

3

Aspectos de transmissão

O padrão ISDB-T tem várias semelhanças com os outros padrões de TV Digital, principalmente nos aspectos relacionados à transmissão, mas também possui suas próprias peculiaridades. Este capítulo apresenta as características de transmissão do ISDB-T e descreve o sinal OFDM, que é a chave da modulação deste padrão.

3.1

O OFDM

O OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplex*) é estudado há mais de trinta anos, e sua aplicação é principalmente voltada para transmissão de dados em alta velocidade. Os avanços na área da computação permitiram que esta ferramenta se tornasse uma solução viável, pois no passado não havia recursos tecnológicos, ou quando haviam eram muito caros. O desenvolvimento do DSP e do VLSI foram importantes para a implementação do OFDM, mas foi o uso da DFT (*Discrete Fourier Transform*), através da sua implementação computacional FFT que promoveu o crescimento desta tecnologia.

3.1.1

Princípios do OFDM

Numa transmissão de dados serial, cada símbolo é transmitido seqüencialmente, ocupando toda a faixa de freqüência disponível. Já numa transmissão paralela, os símbolos são enviados para um conversor serial paralelo, que cria vários pequenos fluxos de dados, para que então possam ser transmitidos. Desta forma é possível enviar vários dados simultaneamente, de forma que cada fluxo ocupe apenas uma fatia da banda de freqüência disponível. Durante o processo de conversão serial/paralelo a seqüência de dados não é mais mantida, criando assim um efeito de embaralhamento.

A transmissão paralela tem a característica sofrer a ação do desvanecimento seletivo, assim como a transmissão serial, porém com efeitos diferentes. Na transmissão paralela, como a banda de frequência é segmentada em várias pequenas sub bandas, o efeito deste desvanecimento é plano por portadora, ou seja, mais simples de ser combatido pelos equalizadores. Já na transmissão serial, o desvanecimento é seletivo em frequência sobre toda a banda e conseqüentemente exige o uso de equalizadores mais sofisticados.

Outra vantagem da transmissão paralela está relacionada aos efeitos do desvanecimento nas seqüência de dados. Na transmissão paralela, a seqüência inicial é desfeita pelo conversor serial paralelo, criando assim um efeito de embaralhamento dos dados, que não ocorre na transmissão serial. Esta característica facilita a reconstrução das informações pelo código corretor de erros, pois o efeito do desvanecimento é a destruição de um bloco de bits seqüenciais. O embaralhamento cria um efeito de dispersão dos erros na seqüência inicial, melhorando a performance do códigos corretores.

A técnica empregada pela transmissão paralela, de divisão da banda de frequência em N sub bandas sem sobreposição é conhecida como FDM (*Frequency Division Multiplex*). O OFDM é uma derivação do FDM, pois utiliza a mesma técnica de segmentação da banda, porém de uma forma um pouco diferente. Teoricamente as sub bandas do OFDM podem se sobrepôr sem causar interferência pois são matematicamente ortogonais entre si. Na prática, existe uma pequena interferência entre elas, pois a banda de frequência destinada à transmissão é limitada, e a ortogonalidade perfeita só existe em uma banda teoricamente infinita.

O OFDM pode ser definido como uma técnica de modulação multi-portadora, onde o espaçamento entre subportadoras é cuidadosamente escolhido de forma garantir a ortogonalidade entre elas. Desta forma é possível atingir altas taxas de transmissão, com boa imunidade a ruídos e uso eficiente da banda.

