



Universidade de Brasília

Faculdade de Tecnologia

Departamento de Engenharia Elétrica

# **Radiodifusão Sonora Digital para Frequências Inferiores a 30 MHz**

Flávia Xavier Cirilo de Sá  
Mariana Olivieri Caixeta Altoé

Prof. Dr. Humberto Abdalla Jr.



Radiodifusão Sonora Digital

**Brasília, dezembro de 2003**



## **Agradecimentos**

Os nossos agradecimentos ao professor Abdalla, que nos instruiu na elaboração deste projeto, ao professor Lúcio, pelos inúmeros esclarecimentos a cerca do tema estudado, ao doutorando Flávio, pelas reuniões semanais e determinação com a qual nos auxiliou no desenvolvimento deste projeto, e ao engenheiro Ronald, pelos materiais disponibilizados, sugestões e incentivos.

Também agradecemos os atenciosos correspondentes dos sistemas DRM e IBOC e fabricantes de equipamentos pelas dúvidas esclarecidas com prontidão e clareza.

Finalmente, agradecemos nossas famílias pelo apoio inestimável em cada projeto de nossas vidas e os amigos e namorados que nos acompanham e tornam os caminhos mais fáceis de serem trilhados.

A todos vocês o nosso muito obrigada!



## Resumo

A modernização das emissoras de rádio AM através da digitalização da transmissão do sinal está sendo feita em alguns países e deve, em breve, ser expandida para todo o mundo. Como um dos sistemas de telecomunicações mais antigos e populares do mundo, as emissoras de rádio AM terão melhores condições de concorrência depois de digitalizadas, pois a qualidade do áudio é superior à que se tem com as atuais transmissões analógicas e novos serviços serão oferecidos aos usuários.

Este trabalho consiste em um estudo dos sistemas de rádiodifusão sonora digital terrestre desenvolvidos para operar na faixa de frequências inferior a 30 MHz, ou seja, na faixa de rádio AM. Os sistemas abordados são: DRM (*Digital Radio Mondiale*) e IBOC AM (*In Band On Channel – Amplitude Modulation*). Além das características técnicas dos sistemas são mostrados os resultados dos testes desenvolvidos com cada um deles e as alterações que devem ser feitas nos transmissores e antenas para implantação dos mesmos.



# Índice

1	Introdução.....	1
2	Características dos Sistemas de Radiodifusão Digital DRM e IBOC AM.....	3
3	Sistema de Radiodifusão Digital DRM.....	4
3.1	Princípio de Funcionamento.....	5
3.2	Modos de Transmissão.....	7
3.3	Estrutura de Transmissão.....	11
3.3.1	Células Piloto.....	12
3.3.2	Canal de Serviço Principal - MSC.....	13
3.3.3	Canal de Acesso Rápido - FAC.....	16
3.3.4	Canal de Descrição de Serviço - SDC.....	17
3.4	Codificação de Fonte.....	19
3.4.1	Codificação AAC.....	20
3.4.2	Codificação CELP.....	23
3.4.3	Codificação HVXC.....	25
3.4.4	Codificação SBR.....	26
3.5	Codificação de Canal e Mapeamento de Constelação.....	28
3.5.1	Dispersão de Energia.....	28
3.5.2	Interleaving.....	29
3.5.3	Codificação Multi-nível.....	29
3.5.4	Mapeamento de Constelação.....	32
3.6	Alterações nos Atuais Transmissores para Implantação do DRM.....	32
3.7	Alterações nas Atuais Antenas para Implantação do DRM.....	34
3.8	Receptores.....	35
3.9	Relações de Proteção.....	35
3.10	Resultados dos Testes.....	37
3.10.1	Testes com Onda Ionosférica com Incidência Próxima à Vertical.....	40
3.10.2	Testes de Longa Distância.....	41
3.10.3	Testes de Ultra Longa Distância.....	42
3.10.4	Testes com Redes de Frequência Única.....	43
3.10.5	Testes de Longo Prazo.....	45
3.10.6	Conclusões.....	46
4	Sistema de Radiodifusão Digital IBOC AM.....	47
4.1	Princípio de Funcionamento.....	48
4.2	Modos de Operação.....	49
4.2.1	AM Híbrido.....	50
4.2.2	IBOC AM Totalmente Digital.....	51
4.3	Codificador de Fonte.....	53
4.4	Codificador do Canal.....	53
4.5	Interleaving.....	53
4.6	Mapeamento de Constelações.....	53
4.7	Detalhamento Das Camadas de Funcionamento do IBOC AM.....	54
4.7.1	Estrutura da camada física.....	55
4.7.2	Modos de Serviço.....	56
4.7.3	Canais lógicos.....	57



4.8 Alterações nos Atuais Transmissores para Implantação do IBOC AM.....	60
4.9 Alterações nas Atuais Antenas para Implantação do IBOC AM.....	62
4.10 Receptores.....	63
4.11 Resultados dos Testes Realizados nos Estados Unidos.....	64
4.11.1 Conclusões.....	72
4.12 Demonstração do Sistema IBOC AM no Brasil.....	72
5 Requisitos da ITU para os Sistemas DRM e IBOC AM.....	75
6 Conclusões.....	77
7 Referências Bibliográficas.....	79
Anexo 1 – Canalização de Serviços de Radiodifusão Sonora.....	81
Anexo 2 – Modulações Digitais.....	82
Anexo 3 - Interleaving.....	85
Anexo 4 - COFDM.....	87



# 1 Introdução

Diante das modernizações a que vêm passando os serviços de telecomunicações no Brasil, os serviços de radiodifusão, que abrangem os serviços de rádio e televisão, ainda não passaram pelo processo de digitalização, no que diz respeito à transmissão.

Tecnologias de televisão digital estão sendo analisadas e estudadas pelo governo a fim de implantar um dos padrões disponíveis (o norte-americano ATSC – *Advanced Television Systems Committee*, o europeu DVB – *Digital Video Broadcasting* ou o japonês ISDB – *Integrated Services Digital Broadcasting*), ou mesmo desenvolver um sistema que atenda às necessidades específicas do país, o que pode ser feito em conjunto com alguma tecnologia do exterior. Com isso, pretende-se implantar o sistema no Brasil até o ano de 2006.

Para o rádio, foram desenvolvidas até o momento algumas tecnologias que utilizam faixas de frequências diferentes das atualmente destinadas à radiodifusão sonora, como o europeu Eureka 147 e o japonês ISDB, e duas tecnologias que mantêm os serviços nas faixas atuais: o sistema DRM (*Digital Radio Mondiale*), europeu, e o sistema IBOC (*In Band – On Channel*), norte-americano.

É interesse tanto do governo como do radiodifusor que as emissoras de rádio possam ser digitalizadas e mantidas nas faixas atuais. Para o governo, responsável pela gerência do espectro eletromagnético, não seria preciso destinar outras faixas de frequências a estes serviços. Para o radiodifusor, as vantagens referem-se ao aproveitamento do parque instalado, mesmo que fosse necessária sua atualização, e à manutenção da “marca” de cada emissora, que é identificada pela sua frequência de transmissão.

Dos padrões que permitem isso, o DRM foi desenvolvido para a faixa de frequências inferior a 30 MHz (faixa de AM) e o IBOC para as faixas de frequência de AM e FM. As faixas de frequências destinadas à radiodifusão sonora estão no anexo 1.

A rádio AM tem qualidade inferior à FM e os serviços (áudio e voz) que oferece são muito limitados. Assim, este segmento do mercado vem perdendo muito espaço em termos de audiência, anunciantes e negócios.



Então, apesar de reconhecer a necessidade de digitalização das emissoras de rádio AM e FM, percebe-se que as emissoras AM precisam com mais urgência se modernizar, para tornarem-se novamente competitivas e continuarem a desempenhar o papel social que desenvolvem desde o começo do século XX.

A proposta desse trabalho é apresentar as tecnologias dos sistemas DRM e IBOC AM, bem como o princípio de funcionamento dos mesmos, a fim de permitir uma futura análise da viabilidade técnica destes no cenário de radiodifusão sonora brasileiro.





## 2 Características dos Sistemas de Radiodifusão Digital DRM e IBOC AM

Os sistemas digitais DRM e IBOC AM apresentam características que motivam a implantação dos mesmos. Algumas delas são melhorias em relação ao sistema analógico e outras se referem a novos serviços. São elas:

- robustez em canais com desvanecimento: um sistema digital bem projetado é muito mais imune a distúrbios como desvanecimento por multipercurso, ruído e interferências co-canal e de canal adjacente que o sinal AM analógico;
- melhor qualidade do áudio: o uso de algoritmos de codificação de fonte permite a entrega de som de alta qualidade com diferentes taxa de bits, superando a limitação de largura de banda estreita;
- diminuição da potência de transmissão: como no sinal AM a maioria da potência de transmissão está na portadora, dependendo do grau de compressão das subportadoras no sinal digital, pode-se diminuir muito a potência mantendo a mesma área de cobertura;
- dados relacionados a serviços: tipo de serviço, lista de frequências alternativas e informação de idioma são alguns exemplos de dados relacionados a serviços;
- serviços de dados: sistemas digitais independem do tipo de conteúdo, podendo transmitir, além de programas de áudio, serviços de dados como informação de tráfego, texto e até figuras;
- capacidade de transmissão variável: dependendo da largura de banda disponível e das condições de propagação define-se a taxa de bits que propicia a melhor qualidade de transmissão e recepção.



### 3 Sistema de Radiodifusão Digital DRM

O consórcio DRM (*Digital Radio Mondiale*) foi criado em 1998 por um pequeno grupo de radiodifusores e fabricantes com os seguintes propósitos:

- desenvolver um sistema digital para a faixa de rádio AM, sendo ele um padrão mundial não proprietário;
- difundir a tecnologia digital AM em todo o mundo.

Hoje o consórcio conta com 82 membros, entre os quais radiodifusores, fabricantes de equipamentos, instituições de pesquisa e órgãos reguladores, representando 29 países [1].

No começo do ano 2000, assim que os protótipos dos moduladores foram disponibilizados, uma série de testes de campo foi iniciada, visando avaliar o desenvolvimento do padrão (suas capacidades e limitações), adquirir informações sobre as condições de propagação variáveis e sua influência no sistema digital, explorar novas possibilidades (transmissão de conteúdo multimídia, por exemplo), entre outros objetivos. Ainda hoje estão sendo realizados testes.

Em 2001 foi publicada a primeira versão do padrão DRM pela ETSI (*European Telecommunications Standards Institute*) e em abril do mesmo ano foi aprovado pela ITU (*International Telecommunication Union*).

Em junho de 2003, 16 emissoras de vários países começaram a transmitir diariamente o sinal digital DRM para a Europa, América do Norte, Oriente Médio, Austrália e Nova Zelândia [1].

O sistema DRM propicia melhor qualidade do sinal e maior confiabilidade na recepção que o sistema analógico, além de integrar serviços de áudio com dados e texto, que podem ser mostrados no *display* do receptor. As aplicações do sistema incluem receptores fixos, móveis e portáteis, que serão disponibilizados em breve e a baixo custo [1].

Os transmissores atuais mais modernos podem ser modificados para transmitir o sinal DRM [1]. O sistema permite o uso de rede de frequência única, maximizando a utilização do espectro de frequências. Por esses motivos, o sistema desperta o interesse de radiodifusores de todo o mundo.



### 3.1 Princípio de Funcionamento

O sistema DRM foi projetado para ser usado na faixa de frequências inferior a 30 MHz, ou seja, ondas longas (OL), ondas médias (OM) e ondas curtas (OC), onde existem algumas restrições operacionais, como limitação de largura de banda para transmissão do sinal (canal estreito) e condições de propagação variáveis [2].

O diagrama de blocos abaixo apresenta a arquitetura do sistema DRM. A figura descreve o fluxo da informação (áudio/dados) do codificador até o excitador do transmissor.

O diagrama de blocos do receptor é igual ao apresentado, a não ser pelo sentido contrário do fluxo da informação.

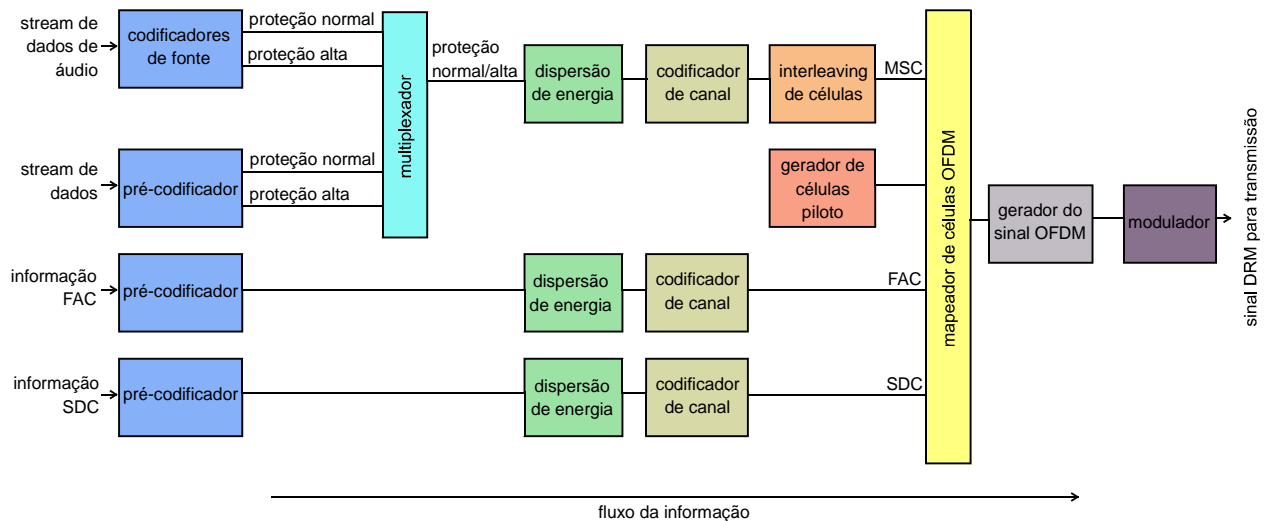


Figura 1. Arquitetura do sistema DRM

As informações que entram no diagrama acima são divididas em duas classes:

- Áudio e dados que são combinados no multiplexador, formando o canal MSC (*Main Service Channel*);
- Canais de informação de acesso rápido (FAC – *Fast Access Channel*) e de descrição de serviço (SDC – *Service Description Channel*), que não são multiplexados.

