | 89 | 125 | 139 | 24 | 19 | 57 |
| Entrada | 72 | 73 | 74 | 75 | 76 | 77 | 78 | 79 | 80 | 81 | 82 | 83 | 84 | 85 | 86 | 87 | 88 | 89 | 90 | 91 | 92 | 93 | 94 | 95 |
| Saída | 71 | 39 | 77 | 191 | 88 | 85 | 0 | 162 | 181 | 113 | 140 | 61 | 75 | 82 | 101 | 174 | 118 | 20 | 136 | 3 | 121 | 190 | 120 | 92 |
| Entrada | 96 | 97 | 98 | 99 | 100 | 101 | 102 | 103 | 104 | 105 | 106 | 107 | 108 | 109 | 110 | 111 | 112 | 113 | 114 | 115 | 116 | 117 | 118 | 119 |
| Saída | 160 | 52 | 153 | 127 | 65 | 60 | 133 | 147 | 131 | 87 | 22 | 58 | 100 | 111 | 141 | 83 | 49 | 132 | 12 | 155 | 146 | 102 | 164 | 66 |
| Entrada | 120 | 121 | 122 | 123 | 124 | 125 | 126 | 127 | 128 | 129 | 130 | 131 | 132 | 133 | 134 | 135 | 136 | 137 | 138 | 139 | 140 | 141 | 142 | 143 |
| Saída | 1 | 62 | 178 | 15 | 182 | 96 | 80 | 119 | 23 | 6 | 166 | 56 | 99 | 123 | 138 | 137 | 21 | 145 | 185 | 18 | 70 | 129 | 95 | 90 |
| Entrada | 144 | 145 | 146 | 147 | 148 | 149 | 150 | 151 | 152 | 153 | 154 | 155 | 156 | 157 | 158 | 159 | 160 | 161 | 162 | 163 | 164 | 165 | 166 | 167 |
| Saída | 149 | 109 | 124 | 50 | 11 | 152 | 4 | 31 | 172 | 40 | 13 | 32 | 55 | 159 | 41 | 8 | 7 | 144 | 16 | 26 | 173 | 81 | 44 | 103 |
| Entrada | 168 | 169 | 170 | 171 | 172 | 173 | 174 | 175 | 176 | 177 | 178 | 179 | 180 | 181 | 182 | 183 | 184 | 185 | 186 | 187 | 188 | 189 | 190 | 191 |
| Saída | 64 | 9 | 30 | 157 | 126 | 179 | 148 | 63 | 188 | 171 | 106 | 104 | 158 | 115 | 34 | 186 | 29 | 108 | 53 | 91 | 169 | 110 | 27 | 59 |

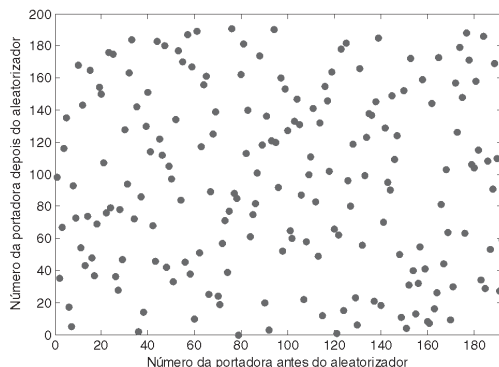


Figura 79 Gráfico de dispersão do aleatorizador de portadoras dentro de segmentos no modo 4k