3.1.2 DFT

A FFT que é o método computacional empregado para executar a DFT, é muito utilizada no estudo do espectro de sinais. Sua representação no domínio do tempo pode ser descrita por um conjunto de N amostras de um sinal, denominadas por $f[m]$, onde $m = 0, 1, 2, \dots, N - 1$. A DFT é dada pelo conjunto das N amostras deste sinal no domínio da frequência,

denotada por $F(n)$, onde $n = 0, 1, 2, \dots, N - 1$ e definidas por:

$$F(n) = \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} f[m] e^{-j2\pi nm/N} \quad (3-1)$$

Diz-se então que $f[m] \leftrightarrow F(n)$ formam um par de transformada e a reobtenção do sinal no domínio do tempo pode ser feita usando a transformada inversa discreta de Fourier (IDFT).

$$f[k] = \sum_{n=0}^{N-1} F(n) e^{j2\pi nm/N} \quad (3-2)$$

3.1.3 Representação do sinal através da DFT

Considerando a seqüência $(d_0, d_1, d_2, \dots, d_{N-1})$, onde cada símbolo d_n é um número complexo $d_n = a_n + jb_n$. Se a transformada discreta de Fourier DFT for executada, o vetor D resultante é $D = (D_0, D_1, \dots, D_{N-1})$ com N números complexos,

$$D_m = \sum_{n=0}^{N-1} d_n e^{-j2\pi nm/N} = \sum_{n=0}^{N-1} d_n e^{-j2\pi f_n t_m} \quad m = 0, 1, 2, N - 1 \quad (3-3)$$

onde $f_n = n/(N\Delta t)$, $t_m = m\Delta t$ e Δt é a duração do símbolo d_n da seqüência serial de dados, arbitrariamente escolhida. A parte real do vetor D tem componentes

$$Y_m = \sum_{n=0}^{N-1} (a_n \cos 2\pi f_n t_m + b_n \sin 2\pi f_n t_m) \quad m = 0, 1, 2, N - 1 \quad (3-4)$$

Ao passar por um filtro passa-baixa com intervalo de tempo Δt , estes componentes geram um sinal que se aproxima de um sinal multiplexado na freqüência

$$y_m = \sum_{n=0}^{N-1} (a_n \cos 2\pi f_n t + b_n \sin 2\pi f_n t) \quad 0 \leq t \leq N\Delta t \quad (3-5)$$

A dinâmica de um sistema OFDM baseado na FFT pode ser assim apresentada: O fluxo serial de dados é primeiramente inserido num conversor

serial paralelo, para que as informações possam ficar dispostas no número de subportadoras que o sistema terá na transmissão. Os dados são então transmitidos para um bloco mapeador, que transformará um grupo de bits em símbolos. Este mapeador pode ser o QPSK, o QAM16 ou outro mapeador qualquer. Os símbolos são então transportados para o bloco de processamento IFFT, que modula as informações em banda base, e então o conversor paralelo serial atua nos vários fluxos de dados, criando um único fluxo. Este novo fluxo serial de dados recebe o intervalo de guarda, e então é transportado para alta frequência para poder ser transmitido.

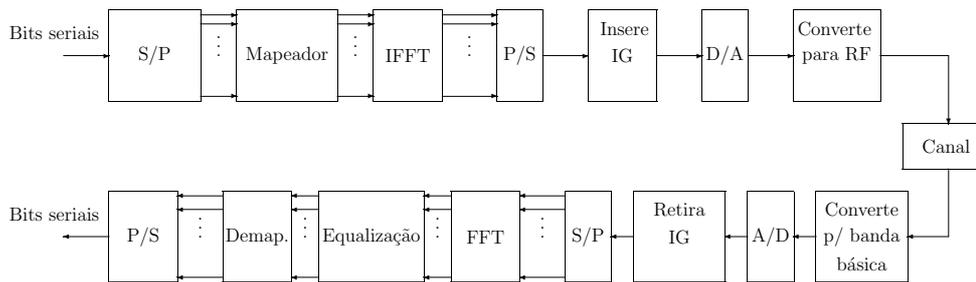


Figura 3.1: Diagrama em blocos de um sistema OFDM baseado na FFT

A inserção do intervalo de guarda se faz necessário para combater a interferência intersimbólica (ISI - *Intersymbol Interference*) entre símbolos OFDM causada pelo multipercurso. Após a inserção do intervalo de guarda IG os símbolos são convertidos em sinal contínuo, através de um filtro passa baixa, e então o sinal é levado para alta frequência. No receptor, um processo inverso é executado para a recuperação do sinal, mas ainda é adicionado um equalizador com uma derivação (*tap*) para corrigir as distorções produzidas pelo canal. A figura 3.1 apresenta o diagrama em blocos do processo.