Os canais MSC, FAC e SDC são detalhados 3.3.



Os codificadores de fonte de áudio e os pré-codificadores de dados fazem a adaptação dos streams de entrada para um formato apropriado para transmissão digital. As saídas dos codificadores de fonte e pré-codificadores podem ser compostas por duas partes que requerem dois níveis de proteção diferentes no codificador de canal. Todos os serviços devem utilizar um ou ambos níveis de proteção. Maiores detalhes sobre os codificadores de fonte se encontram no item 3.4.

O multiplexador combina os níveis de proteção dos serviços de áudio e dados.

A técnica de dispersão de energia faz um complemento determinístico de bits para reduzir a possibilidade de transmissão de sequência muito longa de um mesmo bit.

O codificador de canal adiciona informação redundante, fornecendo robustez aos dados, e define o mapeamento da informação codificada digitalmente em células QAM.

A técnica de *interleaving* de células distribui células QAM consecutivas em uma sequência de células separadas quase-aleatoriamente no tempo e na frequência. Isso é feito para tornar a transmissão mais robusta em canais dispersivos no tempo e na frequência.

As técnicas de dispersão de energia, *interleaving* e codificação de canal são descritas no item 3.5.

O gerador de células piloto acrescenta informações que permitem ao receptor obter informação do canal e fazer demodulação coerente do sinal. As células piloto são explicadas no item 3.3.1.

O mapeador de células OFDM coleta as diferentes classes de células e as posiciona em um *grid* tempo-frequência.

O gerador do sinal OFDM transforma cada conjunto de células com o mesmo índice de tempo em uma representação do sinal no domínio do tempo contendo várias subportadoras. Os fundamentos da modulação COFDM estão explicados no anexo 4.

O modulador converte a representação digital do sinal OFDM no sinal analógico que será transmitido pelo ar. Essa operação envolve conversão digital-analógica e filtragem.



### 3.2 Modos de Transmissão

As larguras dos canais destinados à radiodifusão sonora operando em frequências inferiores a 30 MHz são, geralmente, de 9 kHz e 10 kHz. No Brasil, utiliza-se canais de 10 kHz para OM e OT (Onda Tropical) e canais de 5 kHz para OC.

O sistema DRM foi projetado para ser implementado de três maneiras distintas:

- ocupando os canais já destinados à radiodifusão sonora, satisfazendo o planejamento atual do espectro eletromagnético;
- ocupando metade dos canais de 9 ou 10 kHz, ou seja, 4,5 ou 5 kHz, para possibilitar a transmissão simultânea dos sinais analógico e digital;
- ocupando canais de 18 ou 20 kHz de largura de faixa, quando viável do ponto de vista do planejamento do espectro, para aumentar a capacidade de transmissão.

A tabela 1 mostra a relação entre o parâmetro de ocupação do espectro, sinalizado no FAC, e a largura de banda nominal do canal.

**Tabela 1.** Relação entre o parâmetro de ocupação do espectro e a largura de banda do canal

Parâmetro de Ocupação do Espectro	0	1	2	3	4	5
Largura de Banda Nominal do Canal (kHz)	4,5	5	9	10	18	20

A figura 2 mostra as possíveis configurações do sinal DRM. A frequência de referência  $f_R$  do sinal digital é considerada a subportadora de número 0 e é sempre posicionada em um múltiplo inteiro de 1 kHz. O grupo de portadoras que carregam FAC fica sempre à direita (frequência maior) da frequência de referência  $f_R$ .

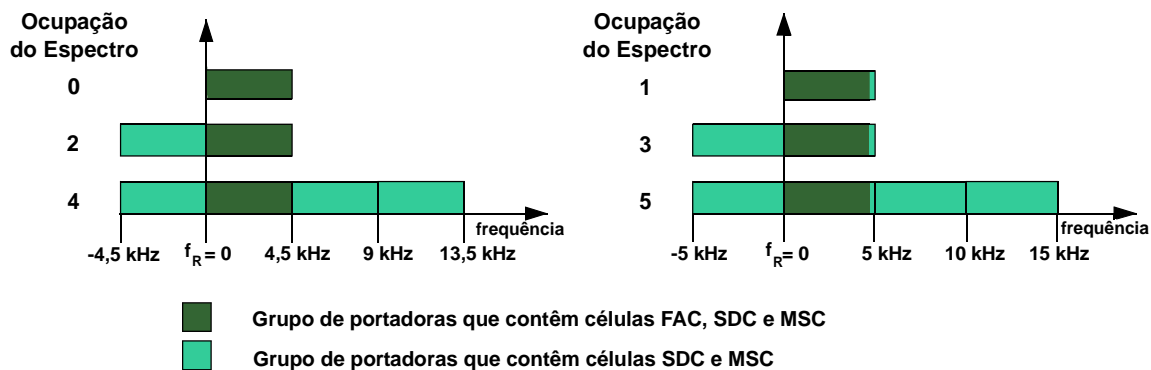


Figura 2. Configurações do sinal DRM



A transmissão simultânea dos sinais analógico (AM) e digital (DRM) é feita pela justaposição destes. O sinal AM analógico pode ser DSB (*Double Side Band*), VSB (*Vestigial Side Band*) ou SSB (*Single Side Band*).

A figura abaixo ilustra algumas das configurações possíveis para transmissão simultânea dos sinais AM e DRM (*simulcast*), que pode ser feita por dois transmissores separados ou através da combinação dos sinais em um único transmissor.

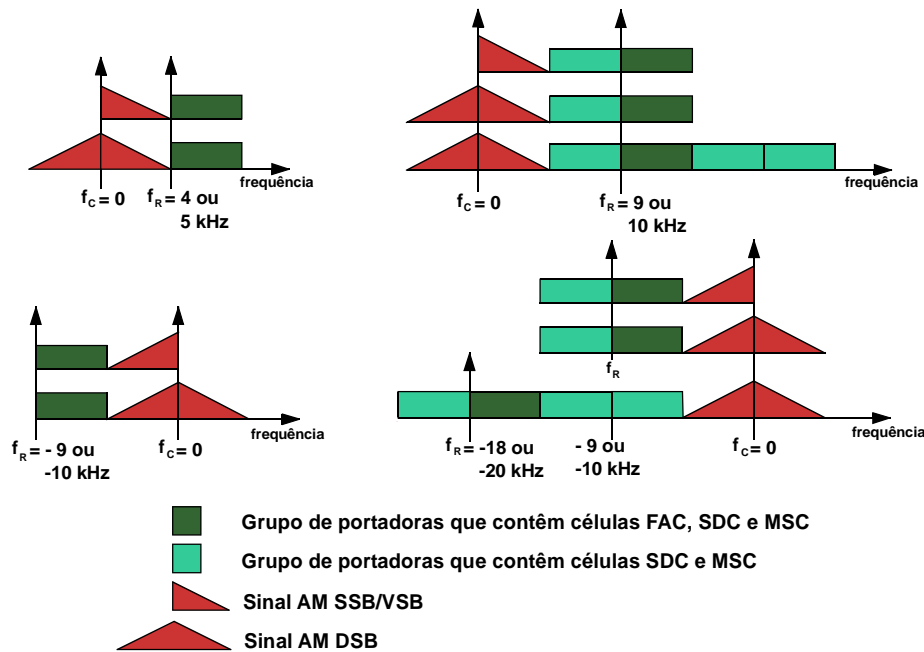


Figura 3. Configurações de transmissão simultânea

Exceto pelas duas configurações superiores à esquerda na figura acima, a portadora de referência  $f_R$  está a 1 (9 ou 10 kHz) ou 2 (18 ou 20 kHz) canais distante da portadora  $f_C$  do sinal AM. Nas duas configurações citadas,  $f_R$  dista meio canal de  $f_C$ . Como a frequência de referência do sinal DRM deve ser posicionada em um múltiplo inteiro de 1 kHz,  $f_R$  e  $f_C$  distam de 4 ou 5 kHz.

Além dos parâmetros de ocupação do espectro, são definidos parâmetros relacionados à eficiência de transmissão, independentes dos anteriores. A partir destes parâmetros define-se a capacidade (taxa de bits úteis) e a robustez a ruído, multipercurso e efeito Doppler. Mais especificamente, esses parâmetros definem as taxas de codificação e constelações utilizadas para transportes de dados e também a estrutura dos símbolos OFDM em função das condições de propagação.



O padrão DRM especificou quatro modos de transmissão relacionados a diferentes condições de propagação, como apresentado abaixo:

Tabela 2. Modos de transmissão

Modo de Transmissão	Condições de Propagação
A	Canais Gaussianos com desvanecimento mínimo
B	Canais seletivos no tempo e na frequência, com atrasos longos
C	Semelhante ao modo B, porém com alto efeito Doppler
D	Semelhante ao modo B, porém com atraso e efeito Doppler severos

O modo de transmissão A é aplicado para transmissão em canais típicos de onda média (durante o dia) e onda longa, cuja propagação se dá por ondas terrestres. Os outros três são aplicados para transmissão em canais típicos de onda curta e onda média à noite, cuja propagação se dá por ondas ionosféricas.

Para uma dada largura de banda, cada modo de transmissão propicia uma taxa de dados diferente.

O sinal transmitido é organizado em super frames de transmissão. Cada super frame de transmissão consiste em três frames de transmissão, sendo que cada frame de transmissão tem duração  $T_f$  igual a 400 ms e é composto por  $N_s$  símbolos OFDM, numerados de 0 a  $N_s-1$ . Todos os símbolos carregam dados e informação de referência.

Cada símbolo OFDM é constituído por  $K$  subportadoras e transmitido com duração  $T_s$ . O índice  $k$  de cada subportadora pertence ao intervalo  $[K_{\min}, K_{\max}]$ .  $T_s$  é a soma da duração da parte útil ( $T_u$ ) do símbolo e da duração do intervalo de guarda ( $T_g$ ). O intervalo de guarda consiste na repetição do final da parte útil do símbolo, inserida antes deste. O espaçamento entre portadoras adjacentes é  $1/T_u$ .

Um símbolo do sinal OFDM é dividido em células, cada célula correspondendo à modulação de uma subportadora na duração de um símbolo.

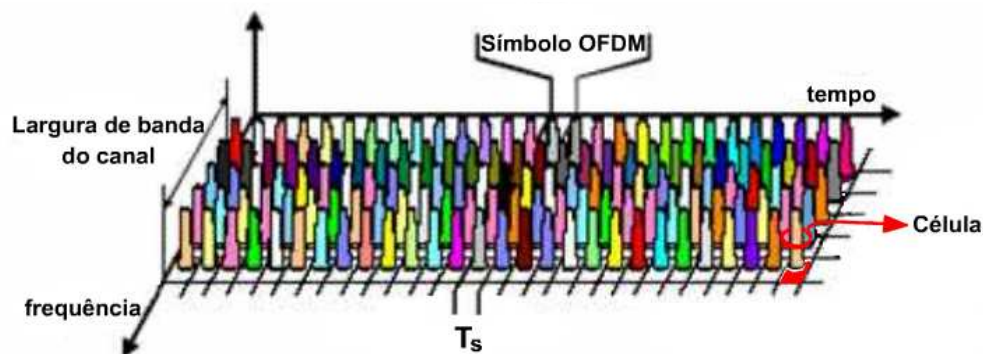




Figura 4. Símbolos e células OFDM

Os parâmetros do símbolo OFDM relacionados ao tempo são expressos em função do período elementar  $T$ , equivalente a  $83^{1/3} \mu s$ , e são apresentados na tabela abaixo para cada modo de transmissão [2].

Tabela 3. Parâmetros de tempo

Parâmetros	Modo de Transmissão			
	A	B	C	D
$T_u$ (ms)	24	$21^{1/3}$	$14^{2/3}$	$9^{1/3}$
$1/T_u$ (Hz)	$41^{2/3}$	$46^{7/8}$	$68^{2/11}$	$107^{1/7}$
$T_g$ (ms)	$2^{2/3}$	$5^{1/3}$	$5^{1/3}$	$7^{1/3}$
$T_g/T_u$	1/9	1/4	4/11	11/14
$T_s$ (ms)	$26^{2/3}$	$26^{2/3}$	20	$16^{2/3}$
$N_s$	15	15	20	24

Observando a tabela acima, verifica-se que o modo A é o que possibilita maior capacidade de dados e menor robustez, pois a duração do intervalo de guarda é o menor e o comprimento da parte útil é o maior de todos os modos. Os modos B e C possuem o mesmo intervalo de guarda, porém B possui maior capacidade de dados que C, pois a duração da parte útil do símbolo é maior para o modo B que para o C. O modo D apresenta maior intervalo e guarda e menor comprimento da parte útil, sendo assim o modo de maior robustez. Consequentemente, o modo D é o que possibilita a menor taxa de dados de todos os modos.