TABELA 12

Aleatorizador de portadoras dentro de segmentos no Modo 8k

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|----------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Entrada | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 |
| Saída | 62 | 13 | 371 | 11 | 285 | 336 | 365 | 220 | 226 | 92 | 56 | 46 | 120 | 175 | 298 | 352 | 172 | 235 | 53 | 164 | 368 | 187 | 125 | 82 |
| Entrada | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 | 33 | 34 | 35 | 36 | 37 | 38 | 39 | 40 | 41 | 42 | 43 | 44 | 45 | 46 | 47 |
| Saída | 5 | 45 | 173 | 258 | 135 | 182 | 141 | 273 | 126 | 264 | 286 | 88 | 233 | 61 | 249 | 367 | 310 | 179 | 155 | 57 | 123 | 208 | 14 | 227 |
| Entrada | 48 | 49 | 50 | 51 | 52 | 53 | 54 | 55 | 56 | 57 | 58 | 59 | 60 | 61 | 62 | 63 | 64 | 65 | 66 | 67 | 68 | 69 | 70 | 71 |
| Saída | 100 | 311 | 205 | 79 | 184 | 185 | 328 | 77 | 115 | 277 | 112 | 20 | 199 | 178 | 143 | 152 | 215 | 204 | 139 | 234 | 358 | 192 | 309 | 183 |
| Entrada | 72 | 73 | 74 | 75 | 76 | 77 | 78 | 79 | 80 | 81 | 82 | 83 | 84 | 85 | 86 | 87 | 88 | 89 | 90 | 91 | 92 | 93 | 94 | 95 |
| Saída | 81 | 129 | 256 | 314 | 101 | 43 | 97 | 324 | 142 | 157 | 90 | 214 | 102 | 29 | 303 | 363 | 261 | 31 | 22 | 52 | 305 | 301 | 293 | 177 |
| Entrada | 96 | 97 | 98 | 99 | 100 | 101 | 102 | 103 | 104 | 105 | 106 | 107 | 108 | 109 | 110 | 111 | 112 | 113 | 114 | 115 | 116 | 117 | 118 | 119 |
| Saída | 116 | 296 | 85 | 196 | 191 | 114 | 58 | 198 | 16 | 167 | 145 | 119 | 245 | 113 | 295 | 193 | 232 | 17 | 108 | 283 | 246 | 64 | 237 | 189 |
| Entrada | 120 | 121 | 122 | 123 | 124 | 125 | 126 | 127 | 128 | 129 | 130 | 131 | 132 | 133 | 134 | 135 | 136 | 137 | 138 | 139 | 140 | 141 | 142 | 143 |
| Saída | 128 | 373 | 302 | 320 | 239 | 335 | 356 | 39 | 347 | 351 | 73 | 158 | 276 | 243 | 99 | 38 | 287 | 3 | 330 | 153 | 315 | 117 | 289 | 213 |
| Entrada | 144 | 145 | 146 | 147 | 148 | 149 | 150 | 151 | 152 | 153 | 154 | 155 | 156 | 157 | 158 | 159 | 160 | 161 | 162 | 163 | 164 | 165 | 166 | 167 |
| Saída | 210 | 149 | 383 | 337 | 339 | 151 | 241 | 321 | 217 | 30 | 334 | 161 | 322 | 49 | 176 | 359 | 12 | 346 | 60 | 28 | 229 | 265 | 288 | 225 |
| Entrada | 168 | 169 | 170 | 171 | 172 | 173 | 174 | 175 | 176 | 177 | 178 | 179 | 180 | 181 | 182 | 183 | 184 | 185 | 186 | 187 | 188 | 189 | 190 | 191 |
| Saída | 382 | 59 | 181 | 170 | 319 | 341 | 86 | 251 | 133 | 344 | 361 | 109 | 44 | 369 | 268 | 257 | 323 | 55 | 317 | 381 | 121 | 360 | 260 | 275 |
| Entrada | 192 | 193 | 194 | 195 | 196 | 197 | 198 | 199 | 200 | 201 | 202 | 203 | 204 | 205 | 206 | 207 | 208 | 209 | 210 | 211 | 212 | 213 | 214 | 215 |
| Saída | 190 | 19 | 63 | 18 | 248 | 9 | 240 | 211 | 150 | 230 | 332 | 231 | 71 | 255 | 350 | 355 | 83 | 87 | 154 | 218 | 138 | 269 | 348 | 130 |
| Entrada | 216 | 217 | 218 | 219 | 220 | 221 | 222 | 223 | 224 | 225 | 226 | 227 | 228 | 229 | 230 | 231 | 232 | 233 | 234 | 235 | 236 | 237 | 238 | 239 |
| Saída | 160 | 278 | 377 | 216 | 236 | 308 | 223 | 254 | 25 | 98 | 300 | 201 | 137 | 219 | 36 | 325 | 124 | 66 | 353 | 169 | 21 | 35 | 107 | 50 |
| Entrada | 240 | 241 | 242 | 243 | 244 | 245 | 246 | 247 | 248 | 249 | 250 | 251 | 252 | 253 | 254 | 255 | 256 | 257 | 258 | 259 | 260 | 261 | 262 | 263 |
| Saída | 106 | 333 | 326 | 262 | 252 | 271 | 263 | 372 | 136 | 0 | 366 | 206 | 159 | 122 | 188 | 6 | 284 | 96 | 26 | 200 | 197 | 186 | 345 | 340 |
| Entrada | 264 | 265 | 266 | 267 | 268 | 269 | 270 | 271 | 272 | 273 | 274 | 275 | 276 | 277 | 278 | 279 | 280 | 281 | 282 | 283 | 284 | 285 | 286 | 287 |
| Saída | 349 | 103 | 84 | 228 | 212 | 2 | 67 | 318 | 1 | 74 | 342 | 166 | 194 | 33 | 68 | 267 | 111 | 118 | 140 | 195 | 105 | 202 | 291 | 259 |
| Entrada | 288 | 289 | 290 | 291 | 292 | 293 | 294 | 295 | 296 | 297 | 298 | 299 | 300 | 301 | 302 | 303 | 304 | 305 | 306 | 307 | 308 | 309 | 310 | 311 |
| Saída | 23 | 171 | 65 | 281 | 24 | 165 | 8 | 94 | 222 | 331 | 34 | 238 | 364 | 376 | 266 | 89 | 80 | 253 | 163 | 280 | 247 | 4 | 362 | 379 |
| Entrada | 312 | 313 | 314 | 315 | 316 | 317 | 318 | 319 | 320 | 321 | 322 | 323 | 324 | 325 | 326 | 327 | 328 | 329 | 330 | 331 | 332 | 333 | 334 | 335 |
| Saída | 290 | 279 | 54 | 78 | 180 | 72 | 316 | 282 | 131 | 207 | 343 | 370 | 306 | 221 | 132 | 7 | 148 | 299 | 168 | 224 | 48 | 47 | 357 | 313 |
| Entrada | 336 | 337 | 338 | 339 | 340 | 341 | 342 | 343 | 344 | 345 | 346 | 347 | 348 | 349 | 350 | 351 | 352 | 353 | 354 | 355 | 356 | 357 | 358 | 359 |
| Saída | 75 | 104 | 70 | 147 | 40 | 110 | 374 | 69 | 146 | 37 | 375 | 354 | 174 | 41 | 32 | 304 | 307 | 312 | 15 | 272 | 134 | 242 | 203 | 209 |
| Entrada | 360 | 361 | 362 | 363 | 364 | 365 | 366 | 367 | 368 | 369 | 370 | 371 | 372 | 373 | 374 | 375 | 376 | 377 | 378 | 379 | 380 | 381 | 382 | 383 |
| Saída | 380 | 162 | 297 | 327 | 10 | 93 | 42 | 250 | 156 | 338 | 292 | 144 | 378 | 294 | 329 | 127 | 270 | 76 | 95 | 91 | 244 | 274 | 27 | 51 |

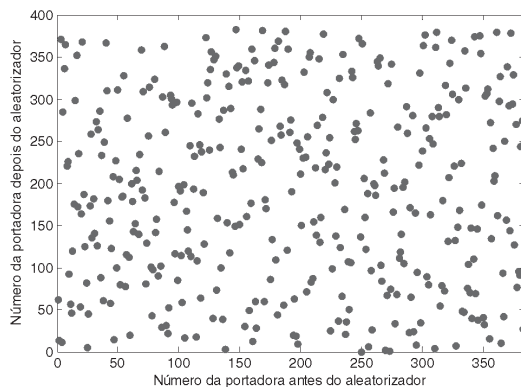


Figura 80 Gráfico de dispersão do aleatorizador de portadoras dentro de segmentos no modo 8k

4.3.10 Estrutura do quadro OFDM

A transmissão do sinal é organizada em quadros. Cada quadro possui duração T_F , e consiste em 204 símbolos OFDM como pode ser visto nas figuras 81 e 82. Cada símbolo OFDM com 13 segmentos de banda é constituído por um número $K = 1405$ portadoras para o modo 1 (2k), $K = 2809$ portadoras para o modo 2 (4k) e $K = 5617$ portadoras modo 3 (8k) na qual são transmitidas com a duração T_S . T_S é composto por duas partes, T_U que é a duração de tempo das portadoras e o intervalo de guarda com duração Δ . O intervalo de guarda consiste em uma continuação cíclica de T_U que é inserida ao seu término. Um símbolo OFDM com 13 segmentos ocupa a banda de 5.571MHz. A Tabela 13. ilustra informações de um quadro OFDM.