Conforme dito anteriormente, as subportadoras OFDM são espaçadas de forma a garantir a ortogonalidade entre elas. A figura 3.2 apresenta o exemplo de um espectro de frequências de um sistema OFDM.

3.1.4 OFDM usando DFT

O uso da DFT pode ser apresentado através de uma seqüência de dados d_0, d_1, \dots, d_{N-1} , onde cada d_n é um símbolo complexo produzido por um esquema de modulação digital. Suponha então que uma IDFT (*Inverse Discrete Fourier Transform*) seja executada na seqüência d_n , de forma a produzir N números complexos S_m ($m = 0, 1, \dots, N - 1$) conforme a equação 3-6 e a figura 3.3.

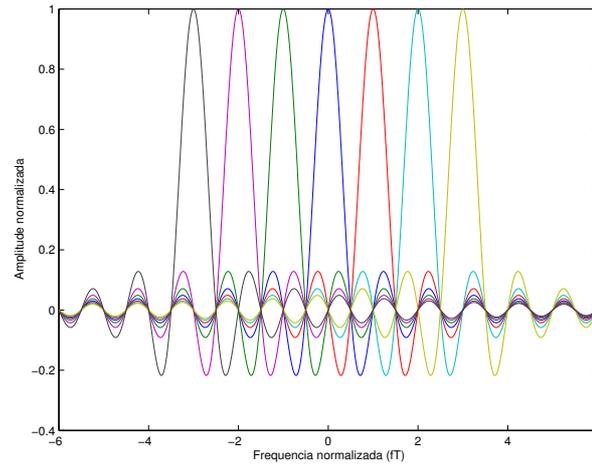


Figura 3.2: Espectro de frequências do sistema OFDM

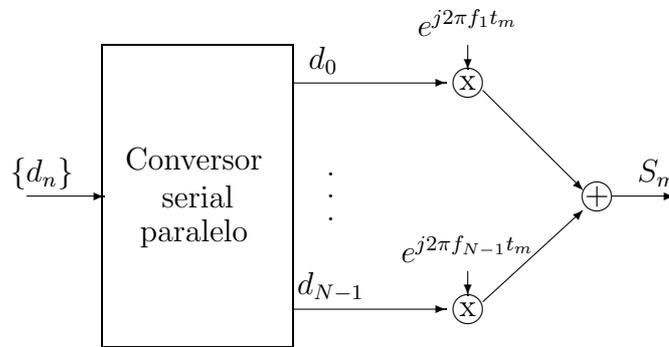


Figura 3.3: O modulador OFDM

Pode-se mostrar matematicamente que :

$$S_m = \sum_{n=0}^{N-1} d_n e^{j2\pi \frac{nm}{N}} = \sum_{n=0}^{N-1} d_n e^{j2\pi f_n t_m}, \quad [m = 0, 1, \dots, n - 1] \quad (3-6)$$

onde:

$$f_n = \frac{n}{NT_s} \quad e \quad t_m = mT_s \quad (3-7)$$

e T_s representa o intervalo de símbolo original. Passando a parte real da seqüência de símbolos apresentada na equação 3-6 por um filtro passa baixa, onde cada símbolo tem a duração de T_s segundos, temos um sinal resultantes igual a expressão apresentada na equação 3-8.

$$y(t) = \Re \left\{ \sum_{n=0}^{N-1} d_n \exp \left(j2\pi \frac{n}{T} t \right) \right\} \quad \text{onde } 0 \leq t \leq T \quad (3-8)$$

onde T é definido como NT_s . O sinal $y(t)$ representa a versão em banda básica do sinal OFDM.