A tabela 4 apresenta os números das subportadoras nos extremos do sinal para cada modo de transmissão e largura de banda nominal.

Tabela 4. Números das subportadoras para cada modo de transmissão

Modo de Transmissão	Portadora	Ocupação do Espectro					
		0	1	2	3	4	5
A	$K_{min}$	2	2	-102	-114	-98	-110
	$K_{max}$	102	114	102	114	314	350
B	$K_{min}$	1	1	-91	-103	-87	-99
	$K_{max}$	91	103	91	103	279	311
C	$K_{min}$	-	-	-	-69	-	-67
	$K_{max}$	-	-	-	69	-	213
D	$K_{min}$	-	-	-	-44	-	-43
	$K_{max}$	-	-	-	44	-	135

No modo de transmissão A, as subportadoras -1, 0 e 1 não são utilizadas. Os modos B, C e D não utilizam a subportadora 0 [2].





### 3.3 Estrutura de Transmissão

A estrutura do frame de transmissão do DRM está mostrada na figura abaixo, com duas opções de largura de banda, 4,5 e 10 kHz. Um super frame de transmissão é formado por três frames de transmissão, cada um formado por  $N_s$  símbolos. Cada símbolo OFDM contém dados e informação de referência.

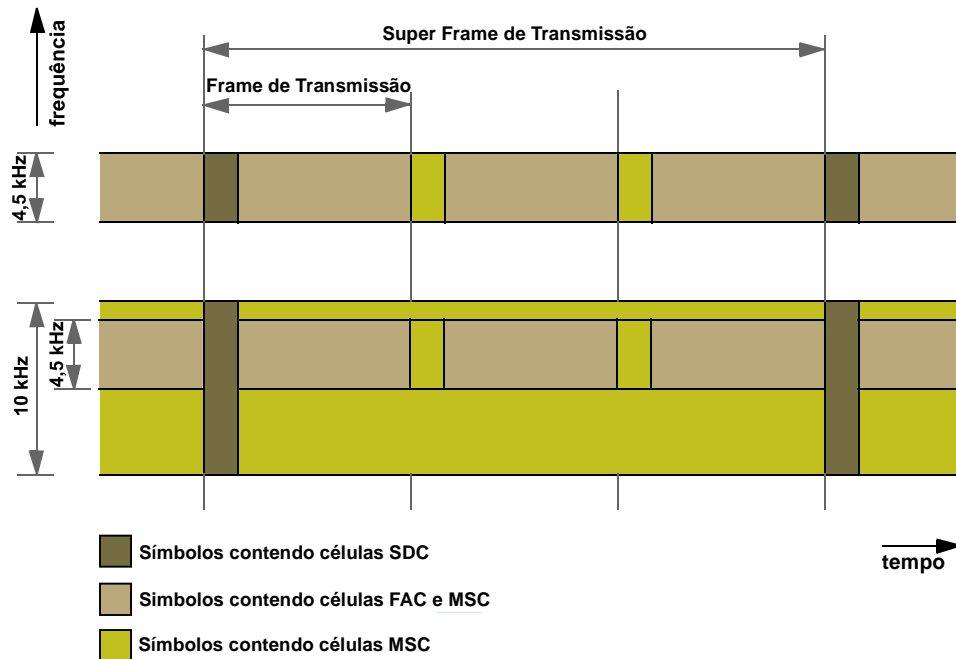


Figura 5. Super frame de transmissão

Fazendo um corte no eixo do tempo, serão visualizados os sinais DRM com parâmetros de ocupação do espectro 0 e 3 ilustrados na figura 2.

Além das células de dados, carregadas no canal MSC (*Main Service Channel*) e das células de controle, carregadas nos canais FAC (*Fast Acces Channel*) e SDC (*Service Description Channel*), o frame de transmissão contém também células piloto, ou células de referência.

As células piloto e os canais MSC, FAC e SDC estão detalhados nos subitens que seguem.



### 3.3.1 Células Piloto

As células piloto são as células de referência para estimação do canal e sincronismo. As posições, amplitudes e fases destas células são cuidadosamente escolhidas para otimizar o desempenho e a confiabilidade da transmissão.

Existem três tipos de células piloto: células de referência de frequência, células de referência de tempo e células de referência de ganho.

#### Células de Referência de Frequência

São utilizadas pelo receptor para detectar a presença do sinal e estimar sua frequência de offset. Estas células também podem ser utilizadas para estimação do canal e processos de rastreamento.

As células de referência de frequência estão presentes em todos os símbolos de todos os frames de transmissão. São posicionadas em frequências comuns a todos os modos de transmissão, sendo elas: 750 Hz, 2250 Hz e 3000 Hz em relação à frequência de referência  $f_R$ . A amplitude destas células é  $\sqrt{2}$  e as fases estão descritas na referência [2]

#### Células de Referência de Tempo

Estas células são localizadas no primeiro símbolo OFDM ( $s = 0$ ) de cada frame de transmissão.

São utilizadas para sincronismo dos frames de transmissão através da identificação do primeiro símbolo de cada frame de transmissão. Também podem ser utilizadas para estimação de frequência de offset.

A amplitude destas células também é  $\sqrt{2}$ . As posições (subportadoras do símbolo 0) e fases estão descritas na referência [2].

#### Células de Referência de Ganho

As células de referência de ganho estão espalhadas por todo o sinal, no tempo e na frequência.

São utilizadas para estimar a função transferência do canal, possibilitando a demodulação coerente.

A figura 6 ilustra a disposição destas células para o modo de transmissão B.

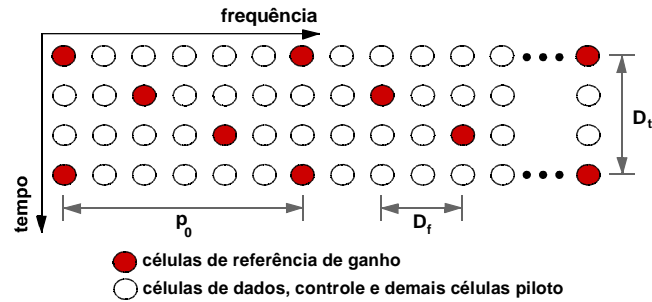


Figura 6. Células de referência de ganho no modo B

A tabela 5 mostra os valores dos parâmetros que determinam a distribuição das células de referência de ganho para cada modo de transmissão.

Tabela 5. Células de referência de ganho

Modo de Transmissão	$p_0$ (subportadoras)	$D_t$ (subportadoras)	$D_t$ (símbolos OFDM)
A	20	4	5
B	6	2	3
C	4	2	2
D	3	1	3

Pela tabela acima verifica-se que o número de células de referência de ganho aumenta do modo de transmissão A até o D, aumentando a robustez do sinal nessa seqüência.

A amplitude destas células é  $\sqrt{2}$ , exceto para as que se encontram próximas aos limites superior e inferior da banda do sinal, que têm amplitude 2. As fases destas células são determinadas conforme explicado na referência [2].

### 3.3.2 Canal de Serviço Principal - MSC

O canal MSC contém os dados de todos os serviços, que podem chegar a quatro, sendo eles serviços de áudio e/ou serviços de dados. O MSC consiste em uma seqüência de frames multiplex e, caso esteja sendo empregada modulação hierárquica, também por uma seqüência de frames hierárquicos [2].

Frames multiplex e frames hierárquicos são formados por frames lógicos, que, por sua vez, são formados pela divisão dos streams que chegam ao multiplexador (ver figura 1 – diagrama de blocos). Cada stream é dividido em frames lógicos de 400 ms de



duração. Frames lógicos de todos os streams são unidos para formar frames multiplex e hierárquico (se for o caso), ambos com duração de 400 ms.

Um serviço de áudio consiste em um stream de áudio e, opcionalmente, em um stream ou sub-stream de dados. Um serviço de dados consiste em um stream ou sub-stream de dados. Streams de áudio são formados por áudio comprimido e podem conter também mensagens de texto. Streams de dados podem ser formados por até quatro sub-streams, que são pacotes de dados. Um sub-stream carrega pacotes de apenas um serviço.

Os frames lógicos possuem, geralmente, duas partes com níveis de proteção diferentes. Os comprimentos destas partes são determinados independentemente.

Quando um serviço de áudio contém mensagens de texto, esta ocupa os últimos quatro bytes da parte menos protegida de cada frame lógico que carrega o stream de áudio, consumindo apenas 80 bps da capacidade de dados. A mensagem é dividida em até oito segmentos, que são codificados. Um segmento é formado por 16 bits de cabeçalho,  $n \times 8$  bits de corpo da mensagem e 16 bits de código CRC, aplicado sobre o cabeçalho e o corpo da mensagem.

A implementação de códigos de checagem de redundância cíclica (CRC – *Cyclic Redundancy Check*) possibilita ao receptor detectar erros de transmissão.

Os exemplos abaixo ilustram algumas das possíveis configurações do MSC, através do mapeamento dos streams de áudio/dados de acordo com os serviços disponibilizados:

Exemplo 1: Um serviço de áudio é disponibilizado ao usuário. O frame multiplex consiste em apenas um stream de áudio, que pode conter mensagem de texto.

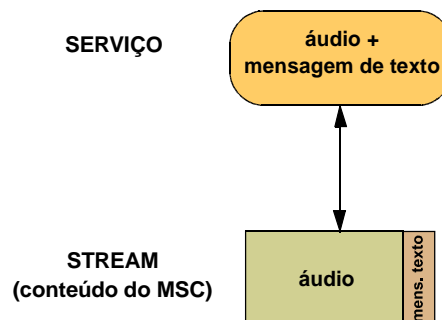


Figura 7. Exemplo 1

Exemplo 2: Um serviço de áudio e um serviço de dados são disponibilizados ao usuário. O frame multiplex consiste em um stream de áudio e um stream de dados, sendo



que apenas um sub-stream é utilizado. O serviço de dados aponta para o sub-stream do stream de dados e o serviço de áudio aponta para o stream de áudio e também para o sub-stream de dados.

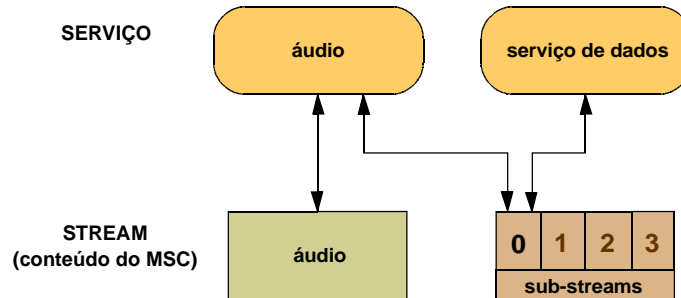


Figura 8. Exemplo 2

Exemplo 3: Três serviços de áudio são disponibilizados ao usuário, cada um com uma aplicação de dados. Os serviços de áudio apontam para seus respectivos streams de áudio e para um sub-stream do stream de dados. Além do áudio, cada stream de áudio carrega mensagens de texto. Como cada stream de dados pode carregar até quatro sub-streams, pode haver mais um serviço de dados apontando para o quarto sub-stream do stream de dados.

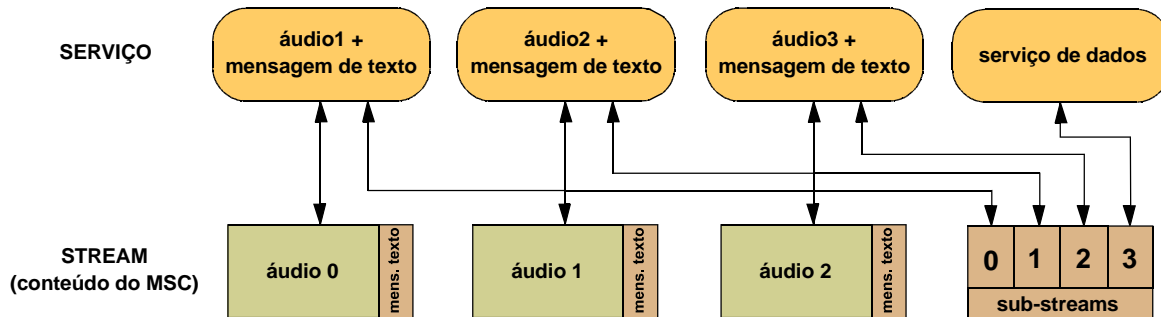


Figura 9. Exemplo 3

As células de dados se encontram no intervalo  $K_{\min} \leq k \leq K_{\max}$  (exceto as subportadoras que não são utilizadas para cada modo de transmissão), nas posições não ocupadas pelas células piloto e células de controle.

Os valores de amplitude e fase destas células são determinados pela modulação utilizada (64 ou 16-QAM).



### 3.3.3 Canal de Acesso Rápido - FAC

O canal de acesso rápido carrega informações sobre os parâmetros do canal que possibilitam ao receptor efetivamente começar a decodificar o frame multiplex, além de informações sobre os serviços multiplexados, para que o receptor decodifique o frame atual ou mude a frequência e procure novamente.

Cada frame de transmissão contém um bloco FAC. Um bloco FAC contém parâmetros que descrevem o canal e parâmetros que descrevem um serviço, aos quais são aplicados códigos CRC.