TABELA 13

Parâmetros de um segmento do quadro OFDM

| Modo | Modo 2k | | Modo 4k | | Modo 8k | | |
|-------------------------------|--|-------|----------------------|-------|------------------------|-------|-----|
| Largura de banda | 3000/7=428.57...kHz | | | | | | |
| Espaçamento entre portadoras | 250/63=3.968... kHz | | 125/63=19841... kHz | | 125/126=0.99206... kHz | | |
| Número de portadoras | Total | 108 | 108 | 216 | 264 | 432 | 432 |
| | Dados | 96 | 96 | 192 | 192 | 384 | 384 |
| | SP | 9 | 0 | 18 | 0 | 36 | 0 |
| | CP | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| | TMCC | 1 | 5 | 2 | 10 | 4 | 20 |
| | AC1 | 2 | 2 | 4 | 4 | 8 | 8 |
| | AC2 | 0 | 4 | 0 | 9 | 0 | 19 |
| Modulação | QPSK | | QPSK | | QPSK | | |
| | 16QAM | DQPSK | 16QAM | DQPSK | 16QAM | DQPSK | |
| | 64QAM | | 64QAM | | 64QAM | | |
| Símbolos por quadro | 204 | | | | | | |
| Tamanho símbolo | 252 μ s | | 504 μ s | | 1008 μ s | | |
| | 63 μ s (1/4) | | 126 μ s (1/4) | | 252 μ s (1/4) | | |
| | 31.5 μ s (1/8) | | 63 μ s (1/8) | | 126 μ s (1/8) | | |
| | 15.75 μ s (1/16) | | 31.5 μ s (1/16) | | 63 μ s (1/16) | | |
| Intervalo de guarda | 7.875 μ s (1/32) | | 15.75 μ s (1/32) | | 31.5 μ s (1/32) | | |
| | 64.26ms (1/4) | | 128.52ms (1/4) | | 257.04ms (1/4) | | |
| | 57.834ms (1/8) | | 115.668ms (1/8) | | 231.336ms (1/8) | | |
| | 54.621ms (1/16) | | 109.242ms (1/16) | | 218.484ms (1/16) | | |
| Tamanho quadro | 53.0145ms (1/32) | | 106.029ms (1/32) | | 212.058ms (1/32) | | |
| | | | | | | | |
| Frequência de amostragem IFFT | 512/63 = 8.12698... MHz | | | | | | |
| Codificação Interna | Codificador convolucional (1/2, 2/3,3/4, 5/6, 7/8) | | | | | | |
| Codificação externa | RS (204, 188) | | | | | | |

4.3.11 Estrutura de quadro OFDM para modulação diferencial

A estrutura de quadro para modulação diferencial é constituída de 108 portadoras para o modo 2k, 216 e 432 para os modos 4k e 8k, respectivamente.