3.1.5 Intervalo de guarda e prefixo cíclico

Uma das principais vantagens do OFDM é a efetiva melhora do sinal recebido sob condições de multipercurso, freqüentemente encontrado nas comunicações móveis. A redução da taxa de símbolo de N vezes resulta numa proporcional diminuição do espalhamento de atraso. Espalhamento de atraso é o fenômeno que ocorre com o sinal que é atrasado de maneira diferente quando se encontra em faixas de freqüências distintas [3, 1].

Para evitar o efeito do espalhamento de atraso, um intervalo de guarda é introduzido entre os símbolos OFDM transmitidos, sendo que este intervalo é maior ou igual ao máximo atraso provocado pelo canal. Caso o intervalo de guarda não seja respeitado, pode ocorrer uma sobreposição de quadros, e conseqüentemente a interferência intersimbólica. Para evitar este tipo de interferência, um prefixo cíclico é introduzido ao símbolo, que é composto por uma cópia de parte do símbolo original, conforme ilustrado na figura 3.4. Definimos T_s como tamanho original do símbolo em segundos, T_g como tamanho do intervalo de guarda IG introduzido ao símbolo e T_{total} a soma dos dois tempos que compõem um símbolo OFDM. A equação 3-9 apresenta os novos tamanhos do quadro transmitido, após a inserção do IG.

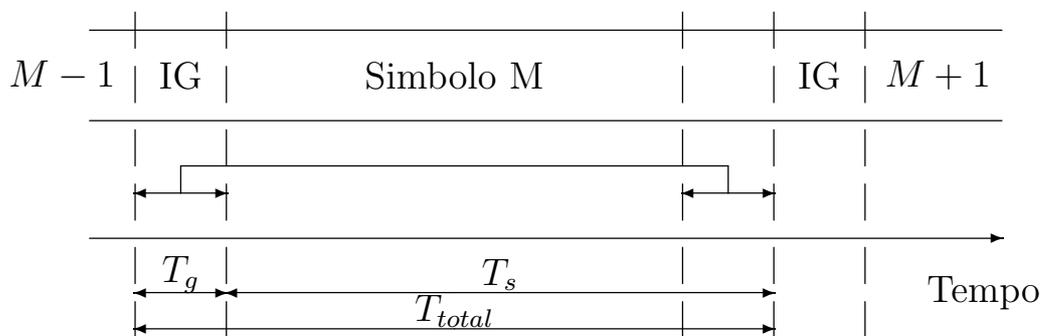


Figura 3.4: Inserção do intervalo de guarda

$$T_{total} = T_s + T_g \quad (3-9)$$

3.1.6 A escolha dos elementos chave

Depois de definida a banda a ser utilizada, o intervalo de guarda e a taxa de transmissão, alguns elementos chave devem ser determinados.

Duração do símbolo

A duração T do símbolo afeta o espaçamento entre sub portadoras e a latência do processo de codificação. Para manter a taxa de dados, um aumento do tamanho da informação a ser transmitida resulta num aumento do número de sub portadoras e conseqüentemente no tamanho da FFT (assumindo que a constelação utilizada seja fixa). Na prática, o *offset* entre as portadoras e a estabilidade de fase determinam o espaçamento mínimo entre as subportadoras. Se a transmissão for destinada para receptores móveis, o espaçamento entre subportadoras deve ser grande o suficiente para que o efeito do efeito Doppler não interfira no sinal. Geralmente a duração de um quadro é escolhida baseadas nos parâmetros acima citados, que garantem a estabilidade da transmissão.

Número de subportadoras

O número de subportadoras pode ser determinado pela largura de banda de frequência disponível para transmissão, e a taxa de transmissão de cada sub portadora. Necessariamente, o número de subportadoras do sistema é o mesmo número de pontos da FFT. Em aplicações de HDTV, o número de portadora pode chegar a 8192, para que possam ser respeitadas a taxa de transmissão e a banda de guarda requerida.