Os parâmetros de canal, enviados em cada bloco FAC, informam o seguinte:

- modulações dos canais MSC (2 bits) e SDC (1 bit);
- número de serviços no frame multiplex (4 bits);
- profundidade do *interleaver* (1 bit);
- ocupação do espectro (4 bits);
- identificação do frame atual e validação do índice AFS (2 bits);
- tipo de transmissão (básica/complexa – 1 bit);
- índice de reconfiguração (3 bits).

Além destes, 2 bits são reservados para aplicação futura, completando 20 bits de parâmetros de canal.

Os parâmetros de serviço informam o seguinte:

- idioma do serviço transportado (4 bits);
- identificação do serviço (24 bits);
- identificação da duração do serviço (2 bits);
- indicação de acesso condicional (1 bit);
- indicação do tipo de serviço (áudio/dados – 1 bit);
- tipo do programa (5 bits).

Além destes, 7 bits são reservados para uso futuro, completando 44 bits de parâmetros de serviço.

Códigos CRC são aplicados sobre os parâmetros de canal e serviço, resultando em 72 bits por bloco FAC, constante para todos os modos de transmissão.



Como as células FAC informam ao receptor a largura de banda utilizada, estas devem estar confinadas aos primeiros 4,5 kHz à direita da frequência de referência, como ilustrado na figura 5, para que o receptor as encontre independentemente da largura de banda em uso.

As posições (subportadoras) das células FAC estão tabeladas na referência [2].

Os valores de amplitude e fase destas células são determinados pela modulação utilizada (4-QAM).

### 3.3.4 Canal de Descrição de Serviço - SDC

O canal SDC carrega informações de como decodificar o MSC e como encontrar fontes alternativas dos mesmos dados.

Um bloco SDC é transmitido no começo de cada super frame de transmissão (figura 5).

A capacidade de transmissão de dados do SDC varia com a ocupação do espectro e pode ser aumentada com o emprego do índice AFS (*Alternative Frequency Switching*). O índice AFS é empregado quando é necessária a utilização de mais de um bloco SDC para carregar todos os dados. Nesse caso, o índice AFS informa ao receptor o número de frames SDC (entre 0 e 15) que separa o bloco SDC atual do próximo bloco SDC com mesmo conteúdo. Assim, o receptor pode checar e comutar para esta frequência alternativa. O canal FAC informa ao receptor quando o índice AFS é utilizado.

O bloco SDC é formado por: 4 bits para informar o índice AFS, 16 bits para CRC (aplicado sobre o índice AFS e o campo de dados) e  $n$  bytes para o campo de dados, sendo que  $n$  varia com a ocupação do espectro, modo de transmissão e modulação do SDC, como mostra a tabela abaixo:

Tabela 6. Comprimento do campo de dados

Modo de Transmissão	Modulação do SDC	Comprimento do campo de dados, $n$ (bytes)					
		Ocupação do espectro					
		0	1	2	3	4	5
A	16-QAM	37	43	85	97	184	207
	4-QAM	17	20	41	47	91	102
B	16-QAM	28	33	66	76	143	161
	4-QAM	13	15	32	37	70	79
C	16-QAM	-	-	-	68	-	147
	4-QAM	-	-	-	32	-	72



<b>D</b>	16-QAM	-	-	-	33	-	78
	4-QAM	-	-	-	15	-	38

No campo de dados, encontram-se informações como:

- descrição do multiplex: taxa de codificação e comprimento em bytes das partes mais e menos protegidas do frame MSC;
- indicação das várias frequências em que um serviço pode estar disponível. Também pode fazer a conexão entre um serviço transportado no MSC e fontes alternativas deste serviço, que podem ser DRM, AM, FM – RDS ou DAB;
- data e hora;
- descrição detalhada dos serviços de áudio: tipo de codificação de fonte, uso da técnica SBR, taxa de amostragem, presença de mensagem de texto, entre outras informações;
- país em que foi gerado o serviço e idioma do serviço;
- parâmetros do canal FAC referentes à próxima configuração do multiplex.

A reconfiguração do multiplex DRM é feita quando há reconfiguração dos serviços ou reconfiguração de todo o canal. Qualquer reconfiguração do multiplex deve ser sinalizada com antecedência para que o receptor decida como lidar com as mudanças. Isso é feito com 3 bits do canal FAC relacionados a parâmetros de canal, responsáveis pelo índice de reconfiguração.

O índice recebe um valor diferente de zero e a cada super frame de transmissão esse valor é decrescido. Quando o índice é igual a 1, sabe-se que o super frame atual corresponde ao último super frame de uma configuração. Quanto maior o índice de reconfiguração escolhido para começar a contagem regressiva (máximo é 7), maior o tempo para o receptor adquirir as informações necessárias para a nova configuração.

Reconfiguração de serviços ocorre quando o número de serviços no multiplex é modificado ou os comprimentos dos streams de dados são modificados.

Reconfiguração de canal ocorre quando são alterados parâmetros como ocupação do espectro, profundidade de *interleaving* e modulação do SDC e quando o modo de transmissão é modificado. No último caso, o receptor não é capaz de fazer as adaptações sem interromper a saída do áudio.





Para os modos de transmissão A e B, os símbolos SDC são os símbolos 0 e 1 de cada super frame de transmissão. Para os modos C e D, são os símbolos 0, 1 e 2 de cada super frame de transmissão.

Os valores de amplitude e fase destas células são determinados pela modulação utilizada (16 ou 4-QAM).

### 3.4 Codificação de Fonte

Codificação de fonte consiste em aproveitar a redundância do sinal para reduzir a quantidade de dados a ser transmitida. Essa compressão de dados pode ser sem perdas ou pode introduzir alguma degradação no sinal.

Devido às limitações impostas pelas normas que regem a radiodifusão na faixa de frequências inferior a 30 MHz e aos parâmetros de codificação e modulação utilizados, as taxas padrões de codificação de fonte são: 8kbps (canais de 4,5 e 5 kHz), 20 kbps (canais de 9 e 10 kHz) e 72 kbps (canais de 18 e 20 kHz).

O sistema DRM oferece três esquemas de codificação de fonte, sendo todas elas subconjuntos do MPEG-4 Versão 2, para oferecer ótima qualidade a uma dada taxa de bits:

- AAC (*Advanced Audio Coding*) para codificação de áudio para transmissão monofônica ou estereofônica;
- CELP (*Code Excited Linear Prediction*) para codificação de voz em casos em que é necessária alta robustez ou quando só é possível utilizar baixa taxa de bits (inferior às taxas padrões apresentadas acima);
- HVXC (*Harmonic Vector eXcitation Coding*) para codificação de voz para transmissão robusta e com taxa de bits muito baixa.

É utilizada a Versão 2 do padrão MPEG-4 por esta ter sido desenvolvida para transmissão em canais mais propensos a erro.

A qualidade dos esquemas AAC e CELP pode ser melhorada utilizando a tecnologia de codificação SBR (*Spectral Band Replication*). No entanto, no sistema DRM a tecnologia SBR é utilizada somente com o esquema AAC. O uso desta tecnologia exige a transmissão de dados especiais no stream de áudio, tirando uma pequena porcentagem da taxa de dados disponível no codificador de áudio.



Informações de configurações de áudio são enviadas no canal SDC.

A figura abaixo mostra as opções de codificação de fonte oferecidas pelo sistema DRM:

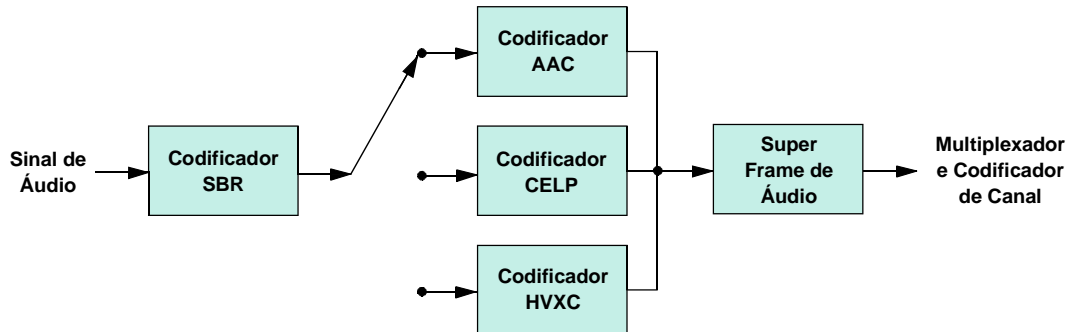


Figura 10. Codificador de fonte do DRM

### 3.4.1 Codificação AAC

É um subconjunto do MPEG-4 utilizado para codificação de áudio em geral e permite taxas de transmissão de 16 kbps até taxas superiores a 64 kbps.

Características específicas do stream AAC no padrão DRM [2]:

- Taxa de bits: o esquema AAC pode ser utilizado a qualquer taxa de bits;
- Taxa de amostragem: são permitidas taxas de 12 kHz e 24 kHz. Quando é utilizado o modo estéreo, a taxa de amostragem deve ser de 24 kHz.;
- Quantidade de amostras: o número de amostras é 960, para que um frame de áudio corresponda a 80 ms ou a 40 ms. Dessa forma, frames CELP e AAC têm comprimentos compatíveis e é possível combinar um número inteiro de frames de áudio para construir um super frame de áudio de 400 ms, que está em sincronismo com o frame de transmissão;
- Reconhecimento de erros: são usadas ferramentas do MPEG-4 para aumentar o reconhecimento de erros no stream AAC. Isso melhora o desempenho do codificador em canais propensos a erro;
- Composição do super frame de áudio: 5 ou 10 frames de áudio, com taxa de amostragem 12 e 24 kHz, respectivamente, compõem um super frame de áudio, correspondendo a 400 ms. Os frames de áudio em um super frame de áudio geralmente são codificados de forma que cada super frame de áudio



tenha comprimento constante, sendo possível troca de bits somente entre frames de áudio num mesmo super frame de áudio. Um super frame de áudio é sempre transmitido em um frame lógico. Assim, não é necessária outra forma de sincronismo para a codificação de áudio;

- UEP (*Unequal Error Protection*): a utilização de proteção de erro desigual nos streams AAC possibilita degradação mais suave e melhor operação quando se tem taxa de erro de bits (BER) mais alta. A UEP é realizada nos codificadores e multiplexador.

A ferramenta de proteção de erro do MPEG-4 permite configuração flexível aplicável a diferentes condições de erro do canal. Através da configuração de proteção de erro desigual (UEP), cada parte do stream de bits é classificada de acordo com sua susceptibilidade a erro. Essa configuração introduz pequeno *overhead*.

O MPEG-4 oferece três ferramentas para aumentar a robustez da codificação AAC. Essas ferramentas reduzem a deterioração percebida no sinal decodificado, causada por bits corrompidos no stream de bits [3]. São elas:

- ferramenta VCB 11 (*Virtual Code Book 11*);
- ferramenta RVLC (*Reversible Variable Length Coding*);
- ferramenta HCR (*Huffman Codeword Reordering*).

A ferramenta HCR reduz significativamente a susceptibilidade a erro do stream de bits com *overhead* mínimo e por isso deve ser aplicado a todos os streams de bits AAC. A ferramenta VCB 11 deve ser utilizada quando se tem baixas taxas de bits, já que introduz *overhead* menor que 1%. A ferramenta RVLC não é utilizada no padrão DRM por introduzir *overhead* com alta taxa de bits [2].

No sistema DRM existem dois frames de áudio:

- frame de áudio monofônico, que consiste em três partes consecutivas: mono1, mono2 e mono3. Mono1 contém os bits SI (*Side Information*), mono2 contém os bits TNS (*Temporal Noising Shaping*) e mono3 contém os bits de dados espectrais. A susceptibilidade a erro decai do mono1 para o mono3.
- frame de áudio estereofônico, que consiste em sete partes consecutivas: stereo1, stereo2, stereo3, stereo4, stereo5, stereo6 e stereo7. Stereo1 contém



bits SI comuns aos dois canais, stereo2 e stereo3 contêm bits SI dos canais esquerdo e direito, respectivamente, stereo4 e stereo5 contêm bits TNS dos canais esquerdo e direito, respectivamente, e stereo6 e stereo7 contêm os bits de dados espectrais dos canais esquerdo e direito, respectivamente. A susceptibilidade a erro decai do stereo1 para o stereo7.

Os bits SI correspondem às informações relativas à quantização dos bits [4].

TNS é uma ferramenta que modela o erro de quantização no domínio do tempo sem modificar a resolução na frequência.

O frame de áudio AAC consiste em uma parte mais protegida e uma menos protegida. A parte mais protegida é formada por um *overhead*, com informações sobre o comprimento dos frames AAC contidos no super frame de áudio, e por blocos com alta proteção. Um bloco com alta proteção possui uma quantia de bytes do começo de cada frame AAC e 8 bits de código CRC. Para o sinal monofônico, os bits CRC cobrem mono1 e mono2. Para o sinal estereofônico, os bits CRC cobrem stereo1, stereo2, stereo3, stereo4 e stereo5 [2].