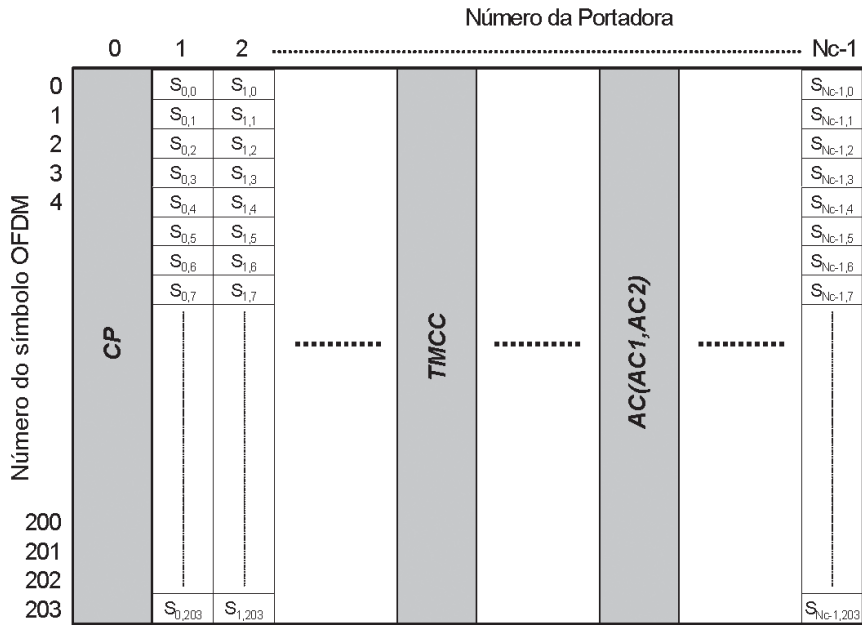


Figura 81 Estrutura de quadro OFDM para a modulação diferencial

TABELA 14

Arranjo de pilotos (CP, AC e TMCC) para a modulação diferencial no modo 2k

| Segmento No. | 11 | 9 | 7 | 5 | 3 | 1 | 0 | 2 | 4 | 6 | 8 | 10 | 12 |
|--------------|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|----|-----|-----|-----|-----|-----|
| CP | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| AC1_1 | 10 | 53 | 61 | 11 | 20 | 74 | 35 | 76 | 4 | 40 | 8 | 7 | 98 |
| AC1_2 | 28 | 83 | 100 | 101 | 40 | 100 | 79 | 97 | 89 | 89 | 64 | 89 | 101 |
| AC2_1 | 3 | 3 | 29 | 28 | 23 | 30 | 3 | 5 | 13 | 72 | 36 | 25 | 10 |
| AC2_2 | 45 | 15 | 41 | 45 | 63 | 81 | 72 | 18 | 93 | 95 | 48 | 30 | 30 |
| AC2_3 | 59 | 40 | 84 | 81 | 85 | 92 | 85 | 57 | 98 | 100 | 52 | 42 | 55 |
| AC2_4 | 77 | 58 | 93 | 91 | 105 | 103 | 89 | 92 | 102 | 105 | 74 | 104 | 81 |
| TMCC 1 | 13 | 25 | 4 | 36 | 10 | 7 | 49 | 31 | 16 | 5 | 78 | 34 | 23 |
| TMCC 2 | 50 | 63 | 7 | 48 | 28 | 25 | 61 | 39 | 30 | 10 | 82 | 48 | 37 |
| TMCC 3 | 70 | 73 | 17 | 55 | 44 | 47 | 96 | 47 | 37 | 21 | 85 | 54 | 51 |
| TMCC 4 | 83 | 80 | 51 | 59 | 47 | 60 | 99 | 65 | 74 | 44 | 98 | 70 | 68 |
| TMCC 5 | 87 | 93 | 71 | 86 | 54 | 87 | 104 | 72 | 83 | 61 | 102 | 101 | 105 |

TABELA 15

Arranjo de pilotos (CP, AC e TMCC) para a modulação diferencial no modo 4k

| Segmento No. | 11 | 9 | 7 | 5 | 3 | 1 | 0 | 2 | 4 | 6 | 8 | 10 | 12 |
|----------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| CP | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| AC1_1 | 10 | 61 | 20 | 35 | 4 | 8 | 98 | 53 | 11 | 74 | 76 | 40 | 7 |
| AC1_2 | 28 | 100 | 40 | 79 | 89 | 64 | 101 | 83 | 101 | 100 | 97 | 89 | 89 |
| AC1_3 | 161 | 119 | 182 | 184 | 148 | 115 | 118 | 169 | 128 | 143 | 112 | 116 | 206 |
| AC1_4 | 191 | 209 | 208 | 205 | 197 | 197 | 136 | 208 | 148 | 187 | 197 | 172 | 209 |
| AC2_1 | 3 | 29 | 23 | 3 | 13 | 36 | 10 | 3 | 28 | 30 | 5 | 72 | 25 |
| AC2_2 | 45 | 41 | 63 | 72 | 93 | 48 | 30 | 15 | 45 | 81 | 18 | 95 | 30 |
| AC2_3 | 59 | 84 | 85 | 85 | 98 | 52 | 55 | 40 | 81 | 92 | 57 | 100 | 42 |
| AC2_4 | 77 | 93 | 105 | 89 | 102 | 74 | 81 | 58 | 91 | 103 | 92 | 105 | 104 |
| AC2_5 | 108 | 108 | 108 | 108 | 108 | 108 | 108 | 108 | 108 | 108 | 108 | 108 | 108 |
| AC2_6 | 111 | 136 | 138 | 113 | 180 | 133 | 111 | 137 | 131 | 111 | 121 | 144 | 118 |
| AC2_7 | 123 | 153 | 189 | 126 | 203 | 138 | 153 | 149 | 171 | 180 | 201 | 156 | 138 |
| AC2_8 | 148 | 189 | 200 | 165 | 208 | 150 | 167 | 192 | 193 | 193 | 206 | 160 | 163 |
| AC2_9 | 166 | 199 | 211 | 200 | 213 | 212 | 185 | 201 | 213 | 197 | 210 | 182 | 189 |
| TMCC 1 | 13 | 4 | 10 | 49 | 16 | 78 | 23 | 25 | 36 | 7 | 31 | 5 | 34 |
| TMCC 2 | 50 | 7 | 28 | 61 | 30 | 82 | 37 | 63 | 48 | 25 | 39 | 10 | 48 |
| TMCC 3 | 70 | 17 | 44 | 96 | 37 | 85 | 51 | 73 | 55 | 47 | 47 | 21 | 54 |
| TMCC 4 | 83 | 51 | 47 | 99 | 74 | 98 | 68 | 80 | 59 | 60 | 65 | 44 | 70 |
| TMCC 5 | 87 | 71 | 54 | 104 | 83 | 102 | 105 | 93 | 86 | 87 | 72 | 61 | 101 |
| TMCC 6 | 133 | 144 | 115 | 139 | 113 | 142 | 121 | 112 | 118 | 157 | 124 | 186 | 131 |
| TMCC 7 | 171 | 156 | 133 | 147 | 118 | 156 | 158 | 115 | 136 | 169 | 138 | 190 | 145 |
| TMCC 8 | 181 | 163 | 155 | 155 | 129 | 162 | 178 | 125 | 152 | 204 | 145 | 193 | 159 |
| TMCC 9 | 188 | 167 | 168 | 173 | 152 | 178 | 191 | 159 | 155 | 207 | 182 | 206 | 176 |
| TMCC 10 | 201 | 194 | 195 | 180 | 169 | 209 | 195 | 179 | 162 | 212 | 191 | 210 | 213 |