Esquema de modulação

O esquema de modulação pode ser determinado pelo nível de potência transmitida ou pela eficiência espectral. O esquema de modulação, que transforma um conjunto de bits em símbolos, transmitirá mais bits na medida que sua constelação tiver mais pontos. Normalmente a escolha do esquema de modulação se dá pelo compromisso entre a taxa de dados transmitida e a robustez contra ruídos inseridos pelo canal. Outra vantagem do OFDM é a possibilidade que os dados das subportadoras podem ser mapeados por diferentes esquemas de modulação simultaneamente, permitindo diferentes configurações para um mesmo conjunto de dados transmitidos.

3.1.7 Coded OFDM

O esquema de codificação empregada influenciará diretamente no desempenho da transmissão. O entrelaçador tem papel importante, assim

como os codificadores internos e externos. O entrelaçador efetua um embaralhamento nos dados, e torna o efeito dos desvanecimentos menos agressivos. Isto por que os erros provocados pelo desvanecimento não atuarão em blocos, e sim de forma espalhada. A escolha dos algoritmos de codificação interna e externa também são de fundamental importância, pois quanto maior a capacidade de correção destes códigos, mais imune aos efeitos do canal será o sistema, e conseqüentemente melhor o seu desempenho. O uso da codificação aliada à transmissão OFDM é conhecida por COFDM (*Coded Orthogonal Frequency Division Multiplex*).

3.2

A transmissão no ISDB-T

Aspectos da transmissão do ISDB-T são tratados nesta sessão [14] .

3.2.1

Largura de banda

O ISDB-T deve respeitar a banda de 6 MHz para operação, sendo que a portadora central está localizada exatamente no centro desta banda. Se o sistema for configurado para Modo 1 de operação e uma banda de 6 MHz, a banda ocupada pelo OFDM será igual a 5,571 MHz, com bandas de guarda de 4 KHz. Isso por que a banda do ISDB-T é segmentada em 14 porções iguais, das quais 13 são efetivamente utilizadas pelos segmentos, onde $6 \text{ MHz} \times 13/14 = 5,571 \text{ MHz}$. Existe ainda a possibilidade do uso de bandas de 7 MHz e 8 MHz, que utilizam o mesmo princípio de segmentação.

O ISDB-T prevê que 90 % da energia total deve estar contida na faixa efetivamente utilizada pelos segmentos, como é mostrado na figura 3.5. Neste caso, para uma banda de 6 MHz, 90 % da energia deve estar contido em 5,571 MHz, para que não ocorram problemas de interferência com andas adjacentes.

3.2.2

Desvios de freqüência permitidos

Desvios de freqüência da ordem de 1 Hz são tolerados. Porém, existem casos especiais onde desvios de até 500 Hz são aceitos, desde que sejam permitidos pelos órgãos competentes e não afetem a eficiência das ondas de rádio.

3.2.3

A frequência de amostragem da IFFT e valores tolerados de desvios

A frequência de amostragem da IFFT para o ISDB-T usando OFDM é de 8.126.984 MHz. Este valor é definido para provocar um desvio de frequência máximo de 1 Hz, no caso de uso de uma frequência de amostragem da FFT errada, pelo receptor.

3.2.4

A máscara do espectro de transmissão

A máscara do espectro de transmissão é apresentada na figura 3.5. Já a tabela 3.1 apresenta os valores dos limitantes. É importante frisar que estes limitantes se referem apenas para as componentes de distorção do sinal de transmissão digital, e não para espúrios.