A figura abaixo ilustra um super frame de áudio de um sinal amostrado a 24 kHz:

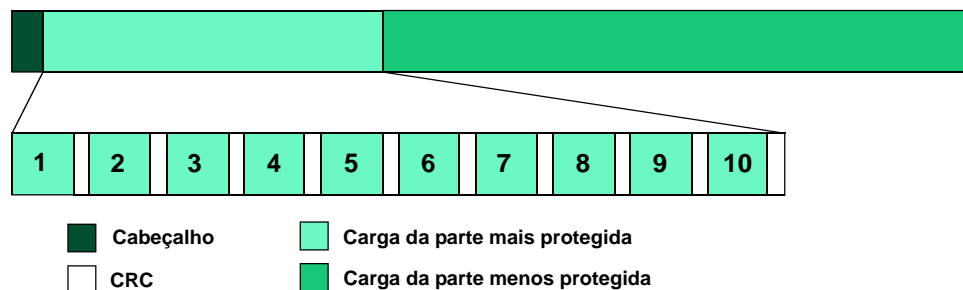


Figura 11. Super frame de áudio

Para taxas de bits de codificação de fonte maiores ou iguais a 20 kbps, a tecnologia SBR deve ser utilizada. Para taxas menores que 20 kbps, a tecnologia SBR pode ou não ser utilizada. Quando utilizada, contudo, a taxa de amostragem do SBR deve ser de 48 kHz e a taxa de amostragem do frame AAC deve ser de 24 kHz.

O frame AAC + SBR apresenta a forma ilustrada na figura abaixo.

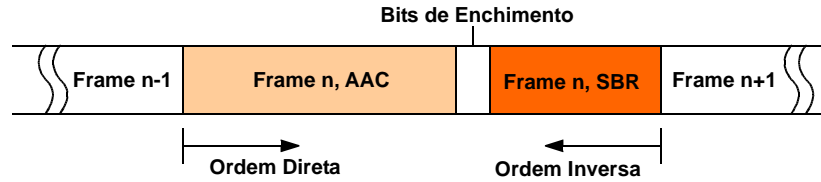


Figura 12. Frame AAC + SBR

Os bits SBR são posicionados no final do frame e em ordem inversa para facilitar sua recuperação no receptor.

A inserção dos frames AAC + SBR no super frame de áudio é feita da mesma maneira que a inserção dos frames AAC.

### 3.4.2 Codificação CELP

A codificação de voz propicia qualidade de voz razoável a taxas de bits significativamente abaixo da taxa padrão. Entretanto, codificadores de voz podem produzir resultados inaceitáveis em materiais diferentes de voz.

Possíveis cenários para emprego de codificação de voz [2]:

- Transmissão simultânea de dois ou três canais de voz de 8 a 10 kbps cada (programa transmitido em idiomas diferentes, por exemplo), ao invés de um programa de áudio de 20 a 24 kbps;
- Serviços de voz junto com serviço de áudio;
- Transmissão *simulcast*, onde apenas taxas de bits menores ou iguais a 8 kbps podem ser transmitidas;
- Aplicações de voz super robusta contra erros do canal.

Características básicas da codificação CELP:

- Taxa de amostragem de 8 kHz ou 16 kHz, para larguras de banda de 100 Hz a 3800 Hz ou 50 Hz a 7000 Hz, respectivamente;
- Taxas de bits entre 4 kbps e 20 kbps;
- Robustez;
- Número inteiro de frames CELP compõe um super frame de áudio de 400 ms.



UEP também é utilizada nos frames CELP. A parte mais protegida é formada pelo começo de cada frame de áudio e a parte menos protegida é formada pelos bits restantes.

As funcionalidades oferecidas pela codificação CELP são [3]:

- múltiplas taxas de bits;
- taxa de bits escalonável;
- largura de banda escalonável.

A primeira funcionalidade permite que taxas arbitrárias sejam selecionadas a passos de 200 bps pela simples mudança dos parâmetros de comprimento do frame, número de sub-frames por frame e código de excitação.

Escalabilidade de taxa de bits e largura de banda reduzem a distorção do sinal ou melhoram a qualidade da voz com componentes de alta frequência através da adição de streams de bits que contêm detalhes do sinal de entrada ou componentes de bandas de frequências mais altas.

O padrão DRM utiliza apenas a funcionalidade de múltiplas taxas de bits.

A codificação CELP é baseada na predição linear (LP – *Linear Prediction*), que consiste em analisar o sinal de entrada (voz) e determinar parâmetros que serão quantizados e utilizados em um filtro de síntese. O filtro de síntese é comandado pelo excitador de códigos.

O diagrama de blocos do codificador CELP está mostrado abaixo [3]:

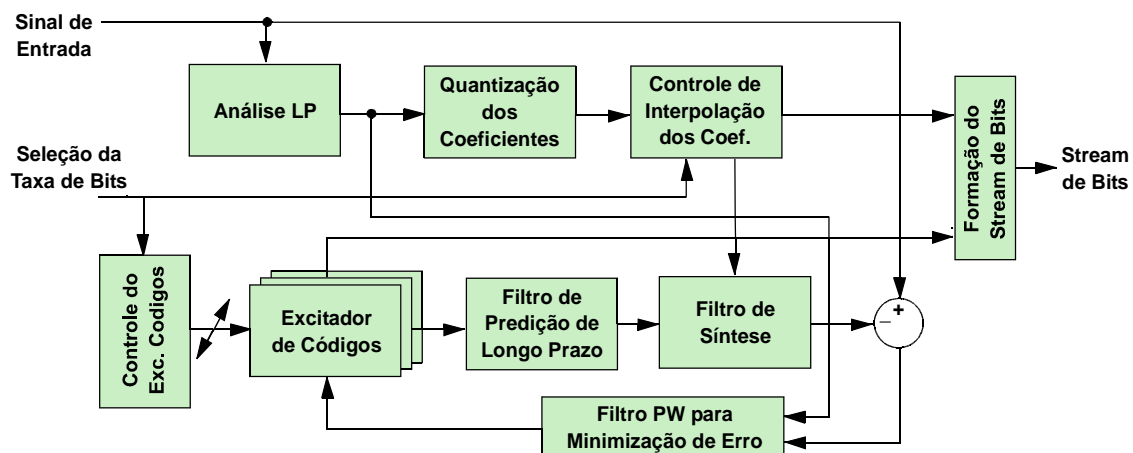


Figura 13. Diagrama de blocos do codificador CELP



A codificação é feita em dois passos. No primeiro, são calculados os coeficientes de predição de longo prazo. No segundo, a diferença entre o sinal sintetizado (saída do filtro de síntese) e o sinal de entrada é feita no filtro PW (*Perceptually Weighted*), cuja resposta em frequência leva em consideração o sistema auditivo humano, e a saída deste filtro realimenta o excitador de códigos. Assim, o erro é minimizado através da escolha de um vetor-código apropriado para os códigos de excitação.

Os coeficientes quantizados, os índices dos vetores-códigos dos códigos de excitação e os coeficientes de predição de longo prazo formam o stream de bits [3].

### 3.4.3 Codificação HVXC

O esquema HVXC propicia qualidade de voz razoável a taxas de bits muito baixas, da ordem de 2 kbps, por exemplo. Essas taxas de bits muito baixas permitem aplicações como [3]:

- Serviços de voz junto com serviço de áudio;
- Transmissão de programa em vários idiomas;
- Gravação de programas em um cartão de rádio (cartão com 4 Mbytes de memória guarda aproximadamente 4,5 horas de programas de rádio);
- Transmissão altamente robusta com ou sem utilização de modulação hierárquica.

Características básicas da codificação HVXC:

- Taxa de amostragem de 8 kHz, para larguras de banda de 100 Hz a 3800 Hz;
- Taxas de bits de 2 kbps e 4 kbps para taxa de codificação fixa;
- Suporta sintaxe robusta de erro e o uso da ferramenta CRC para melhorar a recuperação do stream HVXC em canais propensos a erro;
- Número inteiro e constante de frames HVXC (20 frames), de duração 20 ms, compõe um super frame de áudio de 400 ms.

O HVXC emprega codificação harmônica de coeficientes LP para segmentos com voz e VXC (*Vector eXcitation Coding*) para segmentos sem voz.

O diagrama de blocos do codificador HVXC está mostrado abaixo [3]:

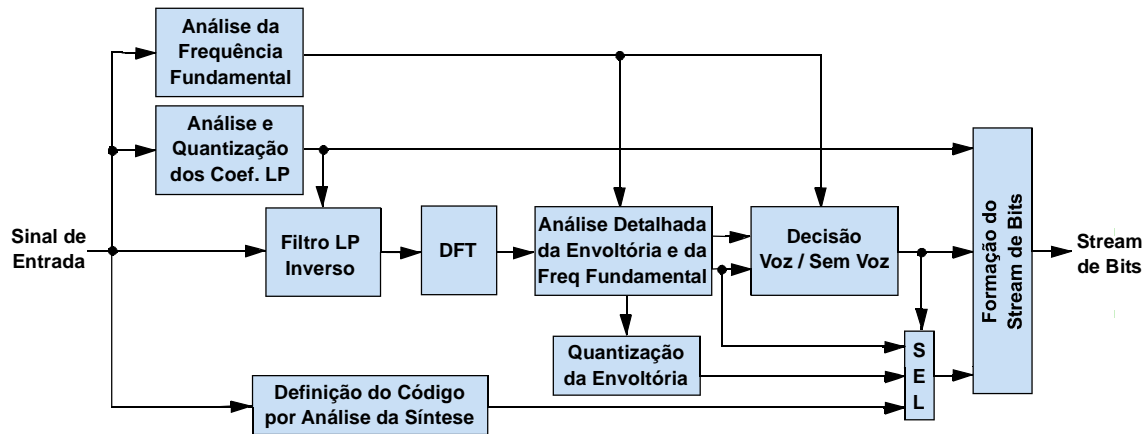


Figura 14. Diagrama de blocos do codificador HVXC

O HVXC faz a análise de predição linear, determina os coeficientes, os quantiza e envia ao filtro LP inverso para que seja encontrado o erro de predição. É aplicada a transformada discreta de Fourier (DFT – *Discrete Fourier Transform*) sobre a saída do filtro e a frequência fundamental e a envoltória do espectro são analisadas. Em seguida, a envoltória é quantizada [3].

O bloco de “Decisão Voz / Sem Voz” classifica os frames em uma das seguintes classes: sem voz; misturado com pouca voz; misturado com muita voz; e voz. No decodificador, um sintetizador de componentes “não voz” é usado para sinais sem voz, enquanto para sinais com qualquer nível de voz é usado um sintetizador de componentes de ruído e de voz. Isso permite transição sutil entre sinais com voz para sinais sem voz e vice-versa [5].

A referência [5] faz uma explicação clara e objetiva sobre o codificador HVXC.

#### 3.4.4 Codificação SBR

A tecnologia SBR pode ser aplicada aos esquemas AAC e CELP para melhorar o desempenho dos codecs (codificadores + decodificadores) de áudio e voz que trabalham com baixa taxa de bits. No entanto, no padrão DRM a tecnologia SBR é aplicada somente à codificação AAC.

A voz humana e a maioria dos instrumentos musicais geram sinais cujas componentes de frequências formam séries harmônicas e a limitação das bandas destes sinais, mostrada a figura 15, reduz sua inteligibilidade [6].



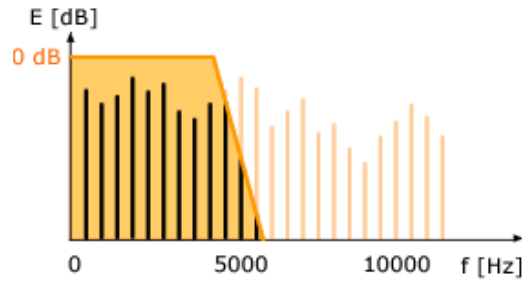


Figura 15. Fig – Exemplo de limitação de banda de um sinal

A tecnologia SBR reconstrói a porção mais alta da banda do sinal (frequências mais altas), que não pode ser codificada pelo codificador, através de uma extrapolação especial da porção baixa da banda do sinal (baixas frequências), que é feito graças à correlação entre as componentes de baixas e altas frequências.

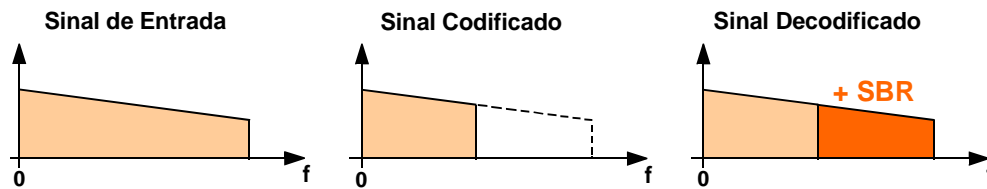


Figura 16. Fig – Reconstrução das altas frequências

Para tal, algumas informações devem ser transmitidas no stream de áudio, diminuindo um pouco a taxa de dados do codificador. Essas informações são computadas na largura de banda total do sinal antes da codificação e permitem a extrapolação depois da decodificação.

Existem duas versões da codificação SBR: SBR-LC, de baixa complexidade, e SBR-HQ, de maior complexidade, mas oferecendo melhor qualidade do som. A diferença entre as versões é refletida apenas no projeto do decodificador [2].

Não é obrigatória a presença da tecnologia SBR no decodificador. Caso não tenha, os dados relativos ao SBR são ignorados e os streams AAC/CELP/HVXC são decodificados.



### 3.5 Codificação de Canal e Mapeamento de Constelação

O sistema DRM utiliza o esquema de codificação multi-nível (MLC – *Multilevel Coding*), que faz otimização conjunta da codificação de canal e do mapeamento de constelação para alcançar melhor desempenho na transmissão.