TABELA 16

Arranjo de pilotos (CP, AC e TMCC) para a modulação diferencial no modo 8k

| Segmento No. | 11 | 9 | 7 | 5 | 3 | 1 | 0 | 2 | 4 | 6 | 8 | 10 | 12 |
|---------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| CP | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| AC1_1 | 10 | 20 | 4 | 98 | 11 | 76 | 7 | 61 | 35 | 8 | 53 | 74 | 40 |
| AC1_2 | 28 | 40 | 89 | 101 | 101 | 97 | 89 | 100 | 79 | 64 | 83 | 100 | 89 |
| AC1_3 | 161 | 182 | 148 | 118 | 128 | 112 | 206 | 119 | 184 | 115 | 169 | 143 | 116 |
| AC1_4 | 191 | 208 | 197 | 136 | 148 | 197 | 209 | 209 | 205 | 197 | 208 | 187 | 172 |
| AC1_5 | 277 | 251 | 224 | 269 | 290 | 256 | 226 | 236 | 220 | 314 | 227 | 292 | 223 |
| AC1_6 | 316 | 295 | 280 | 299 | 316 | 305 | 244 | 256 | 305 | 317 | 317 | 313 | 305 |
| AC1_7 | 335 | 400 | 331 | 385 | 359 | 332 | 377 | 398 | 364 | 334 | 344 | 328 | 422 |
| AC1_8 | 425 | 421 | 413 | 424 | 403 | 388 | 407 | 424 | 413 | 352 | 364 | 413 | 425 |
| AC2_1 | 3 | 23 | 13 | 10 | 28 | 5 | 25 | 29 | 3 | 36 | 3 | 30 | 72 |
| AC2_2 | 45 | 63 | 93 | 30 | 45 | 18 | 30 | 41 | 72 | 48 | 15 | 81 | 95 |
| AC2_3 | 59 | 85 | 98 | 55 | 81 | 57 | 42 | 84 | 85 | 52 | 40 | 92 | 100 |
| AC2_4 | 77 | 105 | 102 | 81 | 91 | 92 | 104 | 93 | 89 | 74 | 58 | 103 | 105 |
| AC2_5 | 108 | 108 | 108 | 108 | 108 | 108 | 108 | 108 | 108 | 108 | 108 | 108 | 108 |
| AC2_6 | 111 | 138 | 180 | 111 | 131 | 121 | 118 | 136 | 113 | 133 | 137 | 111 | 144 |
| AC2_7 | 123 | 189 | 203 | 153 | 171 | 201 | 138 | 153 | 126 | 138 | 149 | 180 | 156 |
| AC2_8 | 148 | 200 | 208 | 167 | 193 | 206 | 163 | 189 | 165 | 150 | 192 | 193 | 160 |
| AC2_9 | 166 | 211 | 213 | 185 | 213 | 210 | 189 | 199 | 200 | 212 | 201 | 197 | 182 |
| AC2_10 | 216 | 216 | 216 | 216 | 216 | 216 | 216 | 216 | 216 | 216 | 216 | 216 | 216 |
| AC2_11 | 245 | 219 | 252 | 219 | 246 | 288 | 219 | 239 | 229 | 226 | 244 | 221 | 241 |

| | | | | | | | | | | | | | |
|----------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| AC2_12 | 257 | 288 | 264 | 231 | 297 | 311 | 261 | 279 | 309 | 246 | 261 | 234 | 246 |
| AC2_13 | 300 | 301 | 268 | 256 | 308 | 316 | 275 | 301 | 314 | 271 | 297 | 273 | 258 |
| AC2_14 | 309 | 305 | 290 | 274 | 319 | 321 | 293 | 321 | 318 | 297 | 307 | 308 | 320 |
| AC2_15 | 324 | 324 | 324 | 324 | 324 | 324 | 324 | 324 | 324 | 324 | 324 | 324 | 324 |
| AC2_16 | 352 | 329 | 349 | 353 | 327 | 360 | 327 | 354 | 396 | 327 | 347 | 337 | 334 |
| AC2_17 | 369 | 342 | 354 | 365 | 396 | 372 | 339 | 405 | 419 | 369 | 387 | 417 | 354 |
| AC2_18 | 405 | 381 | 366 | 408 | 409 | 376 | 364 | 416 | 424 | 383 | 409 | 422 | 379 |
| AC2_19 | 415 | 416 | 428 | 417 | 413 | 398 | 382 | 427 | 429 | 401 | 429 | 426 | 405 |
| TMCC 1 | 13 | 10 | 16 | 23 | 36 | 31 | 34 | 4 | 49 | 78 | 25 | 7 | 5 |
| TMCC 2 | 50 | 28 | 30 | 37 | 48 | 39 | 48 | 7 | 61 | 82 | 63 | 25 | 10 |
| TMCC 3 | 70 | 44 | 37 | 51 | 55 | 47 | 54 | 17 | 96 | 85 | 73 | 47 | 21 |
| TMCC 4 | 83 | 47 | 74 | 68 | 59 | 65 | 70 | 51 | 99 | 98 | 80 | 60 | 44 |
| TMCC 5 | 87 | 54 | 83 | 105 | 86 | 72 | 101 | 71 | 104 | 102 | 93 | 87 | 61 |
| TMCC 6 | 133 | 115 | 113 | 121 | 118 | 124 | 131 | 144 | 139 | 142 | 112 | 157 | 186 |
| TMCC 7 | 171 | 133 | 118 | 158 | 136 | 138 | 145 | 156 | 147 | 156 | 115 | 169 | 190 |
| TMCC 8 | 181 | 155 | 129 | 178 | 152 | 145 | 159 | 163 | 155 | 162 | 125 | 204 | 193 |
| TMCC 9 | 188 | 168 | 152 | 191 | 155 | 182 | 176 | 167 | 173 | 178 | 159 | 207 | 206 |
| TMCC 10 | 201 | 195 | 169 | 195 | 162 | 191 | 213 | 194 | 180 | 209 | 179 | 212 | 210 |
| TMCC 11 | 220 | 265 | 294 | 241 | 223 | 221 | 229 | 226 | 232 | 239 | 252 | 247 | 250 |
| TMCC 12 | 223 | 277 | 298 | 279 | 241 | 226 | 266 | 244 | 246 | 253 | 264 | 255 | 264 |
| TMCC 13 | 233 | 312 | 301 | 289 | 263 | 237 | 286 | 260 | 253 | 267 | 271 | 263 | 270 |
| TMCC 14 | 267 | 315 | 314 | 296 | 276 | 260 | 299 | 263 | 290 | 284 | 275 | 281 | 286 |
| TMCC 15 | 287 | 320 | 318 | 309 | 303 | 277 | 303 | 270 | 299 | 321 | 302 | 288 | 317 |
| TMCC 16 | 360 | 355 | 358 | 328 | 373 | 402 | 349 | 331 | 329 | 337 | 334 | 340 | 347 |
| TMCC 17 | 372 | 363 | 372 | 331 | 385 | 406 | 387 | 349 | 334 | 374 | 352 | 354 | 361 |
| TMCC 18 | 379 | 371 | 378 | 341 | 420 | 409 | 397 | 371 | 345 | 394 | 368 | 361 | 375 |
| TMCC 19 | 383 | 389 | 394 | 375 | 423 | 422 | 404 | 384 | 368 | 407 | 371 | 398 | 392 |
| TMCC 20 | 410 | 396 | 425 | 395 | 428 | 426 | 417 | 411 | 385 | 411 | 378 | 407 | 429 |

4.3.12 Estrutura de quadro OFDM para modulação coerente

Para a modulação coerente, é necessário transmitir pilotos de referência espalhados como pode ser visto na Tabela 17.