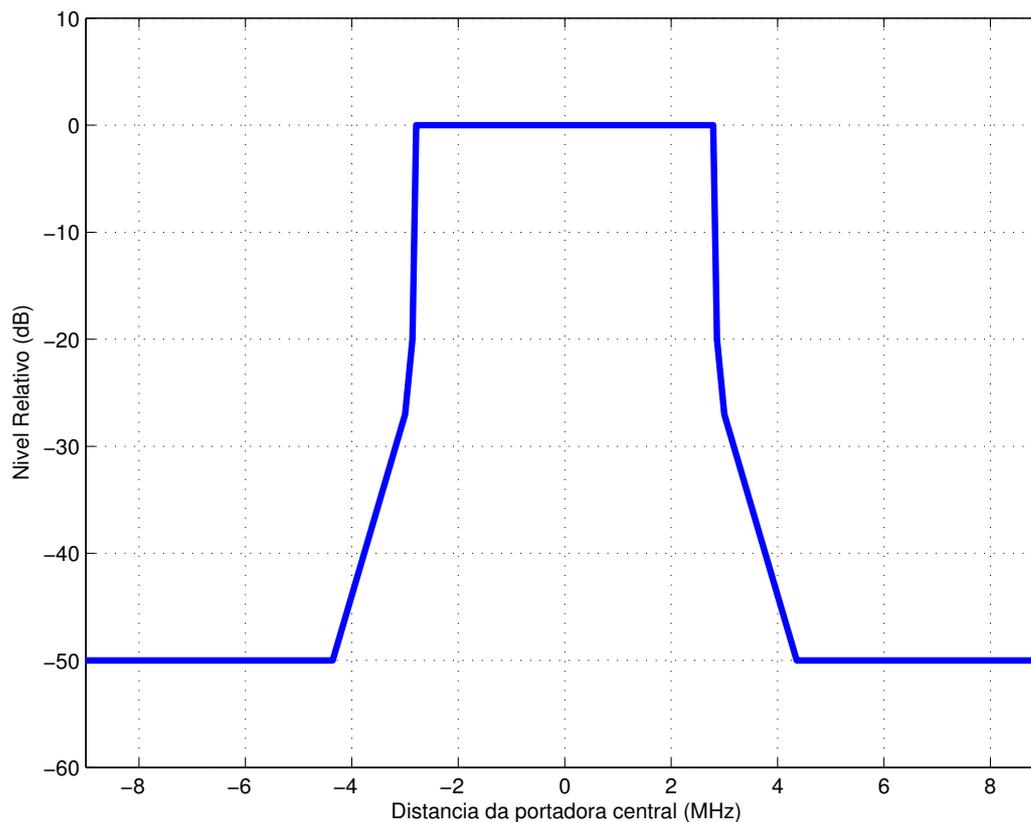


Figura 3.5: Máscara do espectro de transmissão.

Distância da portadora central	Atenuação relativa	Tipo de limitante
-4,36	-50	superior
-3	-27	superior
-2,86	-20	superior
-2,79	0	superior
-2,79	0	superior
-2,86	-20	superior
-3	-27	superior
-4,36	-50	superior

Tabela 3.1: Limitantes do espectro de transmissão da TV Digital

3.3

A transmissão hierárquica

O ISDB-T possui a característica de efetuar a transmissão hierárquica, que é uma das principais vantagens sobre os outros padrões de TV Digital. A transmissão hierárquica é a transmissão de um sinal para diferentes tipos de receptores, sendo eles móveis, portáteis ou de alta definição. Ela é importante pois atinge novos tipos de espectadores, abrindo um novo segmento de mercado potencial para televisão. Com receptores portáteis e móveis, o espectador não mais precisa estar em sua casa para usufruir dos benefícios que a TV Digital pode oferecer.

Conforme descrito anteriormente, o sistema permite a transmissão de informações codificadas de três maneiras distintas. Essa facilidade determina então o tipo de receptor que a informação é destinada. Para um receptor parcial é destinada uma pequena porção do sinal, pois utiliza um receptor de banda estreita. Necessariamente este sinal é o mais bem protegido, e promove uma resolução de imagem no receptor. Receptores móveis decodificam uma porção maior do sinal, com uma melhora na qualidade de imagem, enquanto receptores estacionários recebem todo o sinal, gerando uma imagem com qualidade HDTV. Um exemplo de divisão da banda em camadas, com a segregação das informações por tipo de receptor é mostrado na figura 3.6.