O objetivo do desenvolvimento foi fazer com que o sinal chegasse ao decodificador de fonte com BER menor que  $10^{-4}$  (valor exigido pelo decodificador de fonte para áudio quase sem distorção), o que deve ser conseguido com decodificador de baixa complexidade e relação sinal-ruído (SNR) tão baixa quanto possível [4].

A figura abaixo mostra o diagrama de blocos da codificação de canal:

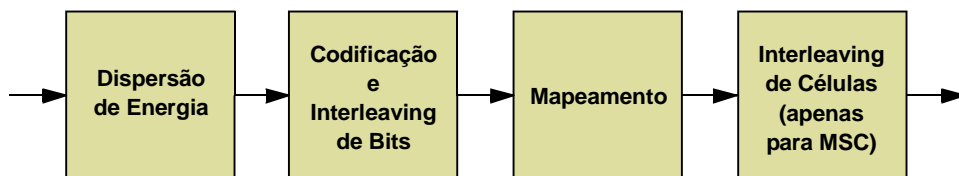


Figura 17. Diagrama de blocos da codificação de canal

#### 3.5.1 Dispersão de Energia

A técnica de dispersão de energia é utilizada para evitar regularidades no sinal transmitido e é feita para cada canal separadamente. Isso ajuda a manter o sincronismo do relógio, que pode ser perdido caso receba sequência muito longa de um mesmo bit, por não conseguir diferenciar um bit de seus adjacentes.

O vetor de entrada do dispersor de energia é misturado por uma soma módulo 2 com uma sequência binária pseudo-aleatória, antes da codificação de canal. A sequência binária pseudo-aleatória é definida pela saída do registrador de deslocamento ilustrado abaixo [2]:

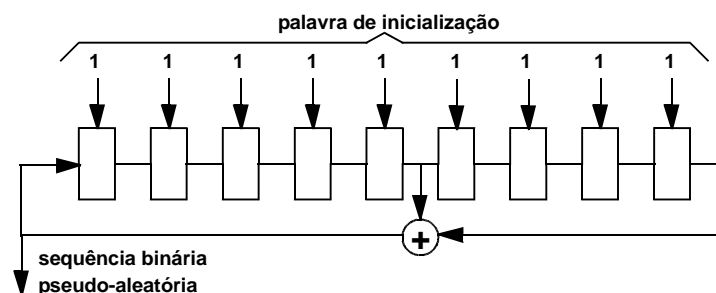


Figura 18. Gerador da sequência binária pseudo-aleatória



### 3.5.2 Interleaving

No DRM, é feito *interleaving* de bits após a codificação de canal e *interleaving* de células após o mapeamento [2].

Para o *interleaving* de bits, ilustrado na figura 21, um mesmo algoritmo é aplicado independentemente para os canais FAC, SDC e MSC. É utilizado o esquema de *interleaving* em bloco.

O *interleaving* de células é aplicado apenas no canal MSC, com a possibilidade de escolher profundidade de *interleaving* baixa ou alta, ou *interleaving* curto ou longo. O *interleaving* curto, que utiliza a técnica de *interleaving* em bloco, é aplicado a canais típicos de onda média e onda longa. Estes canais não são muito seletivos no tempo e na frequência e o *interleaving* curto contorna com eficácia os problemas de erros em rajada. O *interleaving* longo é aplicado a canais típicos de onda curta, muito seletivos no tempo e na frequência. Neste caso, é aplicado *interleaving* convolucional.

As técnicas de *interleaving* citadas estão explicadas no anexo 3.

Quando é utilizado *interleaving* curto, o atraso correspondente ao processo de *interleaving* e *de-interleaving* (operação inversa efetuada no receptor) é de 800 ms. Para o *interleaving* longo, o atraso é de 2,4 s.

### 3.5.3 Codificação Multi-nível

A codificação multi-nível faz com que os bits nas posições mais propensas a erro no mapeamento QAM recebam maior proteção na codificação de canal. Níveis de proteção diferentes são alcançados com códigos diferentes, derivados do mesmo código-mãe. Modulação hierárquica também pode ser utilizada, dividindo o multiplex em dois streams que são transmitidos simultaneamente, mas cada um com uma modulação (64-QAM e 16-QAM). Nesse caso a relação sinal ruído será diferente para os dois streams.

O código-mãe, cujo codificador está mostrado na figura abaixo, possui taxa  $\frac{1}{4}$  e comprimento 7 [2].

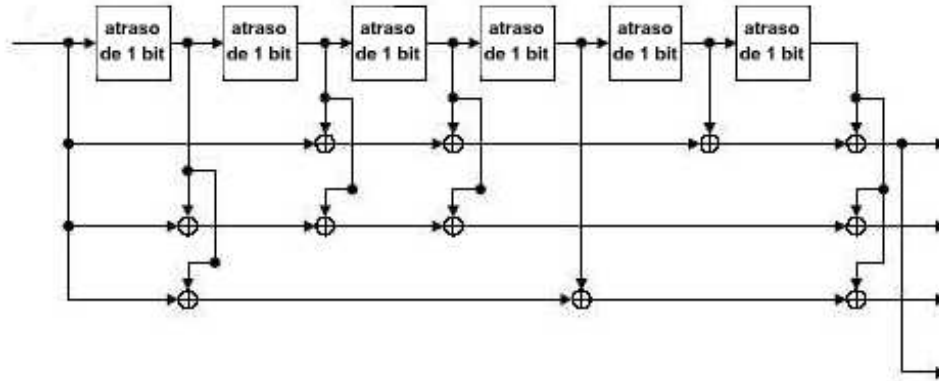


Figura 19. Codificador convolucional

Para exemplificar a codificação multi-nível, considere a constelação 16-QAM separada em suas componentes de quadratura e fase, resultando em duas 4-ASK (*Amplitude Shift Keying*). A figura 20 ilustra a partição unidimensional do 16-QAM. Primeiro, o sinal é dividido em duas partes, para  $x = 0$  e  $x = 1$ . Depois, cada parte é dividida novamente.

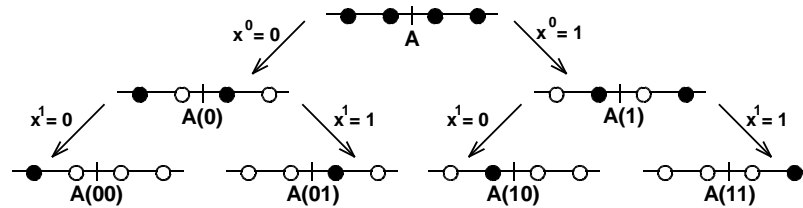


Figura 20. Partição unidimensional do 16-QAM (4-ASK)

Assim, o esquema MLC necessita de dois codificadores em paralelo com taxas de codificação diferentes, como ilustra a figura 21. O código  $C^0$  requer menor taxa de codificação, ou seja, maior proteção que  $C^1$ . Isso ocorre porque a distância euclidiana aumenta (ver figura 20), necessitando de menor proteção [4].

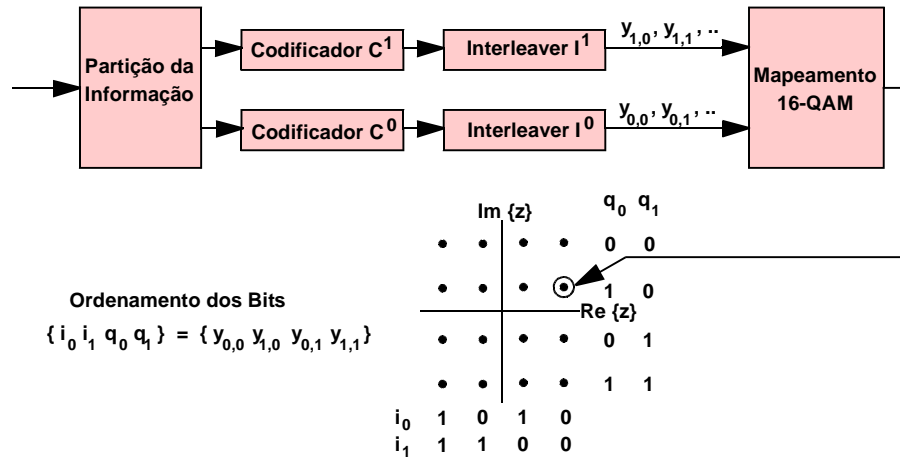


Figura 21. Codificador multi-nível com 2 níveis para 16-QAM

Seis diferentes combinações de taxas de codificação médias e constelações são disponibilizadas para o canal MSC. O canal SDC utiliza apenas uma taxa de codificação, com duas possíveis constelações. O canal FAC utiliza sempre a mesma taxa e mesma constelação. A tabela abaixo relaciona as possíveis combinações [4]:

Tabela 7. Constelações e taxas de codificação do DRM

Canal	Constelação	Taxas de Codificação Média
FAC	4-QAM	0,6
SDC	4 / 16-QAM	0,5
MSC	16-QAM	0,5 / 0,62
	64-QAM	0,5 / 0,6 / 0,71 / 0,78

A taxa de bits total depende da largura de banda do sinal, do modo de proteção (UEP ou EEP (*Equal Error Protection*)), da constelação e da taxa de codificação do MSC. As tabelas abaixo mostram as taxas de bits úteis para duas configurações do MSC [2].

Tabela 8. Taxas de bits com constelação 64- QAM, taxa de codificação 0,6 e EEP

Modo de Transmissão	Ocupação do Espectro					
	0	1	2	3	4	5
A	11,3 kbps	12,8 kbps	23,6 kbps	26,6 kbps	49,1 kbps	55,0 kbps
B	8,7 kbps	10,0 kbps	18,4 kbps	21,0 kbps	38,2 kbps	43,0 kbps
C	-	-	-	16,6 kbps	-	34,8 kbps
D	-	-	-	11,0 kbps	-	23,4 kbps

Tabela 9. Taxas de bits com constelação 16- QAM, taxa de codificação 0,62 e EEP

Modo de Transmissão	Ocupação do Espectro					
	0	1	2	3	4	5
A	7,8 kbps	8,9 kbps	16,4 kbps	18,5 kbps	34,1 kbps	38,2 kbps



<b>B</b>	6,0 kbps	6,9 kbps	12,8 kbps	14,6 kbps	26,5 kbps	29,8 kbps
<b>C</b>	-	-	-	11,5 kbps	-	24,1 kbps
<b>D</b>	-	-	-	7,6 kbps	-	16,3 kbps

A menor taxa admissível é 4,8 kbps, quando são utilizados modo B e canal de 4,5 kHz, constelação e codificação do MSC iguais a 16-QAM e 0,5, respectivamente.

A maior taxa admissível é 72,0 kbps, quando são utilizados modo A e canal de 20 kHz, constelação e codificação do MSC iguais a 64-QAM e 0,78, respectivamente.

### 3.5.4 Mapeamento de Constelação

As constelações utilizadas pelo DRM são: 4-QAM, 16-QAM e 64-QAM. O canal FAC utiliza 4-QAM, o SDC utiliza 4-QAM ou 16-QAM e o MSC utiliza 16-QAM ou 64-QAM. O princípio básico da modulação QAM encontra-se no anexo 2.

Os streams de dados na saída do *interleaver* consistem em um determinado número de bits que serão mapeados em diferentes posições da constelação. No exemplo da figura 21, são necessários 4 bits para determinar uma posição na constelação (dois do *interleaver*  $I^0$  e dois do  $I^1$ ). O primeiro bit do *interleaver*  $I^0$  ( $y_{0,0}$ ) e o primeiro bit do *interleaver*  $I^1$  ( $y_{1,0}$ ), nessa ordem, determinam a coordenada no eixo real e os segundos bits dos *interleavers*  $I^0$  ( $y_{0,1}$ ) e  $I^1$  ( $y_{1,1}$ ) determinam a posição no eixo imaginário.

## 3.6 Alterações nos Atuais Transmissores para Implantação do DRM

Uma das preocupações no desenvolvimento do sistema DRM foi garantir a compatibilidade da modulação digital com os transmissores existentes, minimizando as modificações nestes. Geralmente, os transmissores constituídos por amplificadores lineares ou não e com moduladores PSM (*Pulse Step Modulation*) ou PDM (*Pulse Duration Modulation*) de tecnologia totalmente de estado sólido podem ser adaptados com probabilidades elevadas de sucesso [7].

As modificações podem ser feitas de duas formas:

1) Através da linearização de transmissores não lineares, para garantir transmissões SSB adequadas. O sinal DRM é alimentado na entrada do transmissor, utilizando-o como amplificador. Essa técnica gera bons resultados em termos do espectro



de saída do transmissor, que está de acordo com a máscara espectral da ITU, mas gera resultados ruins em termos da conversão de potência. Assim, é indicada apenas para testes, e não para transmissões de longo prazo, devido à ineficiência de potência.

2) Através da utilização do excitador DRM, atualmente fabricado pela Telefunken, Harris, Continental, Nautel, RIZ e Thales. O excitador gera o sinal e o separa em suas componentes de amplitude e fase. A componente de fase modula a portadora que substitui a portadora analógica do transmissor existente e a componente de amplitude é aplicada à entrada de áudio do transmissor. Para recombinar as componentes no modulador com precisão (gerar o sinal OFDM), a largura de banda do modulador de áudio deve ser no mínimo 3 vezes maior que a largura de banda do sinal transmitido, o que provavelmente exigirá modificações no filtro do modulador existente. Sem esta condição satisfeita, os extremos do sinal DRM transmitido podem não ser íngremes o suficiente, causando interferência em canais adjacentes. Atraso entre as componentes de fase e amplitude no modulador também causa o problema citado, sendo outra função do excitador fazer com que as componentes cheguem ao mesmo tempo ao modulador.