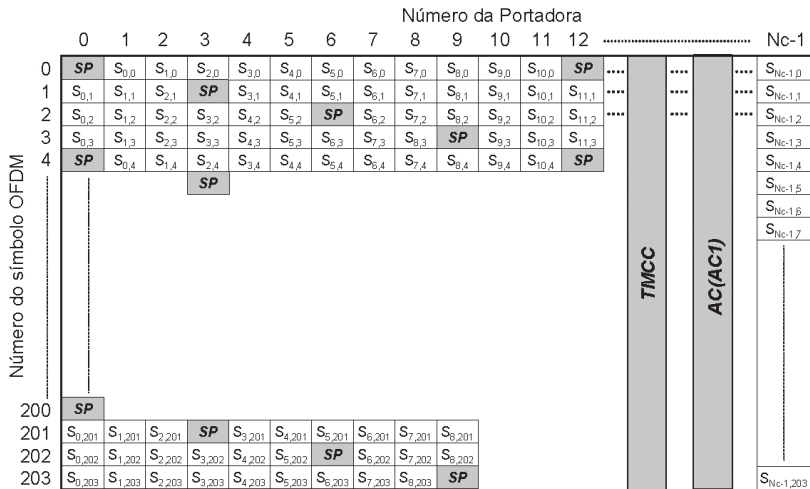


Figura 82 Estrutura de quadro OFDM para a modulação coerente

TABELA 17

Arranjo de pilotos AC e TMCC para a Modulação Coerente

| Modo 2k | | | | | | | | | | | | | |
|--------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Segmento No. | 11 | 9 | 7 | 5 | 3 | 1 | 0 | 2 | 4 | 6 | 8 | 10 | 12 |
| AC1_1 | 10 | 53 | 61 | 11 | 20 | 74 | 35 | 76 | 4 | 40 | 8 | 7 | 98 |
| AC1_2 | 28 | 83 | 100 | 101 | 40 | 100 | 79 | 97 | 89 | 89 | 64 | 89 | 101 |
| TMCC 1 | 70 | 25 | 17 | 86 | 44 | 47 | 49 | 31 | 83 | 61 | 85 | 101 | 23 |
| Modo 4k | | | | | | | | | | | | | |
| Segmento No. | 11 | 9 | 7 | 5 | 3 | 1 | 0 | 2 | 4 | 6 | 8 | 10 | 12 |
| AC1_1 | 10 | 61 | 20 | 35 | 4 | 8 | 98 | 53 | 11 | 74 | 76 | 40 | 7 |
| AC1_2 | 28 | 100 | 40 | 79 | 89 | 64 | 101 | 83 | 101 | 100 | 97 | 89 | 89 |
| AC1_3 | 161 | 119 | 182 | 184 | 148 | 115 | 118 | 169 | 128 | 143 | 112 | 116 | 206 |
| AC1_4 | 191 | 209 | 208 | 205 | 197 | 197 | 136 | 208 | 148 | 187 | 197 | 172 | 209 |
| TMCC 1 | 70 | 17 | 44 | 49 | 83 | 85 | 23 | 25 | 86 | 47 | 31 | 61 | 101 |
| TMCC 2 | 133 | 194 | 155 | 139 | 169 | 209 | 178 | 125 | 152 | 157 | 191 | 193 | 131 |
| Modo 8k | | | | | | | | | | | | | |
| Segmento No. | 11 | 9 | 7 | 5 | 3 | 1 | 0 | 2 | 4 | 6 | 8 | 10 | 12 |
| AC1_1 | 10 | 20 | 4 | 98 | 11 | 76 | 7 | 61 | 35 | 8 | 53 | 74 | 40 |
| AC1_2 | 28 | 40 | 89 | 101 | 101 | 97 | 89 | 100 | 79 | 64 | 83 | 100 | 89 |
| AC1_3 | 161 | 182 | 148 | 118 | 128 | 112 | 206 | 119 | 184 | 115 | 169 | 143 | 116 |
| AC1_4 | 191 | 208 | 197 | 136 | 148 | 197 | 209 | 209 | 205 | 197 | 208 | 187 | 172 |
| AC1_5 | 277 | 251 | 224 | 269 | 290 | 256 | 226 | 236 | 220 | 314 | 227 | 292 | 223 |
| AC1_6 | 316 | 295 | 280 | 299 | 316 | 305 | 244 | 256 | 305 | 317 | 317 | 313 | 305 |
| AC1_7 | 335 | 400 | 331 | 385 | 359 | 332 | 377 | 398 | 364 | 334 | 344 | 328 | 422 |
| AC1_8 | 425 | 421 | 413 | 424 | 403 | 388 | 407 | 424 | 413 | 352 | 364 | 413 | 425 |
| TMCC 1 | 70 | 44 | 83 | 23 | 86 | 31 | 101 | 17 | 49 | 85 | 25 | 47 | 61 |
| TMCC 2 | 133 | 155 | 169 | 178 | 152 | 191 | 131 | 194 | 139 | 209 | 125 | 157 | 193 |
| TMCC 3 | 233 | 265 | 301 | 241 | 263 | 277 | 286 | 260 | 299 | 239 | 302 | 247 | 317 |
| TMCC 4 | 410 | 355 | 425 | 341 | 373 | 409 | 349 | 371 | 385 | 394 | 368 | 407 | 347 |

4.3.13 Sinais de referência

Várias portadoras do quadro OFDM são moduladas com informações de referência conhecidas pelo receptor. Essas portadoras são transmitidas com uma potência superior a das portadoras de dados. As informações transmitidas nessas portadoras são chamadas de pilotos contínuas ou espalhadas.