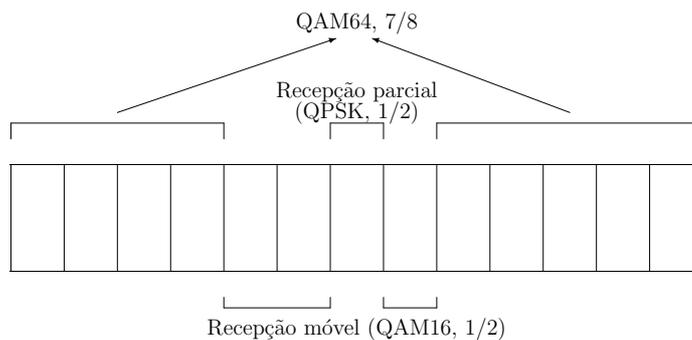


Figura 3.6: Exemplo de configuração de banda para transmissão hierárquica

A camada 1, que é composta por apenas um segmento e destinada a recepção parcial utiliza uma configuração mais robusta à interferências na transmissão. Usando um esquema de modulação QPSK e a taxa 1/2 para o codificador convolucional, esta camada carrega parte das informações da TV Digital, e está localizada exatamente no centro da banda. Esta parte é suficiente para a recepção da programação em displays de baixa resolução.

A camada 2 é composta por 3 segmentos e carrega parte do sinal original. A associação destas informações com as da camada 1 permitem que um receptor móvel decodifique o sinal e gere imagens com baixa resolução. O esquema de modulação e a taxa do codificador são menos eficientes que os utilizados na camada 1, mas garantem uma maior vazão de informação, pois o seu nível de redundância é inferior. O fato das informações das camadas terem configurações distintas de proteção não prejudicam a recepção do sinal.

Já a camada 3 é configurada para um esquema de proteção baixo, pois tem a função de trafegar um alto volume de dados. Por isso o uso de um esquema de modulação QAM64 e taxa 7/8. É importante lembrar que quanto maior a proteção das informações, menor a taxa de dados efetiva, e viceversa. Um receptor estacionário usa as informações da três camadas de forma complementar para gerar o sinal HDTV.

Existe ainda a possibilidade fazer a transmissão parcial utilizando duas camadas. A camada localizada no centro da banda é a camada 1 e terá os dados mais bem protegidos, enquanto a camada 2 se localizará nas bordas da banda, utilizando uma configuração que permite uma maior vazão de dados. A transmissão nesta configuração é destinada a receptores móveis com baixa resolução e estáticos com qualidade HDTV.

A definição do número de segmentos que compõem as camadas se dá pelo volume de informações destinado aos receptores de banda estreita. O índice de proteção é determinado pelo nível de interferência e ruído no canal de comunicações.

Quando a recepção parcial não é utilizada, os 13 segmentos disponíveis na banda são destinados a única camada, que terá uma única configuração. Maximizando a vazão de dados, é possível transmitir uma taxa próxima de 20 Mbps na banda de 6 MHz. Esta transmissão será mais suscetível a interferências do canal por não ter um baixo nível de proteção e será destinada apenas para receptores estacionários. Nesta configuração é possível a transmissão de um sinal HDTV.

3.3.1 Resumo das Características do OFDM

O sistema OFDM possui características particulares e muito importantes para seu funcionamento, características estas que serão tratadas ao longo desta sessão [15, 19, 16, 6, 2].