O excitador DRM da Thales é composto por dois subsistemas principais [8]:

- Codificador/modulador digital: responsável pelo processamento do sinal. Permite que o sinal transmitido seja monitorado a cada passo do processamento digital, fornecendo informações detalhadas como o serviço que está sendo transmitido e a taxa de bits úteis;
- Sintetizador de RF digital: responsável pela conversão do sinal complexo *I/Q* (*In phase / Quadrature*) em um sinal de RF modulado em fase ou em amplitude e fase. Gera a saída de RF diretamente com conversores digital/analógico, com ruído de fase extremamente baixo. Possui um display onde são sinalizadas informações como modulação, frequência, nível de supressão da portadora e potência de saída.

O diagrama de blocos abaixo mostra a configuração básica dos elementos necessários à radiodifusão do sinal DRM [7]:

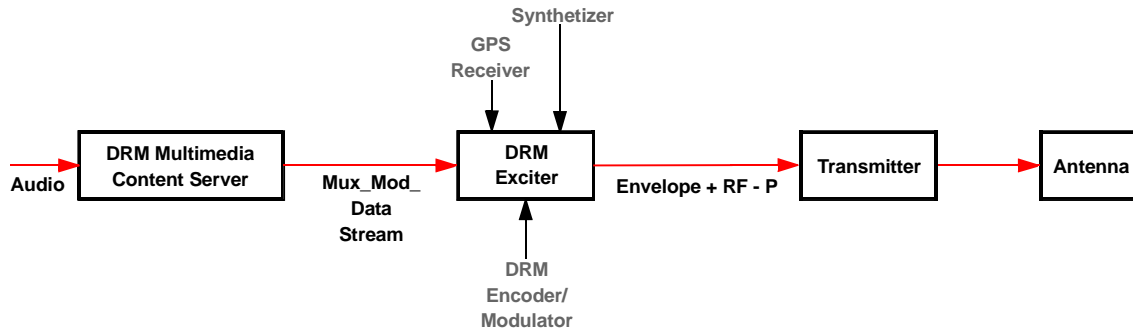


Figura 22. Concepção e transmissão do sinal DRM

### 3.7 Alterações nas Atuais Antenas para Implantação do DRM

Assim como os transmissores, as antenas mais modernas podem ser facilmente adaptadas para irradiar o sinal digital.

A largura de banda das antenas AM, muitas vezes limitada, é um fator decisivo para bom desempenho do sinal digital. Para transmitir o sinal DRM, é necessário um mínimo de 10 kHz de largura de banda (frequência da portadora  $\pm 5\text{kHz}$ ), além de VSWR da impedância de entrada da antena simétrica (de preferência constante) em relação à frequência da portadora [7].

As antenas de transmissão para o serviço de OL, OM e OC têm diferentes comportamentos de VSWR. Em regra geral pode-se dizer o seguinte [7]:

Transmissão do sinal DRM em antenas de Onda Longa: possível, embora tenham de ser levadas em conta atenções especiais no que diz respeito a eventuais e complexas sintonias na cabine das antenas, uma vez que a VSWR varia consideravelmente para uma largura de banda de 10 kHz.

Transmissão do sinal DRM em antenas de Onda Média: possível e com relativa facilidade de implementação. Pode necessitar de ligeiras alterações na cabine de antena, apesar da VSWR variar muito pouco para uma largura de banda da 10 kHz;

Transmissão do sinal DRM em antenas de Onda Curta: possível e sem quaisquer modificações na antena. Como as antenas de OC são antenas de banda larga cobrindo uma faixa de frequências até uma relação de 2:1, a variação de impedância numa largura de banda de 10 kHz é bastante pequena.





### 3.8 Receptores

O receptor deve detectar qual o modo de transmissão em uso através das informações contidas nos canais FAC e SDC. Com o modo identificado, o processo de demodulação consiste no inverso do mostrado na figura 1. O receptor também é informado sobre os serviços presentes e, por exemplo, qual decodificação de fonte deve ser aplicada.

Os únicos receptores disponíveis no mercado são apenas protótipos e têm preços altos. O receptor DRM 2010, fabricado pela *Mayah Communications*, está mostrado na figura abaixo.



Figura 23. Receptor DRM 2010

Informações como nome e frequência da estação, intensidade do campo e número de serviços do sinal DRM recebido são visualizados no *display* do DRM 2010. Este aparelho recebe também sinais AM analógicos (OL, OM e OC) e FM. O preço é € 695,00.

Espera-se uma grande variedade de receptores no mercado no próximo ano (2004), quando os chips dos fabricantes estarão prontos [1].

### 3.9 Relações de Proteção

Para introdução do sinal DRM, deve-se assegurar que o sinal digital não cause mais interferência que o analógico e que as interferências causadas pelas estações AM existentes sejam baixas o suficiente para permitir recepção confiável do sinal digital [9].

Assim, são necessárias relações de proteção para quatro casos:

- Sinal AM interferido por sinal AM (AM-AM);
- Sinal AM interferido por sinal DRM (AM-DRM);
- Sinal DRM interferido por sinal AM (DRM-AM);



- Sinal DRM interferido por sinal DRM (DRM-DRM).

As relações de proteção são obtidas levando em conta a máscara de transmissão da ITU, que deve atenuar o sinal em 30 dB entre  $\pm 0,5$  e  $\pm 0,53$  em relação ao centro da largura de banda e, acima e abaixo de  $\pm 0,53$ , em até -60 dB com inclinação de -12 dB/oitava.

As relações de proteção AM-AM são estabelecidas na Recomendação ITU-R BS.560. O método utilizado para definição das outras três está mostrado no anexo 2 de [9].

As combinações de ocupação do espectro e modos de transmissão levam a vários espectros de transmissão, que causam diferentes interferências e requerem diferentes relações de proteção. No entanto, as diferenças entre as relações de proteção para os diferentes modos de transmissão são muito pequenas.

As tabelas abaixo mostram as relações de proteção para o modo B, utilizando constelação 64-QAM (MSC) e taxa de codificação 0,6, para ocupações de espectro 0, 1, 2 e 3 apenas. O símbolo B0 indica modo B, ocupação do espectro 0.

**Tabela 10.** Relações de proteção AM - DRM (dB)

Sinal Desejado	Sinal Indesejado	Separação entre as frequências – $f_{\text{desejado}} - f_{\text{indesejado}}$ (kHz)												
		-20	-18	-15	-10	-9	-5	0	5	9	10	15	18	20
AM	DRM_B0	-33,4	-33,4	-32,0	-18,5	-11,4	23,4	23,6	-13,9	-29,7	-31,2	-33,4	-33,4	-33,4
AM	DRM_B1	-34,0	-33,5	-30,6	-15,0	-6,8	23,0	23,0	-14,1	-28,7	-30,4	-34,0	-34,0	-34,0
AM	DRM_B2	-31,8	-29,9	-26,5	-17,4	-12,7	20,4	23,5	20,4	-12,7	-17,4	-26,5	-29,9	-31,8
AM	DRM_B3	-30,2	-28,3	-24,9	-15,0	-8,9	20,0	23,0	20,0	-8,9	-15,0	-24,9	-28,3	-30,2

**Tabela 11.** Relações de proteção DRM - AM (dB)

Sinal Desejado	Sinal Indesejado	Separação entre as frequências – $f_{\text{desejado}} - f_{\text{indesejado}}$ (kHz)												
		-20	-18	-15	-10	-9	-5	0	5	9	10	15	18	20
DRM_B0	AM	-52,9	-50,7	-47,4	-41,3	-40,2	-31,4	4,8	1,3	-26,1	-36,3	-42,1	-45,8	-48,2
DRM_B1	AM	-52,6	-50,4	-47,1	-41,1	-39,9	-31,2	4,8	4,6	-17,2	-32,8	-41,2	-44,8	-47,2
DRM_B2	AM	-46,8	-44,6	-41,0	-35,0	-25,9	1,4	7,8	1,4	-25,9	-35,0	-41,0	-44,6	-46,8
DRM_B3	AM	-46,1	-43,7	-40,2	-32,1	-17,2	4,7	7,8	4,7	-17,2	-32,1	-40,2	-43,7	-46,1

**Tabela 12.** Relações de proteção DRM - DRM (dB)

Sinal Desejado	Sinal Indesejado	Separação entre as frequências – $f_{\text{desejado}} - f_{\text{indesejado}}$ (kHz)												
		-20	-18	-15	-10	-9	-5	0	5	9	10	15	18	20
DRM_B0	DRM_B0	-43,6	-43,5	-43,6	-38,8	-36,8	-24,4	16,4	-24,4	-36,8	-38,8	-43,6	-43,5	-43,6
DRM_B0	DRM_B1	-44,2	-44,1	-43,6	-36,6	-34,5	-21,5	15,9	-24,1	-35,7	-37,7	-43,9	-44,1	-44,2
DRM_B0	DRM_B2	-44,0	-42,3	-39,5	-33,3	-31,7	-23,2	13,4	12,6	-22,2	-25,0	-34,3	-38,1	-40,2
DRM_B0	DRM_B3	-42,4	-40,8	-37,9	-31,7	-30,1	-20,3	12,8	12,7	-0,8	-23,4	-32,7	-36,5	-38,6
DRM_B1	DRM_B0	-43,0	-43,1	-43,1	-38,6	-36,6	-24,4	16,4	-21,5	-35,3	-37,5	-43,0	-43,1	-43,0
DRM_B1	DRM_B1	-43,6	-43,6	-43,1	-36,4	-34,4	-21,4	16,4	-21,4	-34,4	-36,4	-43,1	-43,6	-43,6
DRM_B1	DRM_B2	-43,7	-42,0	-39,2	-33,0	-31,5	-23,0	13,4	13,3	-0,3	-23,4	-33,2	-37,1	-39,3



DRM_B1	DRM_B3	-42,1	-40,4	-37,6	-31,4	-29,9	-20,1	13,4	13,3	5,3	-21,8	-31,6	-35,5	-37,7
DRM_B2	DRM_B0	-40,6	-40,4	-38,4	-27,0	-22,7	15,7	16,4	-24,2	-35,8	-37,5	-40,6	-40,6	-40,6
DRM_B2	DRM_B1	-41,0	-40,2	-36,8	-24,3	1,8	15,8	15,9	-23,8	-34,9	-36,6	-41,0	-41,1	-41,1
DRM_B2	DRM_B2	-38,7	-36,7	-33,1	-24,3	-21,7	12,7	16,4	12,7	-21,7	-24,3	-33,1	-36,7	-38,7
DRM_B2	DRM_B3	-37,0	-35,1	-31,5	-22,7	-0,7	12,7	15,9	12,7	-0,7	-22,7	-31,5	-35,1	-37,0
DRM_B3	DRM_B0	-40,0	-39,8	-37,4	-24,7	2,3	16,3	16,4	-21,3	-34,5	-36,4	-40,0	-40,0	-40,0
DRM_B3	DRM_B1	-40,4	-39,3	-35,7	-21,8	8,2	16,3	16,4	-21,2	-33,7	-35,5	-40,3	-40,6	-40,6
DRM_B3	DRM_B2	-37,9	-35,9	-32,2	-22,9	-0,3	13,3	16,4	13,3	-0,3	-22,9	-32,2	-35,9	-37,9
DRM_B3	DRM_B3	-36,3	-34,3	-30,6	-21,3	5,3	13,3	16,4	13,3	5,3	-21,9	-30,6	-34,3	-36,3

Analisando as tabelas acima, verifica-se que as relações de proteção AM-DRM são maiores que as relações DRM-AM e DRM-DRM. Isso mostra que o sinal DRM é mais robusto que o AM. As relações de proteção DRM-DRM são maiores que as relações DRM-AM, pois quando o sinal digital é interferido pelo analógico, apenas algumas subportadoras serão corrompidas. Já quando o sinal digital é interferido por outro sinal digital, um número maior de subportadoras é corrompido.

A tabela 13 mostra as correções que devem ser feitas nas tabelas 11 e 12 quando são utilizadas outras combinações de constelação e taxa de codificação média.

**Tabela 13.** Correção nas tabelas 11 e 12 para diferentes combinações de constelação e taxa de codificação média

Constelação	Taxa de Codificação Média	Correção (dB)
16-QAM	0,5	-6,7
	0,62	-4,6
64-QAM	0,5	-1,2
	0,6	0
	0,71	1,8
	0,78	3,3

### 3.10 Resultados dos Testes

Os primeiros testes mais significativos realizados com o sistema DRM, de campo e laboratório, ocorreram em julho e agosto de 2000, com frequências de onda média e onda curta. Os testes de campo foram realizados para distâncias de 240 a 1000 km (onda média) e 500 a 3700 km (onda curta). Os resultados encontrados foram os seguintes [10]:

#### Qualidade do Áudio

Foram realizadas medidas subjetivas, baseadas em opiniões de ouvintes, numa escala de 1 (ruim) a 5 (excelente). Concluiu-se que a qualidade do áudio do sinal DRM é muito superior à do sinal analógico DSB. O áudio codificado com a técnica AAC e taxa de transmissão de 24 kbps recebeu pontuação 4,2 enquanto o mesmo áudio com modulação



analógica recebeu pontuação 3. Quando utilizada a técnica AAC + SBR, o sinal DRM foi comparado ao FM.