Cada piloto contínuo, coincide com as portadoras pilotos espalhadas a cada quatro símbolos. O número de portadoras usadas para dados é constante para cada segmento: 96 para o modo 2k, 192 para o modo 4k e 384 para o modo 8k.

A informação modulante para as portadoras pilotos contínuas ou espalhadas são originadas por um polinômio PRBS $X^{11} + X^2 + 1$ como pode ser visto na Figura 83.

Cada símbolo OFDM possui informação de dados e referência.

Em resumo, além das portadoras de dados, um quadro OFDM também possui portadoras pilotos:

Espalhadas (SP);

Contínuas (CP);

Parâmetros auxiliares (AC);

Parâmetros de transmissão, multiplexação, controle e configuração (TMCC);

As portadoras pilotos são utilizadas para a sincronização de quadro, sincronização de frequência, sincronização de tempo, estimação de canal, identificação do modo de transmissão e correção de ruído de fase da mesma forma que no sistema europeu.

4.3.14 Localização das portadoras pilotos espalhadas

As portadoras pilotos com informações de referência espalhadas são transmitidas com uma potência superior à das portadoras de dados. A modulação utilizada pelas portadoras pilotos é a BPSK e pode ser representada por:

$$\begin{aligned} \text{Re}(C_{m,l,k}) &= 4/3 \times 2(1/2 - W_k) \\ \text{Im}(C_{m,l,k}) &= 0 \end{aligned}$$

W_k assume valores 0 ou 1 provenientes do gerador PRBS.

A posição de cada piloto espalhado dentro de um quadro OFDM pode ser calculada utilizando-se a Equação 18:

$$k = K_{\min} + 3\text{mod}(l,4) + 12p \quad (18)$$

Onde p representa o número de pilotos adicionado, $p \geq 0$ e k deve ficar entre K_{\min} e K_{\max} .

4.3.15 Definição da seqüência de referência

As portadoras pilotos contínuas e espalhadas são moduladas de acordo com a seqüência PRBS W_k , correspondente ao seu respectivo índice k .

W_k assume valores 1 ou 0. A seqüência PRBS é inicializada com a primeira portadora e incrementada a cada portadora transmitida (piloto ou não). O gerador PRBS é iniciado com valor de acordo com a Tabela 18.

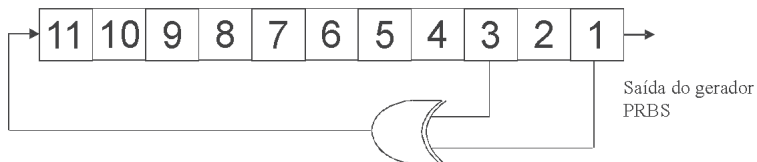


Figura 83 Gerador PRBS das portadoras pilotos

TABELA 18

Valores de inicialização do gerador PRBS

| Segmento No. | Valor inicial modo 2k | Valor inicial modo 4k | Valor inicial modo 8k |
|--------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| 11 | 111111111111 | 111111111111 | 111111111111 |
| 9 | 110110011111 | 011010111110 | 11011100101 |
| 7 | 011010111110 | 11011100101 | 10010100000 |
| 5 | 010001011110 | 11001000010 | 01110001001 |
| 3 | 11011100101 | 10010100000 | 00100011001 |
| 1 | 00101111010 | 00001011000 | 11100110110 |
| 0 | 11001000010 | 01110001001 | 00100001011 |
| 2 | 00010000100 | 00000100100 | 11100111101 |
| 4 | 10010100000 | 00100011001 | 01101010011 |
| 6 | 11110110000 | 01100111001 | 10111010010 |
| 8 | 00001011000 | 11100110110 | 01100010010 |
| 10 | 10100100111 | 00101010001 | 11110100101 |
| 12 | 01110001001 | 00100001011 | 00010011100 |

4.3.16 Formatação da TMCC

As *Transmission and Multiplexing Configuration Control* (TMCC), *SP Scattered Pilot* (SP) e *AC Auxiliary Channel* são transmitidas em DBPSK com a informação de dados e tem como objetivo informar ao receptor os parâmetros de transmissão e informações auxiliares. As TMCC, SP e AC também são transmitidas com uma potência superior (+4/3, 0) e (-4/3, 0) para as informações 0 e 1, respectivamente. A Figura 84 detalha os 204 bits utilizados na TMCC.

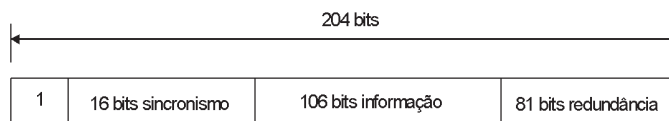


Figura 84 Quadro TMCC

4.3.17 Sinal de RF

Como o sinal OFDM é constituído de várias portadoras ortogonais moduladas, cada símbolo pode ser considerado como uma única portadora com duração T_U .

$$s(t) = \text{Re} \left\{ e^{j2\pi f_c t} \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{k=0}^{K-1} C_{n,k} \cdot \Psi_{n,k}(t) \right\}, \quad (19)$$

$$\Psi_{n,k}(t) = \begin{cases} e^{j2\pi \frac{k-k_c}{TU} (t-\Delta-nTs)} & (n \cdot Ts \leq t \leq (n+1) \cdot Ts) \\ 0 & t < n \cdot Ts, (n+1) \cdot Ts \leq t \end{cases}, \quad (20)$$

Onde:

- k número de portadoras
- n número do símbolo OFDM
- K número de portadoras transmitidas no modo 1, 2 e 3
- T_S duração do símbolo OFDM com intervalo de guarda
- T_U duração do símbolo OFDM sem intervalo de guarda
- Δ duração do intervalo de guarda
- f_c frequência central do canal de RF
- Kc índice da portadora relativo ao centro da frequência
- $c_{n,k}$ dado a ser transmitido representado por um número complexo que modulará uma portadora k no símbolo n do quadro OFDM
- $s(t)$ sinal de RF

4.3.18 Intervalo de guarda

O intervalo de guarda é inserido após a modulação OFDM e consiste em uma extensão cíclica do símbolo OFDM. O tamanho da réplica T_u equivale à duração do intervalo de guarda. A Figura 85 ilustra um símbolo OFDM com intervalo de guarda.