Intervalo de Guarda

O intervalo de guarda resulta numa diminuição da taxa de transmissão, uma vez que informações redundantes estão sendo transmitidas no lugar novos dados. Porém ele é extremamente importante por garantir que interferências intersimbólicas não ocorram. O tamanho do IG deve ser configurado para ter entre 2 e 4 vezes o tamanho do atraso médio de espalhamento do canal. É importante salientar ainda que em modulações com maior capacidade de transmissão, como QAM 16 e QAM 64 são mais afetadas por interferências intersimbólica, o que requer um cuidado adicional na hora de decidir pelo tamanho do IG.

Duração do símbolo

A duração do símbolo é definida como sendo o tamanho efetivo da informação transmitida adicionada do prefixo cíclico inserido pelo processo de modulação. Normalmente este tamanho é ajustado segundo a relação sinal ruído requerida para o sistema, sendo estes valores pré-definidos.

Modulação e escolha dos códigos

A seleção do tipo de modulação e da taxa código empregado é feita com base na quantidade de bits transmitido versus nível de proteção da informação. Assim, antes de escolher os parâmetros de codificação da informação, é necessário executar um sucinto estudo do nível de ruído do canal, para que uma configuração ótima seja selecionada.

3.3.2 Vantagens do OFDM

Diversas são as vantagens intrínsecas ao padrão de transmissão OFDM. Esta sessão mostra estas principais vantagens.

Tolerância aos efeitos de espalhamento de atraso

Conforme apresentado anteriormente, o espalhamento de atraso ocorre nas transmissões sem fio, devido ao multipercurso. O OFDM praticamente elimina este efeito inserindo um prefixo cíclico no início do símbolo.

Demais distorções provocadas pelo canal

O desvanecimento seletivo é outra causa da interferência intersimbólica. Ele é caracterizado por diferentes variações na amplitude atuarem num sinal que trafega numa faixa de frequência larga. Como o OFDM particiona sua banda em N pequenas porções, pode-se considerar que o tipo de desvanecimento característico é plano. Esta característica melhora a performance do sistema pois o desvanecimento plano é mais fácil de ser combatido.

Maximização da vazão

Esta é outra característica positiva do uso de subportadoras. Quando uma queda da qualidade do sinal de determinada portadora é detectado pelo método de estimação de canal, um esquema de aumento da taxa do código pode se implementado para proteger mais as subportadoras mais afetadas, otimizando assim a vazão do sistema. Esta técnica pode ser combinada ainda com a seleção de um esquema de modulação adequado, o que otimiza ainda mais a vazão do sistema.

Imunidade a ruídos impulsivos

Ruídos impulsivos são interferências no sinal causadas em rajadas, geralmente provocadas por fenômenos atmosférico, ou equipamentos com motores elétricos. O OFDM é praticamente imune a este tipo de ruído, pois estes são caracterizados por uma potência média baixa, com elevados picos de curta duração. Como o sistema multiportadoras tem a característica de ter a taxa de cada subportadora reduzidas por N , a duração do símbolo fica N vezes maior. Assim, estes os picos do ruído não são suficientes para degradar as informações das subportadoras. Normalmente ainda é utilizado alguma técnica de entrelaçamento dos dados aliado a um esquema de detecção/correção de erros, que diminui ainda mais a probabilidade destes ruídos provocarem erros.

3.3.3 Desvantagens do OFDM

Uma das grandes desvantagens do OFDM é alta relação entre a potência de pico/média. Em outras palavras, é a grande diferença nos níveis de amplitude de pico em relação à amplitude média do sinal transmitido. Estas grandes variações exigem o uso de amplificadores lineares de alta performance nos transmissores e receptores, para evitar que os picos do sinal sejam cortados, provocando a degradação do mesmo. Porém este tipo de amplificador onera o sistema, além de provocar um aumento significativo do consumo de energia.

Outra questão importante no OFDM é a necessidade de sincronismo. O prefixo cíclico inserido no símbolo OFDM, que tem a função de evitar a interferência intersimbólica também é responsável pela sincronização dos quadros. Esse mesmo prefixo cíclico também é responsável pela diminuição da taxa efetiva de dados, uma vez que é formado por dados redundantes.