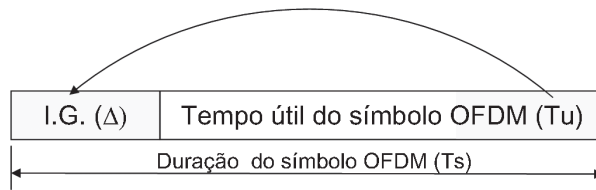


Figura 85 Símbolo OFDM com extensão cíclica

4.3.19 Taxa de transmissão

A taxa útil de bits transmitida no sistema ISDB-T pode ser calculada usando-se a Equação 21. Pode-se observar que o tamanho da FFT não altera a taxa de bits na saída. As tabelas 19 e 20 ilustram as possíveis taxas de transmissão para a modulação parcial ou total com 13 segmentos.

$$Rb = \frac{1}{T_u} \cdot Nc \cdot Md \cdot R_{cc} \cdot R_{RS} \cdot k' \cdot Ns, \quad (21)$$

$$k' = \frac{1}{k + 1}, \quad (22)$$

Onde:

R_b = Taxa de bits efetiva transmitida

N_s = Número de segmentos

T_u = Tempo útil do símbolo OFDM: 63/250 para 2k, 63/125 para 4k e 126/125 para 8k

M_d = Método de modulação: QPSK = 2, 16-QAM = 4, e 64-QAM = 6

N_c = Número de portadoras úteis = 96 para 2k, 192 para 4k e 384 para 8k

R_{cc} = Razão do codificador convolucional = 1/2, 2/3, 3/4, 5/6 ou 7/8

R_{RS} = Razão do codificador *Reed Solomon* = 188/204

k = Razão do intervalo de guarda = 1/4, 1/8, 1/16 ou 1/32

TABELA 19

Taxa de bits útil para um segmento

| Modulação | Taxa | Número de TSPs Transmitidos (Modo 1/2/3) | Taxa de Dados (kbps) Intervalo de guarda | | | |
|---------------|------|--|---|---------|---------|---------|
| | | | 1/4 | 1/8 | 1/16 | 1/32 |
| DQPSK QPSK | 1/2 | 12/24/48 | 280.85 | 312.06 | 330.42 | 340.43 |
| | 2/3 | 16/32/64 | 374.47 | 416.08 | 440.56 | 453.91 |
| | 3/4 | 18/36/72 | 421.28 | 468.09 | 495.63 | 510.65 |
| | 5/6 | 20/40/80 | 468.09 | 520.10 | 550.70 | 567.39 |
| | 7/8 | 21/42/84 | 491.50 | 546.11 | 578.23 | 595.76 |
| 16QAM | 1/2 | 24/48/96 | 561.71 | 624.13 | 660.84 | 680.87 |
| | 2/3 | 32/64/128 | 748.95 | 832.17 | 881.12 | 907.82 |
| | 3/4 | 36/72/144 | 842.57 | 936.19 | 991.26 | 1021.30 |
| | 5/6 | 40/80/160 | 936.19 | 1040.21 | 1101.40 | 1134.78 |
| | 7/8 | 42/84/168 | 983.00 | 1092.22 | 1156.47 | 1191.52 |
| 64QAM | 1/2 | 36/72/144 | 842.57 | 936.19 | 991.26 | 1021.30 |
| | 2/3 | 48/96/192 | 1123.43 | 1248.26 | 1321.68 | 1361.74 |
| | 3/4 | 54/108/216 | 1263.86 | 1404.29 | 1486.90 | 1531.95 |
| | 5/6 | 60/120/240 | 1404.29 | 1560.32 | 1652.11 | 1702.17 |
| | 7/8 | 63/126/252 | 1474.50 | 1638.34 | 1734.71 | 1787.28 |

TABELA 20

Taxa de bits útil para treze segmentos

| Modulação | Taxa | Número de TSPs Transmitidos (Modo 1/2/3) | Taxa de Dados (Mbps) | | | |
|-----------------------------|------|--|----------------------|--------|--------|--------|
| | | | Intervalo de guarda | | | |
| | | | 1/4 | 1/8 | 1/16 | 1/32 |
| DQPSK QPSK | 1/2 | 156/312/624 | 3.651 | 4.056 | 4.295 | 4.425 |
| | 2/3 | 208/216/832 | 4.868 | 5.409 | 5.727 | 5.900 |
| | 3/4 | 234/468/936 | 5.476 | 6.085 | 6.443 | 6.638 |
| | 5/6 | 260/520/1040 | 6.085 | 6.761 | 7.159 | 7.376 |
| | 7/8 | 273/546/1092 | 6.389 | 7.099 | 7.517 | 7.744 |
| 16QAM | 1/2 | 312/624/1248 | 7.302 | 8.113 | 8.590 | 8.851 |
| | 2/3 | 416/832/1664 | 9.736 | 10.818 | 11.454 | 11.801 |
| | 3/4 | 468/936/1872 | 10.953 | 12.170 | 12.886 | 13.276 |
| | 5/6 | 520/1040/2080 | 12.170 | 13.522 | 14.318 | 14.752 |
| | 7/8 | 546/1092/2184 | 12.779 | 14.198 | 15.034 | 15.489 |
| 64QAM | 1/2 | 468/936/1872 | 10.953 | 12.170 | 12.886 | 13.276 |
| | 2/3 | 624/1248/2496 | 14.604 | 16.227 | 17.181 | 17.702 |
| | 3/4 | 702/1404/2808 | 16.430 | 18.255 | 19.329 | 19.915 |
| | 5/6 | 780/1560/3120 | 18.255 | 20.284 | 21.477 | 22.128 |
| | 7/8 | 819/1638/3276 | 19.168 | 21.298 | 22.551 | 23.234 |