### Robustez

As transmissões foram feitas em canais de 10 kHz (onda curta) e 9 kHz (onda média), com sinais AM DSB e DRM. O desempenho das transmissões digitais foi significativamente melhor que as analógicas em relação à qualidade do áudio em presença de ruído e multipercurso. Isso porque o sinal digital suporta um certo grau de interferência co-canal e de canal adjacente sem sofrer qualquer distorção, além de utilizar técnicas de *interleaving* e correção de erro, que garantem melhor desempenho em caso de multipercurso. Geralmente, quando o sinal digital é corrompido, a recepção do analógico é muito ruim.

### Área de Cobertura

Os testes realizados com frequências de onda média mostraram que a cobertura do sinal digital é similar à do analógico, sendo que a potência do sinal digital é aproximadamente 7 dB menor que a do sinal analógico.

Os testes realizados com frequências de onda curta mostraram que a cobertura do sinal digital é igual ou maior que a cobertura do analógico, sendo que a potência do sinal digital é aproximadamente 4 dB menor que a do sinal analógico.

### Interferência

Foram analisadas interferências co-canal e de canal adjacente para sinal DRM interferido por DRM, AM interferido por DRM e DRM interferido por AM.

As relações de proteção para DRM interferido por DRM ou AM são melhores que os valores correspondentes da ITU para AM interferido por DRM ou AM, pois o sinal digital é mais robusto à interferência. A relação de proteção para DRM interferido por DRM está no limite da sensibilidade, ou seja, o sinal interferente é praticamente um ruído. A relação de proteção para DRM interferido por AM é ainda melhor, já que a portadora analógica corrompe apenas algumas subportadoras OFDM, que podem ser corrigidas.

O caso do sinal AM interferido por DRM é um pouco diferente devido ao uso eficiente do espectro pelo sinal digital. As relações de proteção são um pouco piores que no



caso de AM interferido por AM, porque o sinal digital apresenta alta energia nas bordas do canal. Um sinal DRM de acordo com a máscara espectral da ITU fornece relações de proteção aceitáveis para receptores modernos, quando a potência do sinal DRM é de 6 a 7 dB menor que a do sinal AM.

### Aquisição do Sinal

Sinais que utilizam *interleaving* curto possuem atraso de 800 ms devido ao processo de *interleaving* e *de-interleaving*. Como o sinal é formado por três canais (FAC, MSC e SDC), é preciso uma média de 1,6 s para aquisição e demodulação do áudio. Já para sinais que utilizam *interleaving* longo, que possuem atraso de 2,4 s devido ao processo de *interleaving* e *de-interleaving*, o tempo de aquisição é de 3,6 s.

### Eficiência Espectral

Os extremos do sinal digital são muito íngremes e a densidade espectral de potência alcança rapidamente um nível mais de 35 dB abaixo do nível do sinal no canal, o que minimiza interferências além de 4,5/5 kHz do centro do canal, aumentando a eficiência espectral. No entanto, o aumento da eficiência espectral se dará a longo prazo, uma vez que transmissões analógicas serão mantidas por um bom período. Outro ganho de eficiência espectral é conseguido com o uso de SFN.

A figura abaixo mostra o espectro de um sinal DRM com modulação 64-QAM e 10 kHz de largura de banda, em azul, comparado à máscara da ITU, em vermelho.

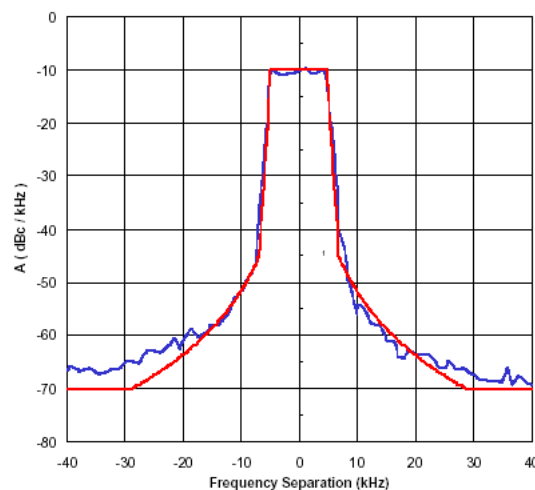


Figura 24. Espectro do sinal DRM transmitido e máscara da ITU



Continuaram a ser realizados testes, com diferentes configurações e objetivos, como os expostos abaixo:

### **3.10.1 Testes com Onda Ionosférica com Incidência Próxima à Vertical**

Em dezembro de 2000 foi realizada uma série de testes no Equador utilizando propagação de onda ionosférica com incidência próxima à vertical, condição comum nas regiões tropicais. Isso possibilita a cobertura de áreas muito grandes, até um país inteiro, com um único transmissor. As frequências tipicamente usadas são as de onda tropical, entre 2 e 5 MHz [11].

Vários problemas foram revelados nestes testes, mostrando que o simulador de canal assumia condição diferente da encontrada na prática e o atraso devido ao maior número de reflexões na ionosfera era maior que o máximo admitido (5 ms para o modo de transmissão B) no mesmo horário em que os valores máximos admissíveis para o efeito Doppler foram excedidos.

Com isso, os simuladores de canal e algoritmos dos receptores foram alterados para testes futuros e dois modos de transmissão mais robustos, C e D, foram introduzidos no sistema DRM em 2001.

A fase de testes seguinte foi realizada na Tailândia com o intuito de verificar as mudanças citadas acima. Foram utilizadas frequências na faixa de 6 MHz.

Os testes foram realizados entre 5:00 e 20:00 horas com os modos de transmissão A, B C e D. Foram observados os seguintes resultados: antes do nascer do sol não houve recepção (sinal muito fraco); alguns minutos após o sol nascer e durante as duas horas seguintes havia recepção muito boa para os modos B, C e D; de duas horas antes do pôr-do-sol até uma hora depois, o canal voltava a ser mais estável, porém a recepção não era tão boa quanto a do começo da manhã. No horário intermediário o canal ficava instável devido à alta absorção da ionosfera e a recepção era ocasionalmente interrompida para todos os modos de transmissão, sendo que a recepção do sinal AM analógico também seria inaceitável nessas condições.

As observações acima ocorreram porque após o nascer do sol as camadas E e F da ionosfera são rapidamente formadas, seguidas pela camada D, criando grande atenuação



para os múltiplos percursos. Quando o sol se põe, a camada D se dissolve rapidamente, enquanto as camadas E e F se dissolvem mais lentamente.

Durante os testes o modo A foi menos utilizado devido ao atraso excessivo. Os modos B e D mostraram resultados melhores que o C. Atraso e efeito Doppler foram menos nocivos à recepção que o desvanecimento plano profundo.

Os testes mostraram que os radiodifusores não devem usar um único modo de transmissão e/ou frequência durante o dia, a menos que se utilize sempre o modo mais robusto com menor qualidade do áudio. O sistema de realimentação em tempo real permite a adaptação/seleção do modo de transmissão e dos parâmetros associados de acordo com as mudanças das condições de propagação do canal, mantendo sempre a maior taxa de bits e qualidade de áudio possíveis.

### 3.10.2 Testes de Longa Distância

Em maio de 2001 foram realizados testes de longa distância com transmissões de Sines (Portugal), Jülich (Alemanha) e Sackville (Canadá) para recepção em Madagascar. A tabela abaixo relaciona as potências dos transmissores e suas distâncias ao *site* de recepção [11]:

**Tabela 14.** Estações transmissoras utilizadas nos testes de longa distância

<i>Site</i> de Transmissão	Potência do sinal AM	Potência do sinal DRM	Distância
<b>Sines</b>	250 kW	~ 100 kW	8583 km
<b>Jülich</b>	100 kW	~ 40 kW	8739 km
<b>Sackville</b>	250 kW	~ 100 kW	13180 km

As transmissões foram feitas em diferentes frequências e com as constelações 16-QAM e 64-QAM para o canal MSC. A tabela 14 mostra os resultados para o modo de transmissão B, indicando quantos *slots* forneceram resultados satisfatórios.

**Tabela 15.** Resumo das recepções dos testes de longa distância para o modo B

Site de Transmissão	Hora Inicial	Frequência (MHz)	Número de slots com qualidade maior que 90 %		Problema Principal
			16-QAM	64-QAM	
Circuitos em que houve recepção satisfatória todos os dias com 16-QAM e 64-QAM					
Jülich	15:00	21	3/3	4/4	-----
Jülich	19:00	13	3/3	3/3	Atraso
Jülich	21:00	13	5/5	5/5	Atraso



<i>Circuitos em que houve recepção satisfatória todos os dias com 16-QAM</i>					
Sackville	20:00	17	3/3	2/3	Baixa SNR
<i>Circuitos em que houve recepção eventual com 16-QAM ou 64-QAM</i>					
Sines	16:30	21	2/3	2/3	Baixa SNR
Sines	22:30	15	2/4	1/4	Baixa SNR
Sines	23:30	15	2/5	1/5	Baixa SNR
<i>Circuitos em que não houve recepção</i>					
Jülich	19:30	12	0/2	0/2	Interferência AM

A tabela mostra que a recepção do sinal transmitido de Jülich, Alemanha, foi ótima (exceto para a frequência de 12 MHz), com boa qualidade do áudio, apesar da ocorrência eventual de atrasos de até 6 ms do segundo percurso nas transmissões iniciadas às 19:00 e 21:00 horas. O sinal recebido pelo segundo percurso não tinha força suficiente para causar interferência intersimbólica, mas atrapalhava o sincronismo no tempo do receptor, principalmente para o modo A. O problema da interferência para a transmissão em 12 MHz seria solucionado com a mudança da frequência.

Para transmissões de Sackville, Canadá, com mais de 13000 km de distância, o sinal com constelação mais robusta (16-QAM) forneceu resultado muito bom, enquanto o sinal com constelação 64-QAM apresentou baixa relação sinal ruído (SNR) na recepção. Atraso e efeito Doppler não causaram problemas na recepção.

Os sinais transmitidos de Sines, Portugal, apresentaram baixa SNR na recepção, impedindo boa recepção do áudio em alguns dias.

### 3.10.3 Testes de Ultra Longa Distância

Em abril e maio de 2002 foram realizados testes de ultra longa distância, com distâncias maiores que 23000 km. As transmissões foram feitas dos três *sites* utilizados para os testes de longa distância e um quarto *site* em Bonaire, no Caribe. As recepções foram feitas em Melbourne e Sidney, na Austrália, e Wellington, na Nova Zelândia [11].

As transmissões da Alemanha e do Canadá forneceram SNR alta o suficiente para permitir taxas de dados maiores que 17 kbps. As transmissões do Caribe só puderam ser recebidas com baixas taxas e utilizando constelação 16-QAM. A maioria das transmissões de Portugal apresentou SNR muito baixa, mesmo utilizando as configurações de modulação mais robustas.

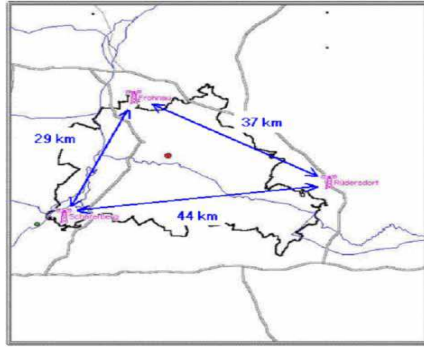




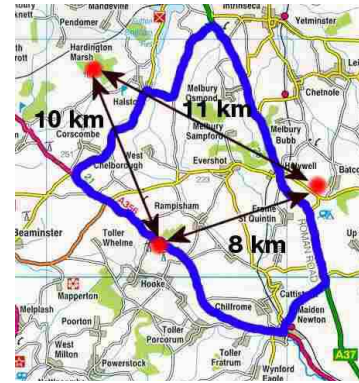
Os sinais recebidos foram gravados e analisados, mostrando que futuras gerações de receptores precisariam despende mais atenção no desenvolvimento de alguns algoritmos, principalmente relacionados a detecção do modo de transmissão, sincronismo e estimação do canal.

#### **3.10.4 Testes com Redes de Frequência Única**

Foram realizados dois testes entre junho e setembro de 2002 para testar o conceito da rede de frequência única, SFN. Um deles foi realizado em Berlim, Alemanha, com frequência de onda média (1485 kHz) e o outro em Dorset, Inglaterra, com frequência de onda curta (25/26 MHz). As localizações dos transmissores em cada SFN e as distâncias entre eles estão mostrados na figura abaixo [11].



Transmissores da SFN de onda média em Berlim



Transmissores da SFN de onda curta em Dorset

Figura 25. Redes de Frequência Única

A SFN em Berlim foi formada por três transmissores de 10 kW, com potência média do sinal digital igual a 500 W. O modo de transmissão escolhido para os testes foi o modo A, com constelação 64-QAM (MSC) e taxa de codificação de canal igual a 0,6. Esta configuração permitiu transmissão de áudio estéreo e campo de 39,8 dB $\mu$ V/m na fronteira da área de cobertura.

As medidas de recepção foram feitas por um veículo de teste cobrindo desde áreas urbanas densas até campos abertos e mostraram alto nível de confiabilidade do sinal. Foi observado desvanecimento do sinal muito maior em áreas urbanas que em áreas rurais, além da clara influência do ruído “feito pelo homem” em áreas urbanas. Não foi observado efeito Doppler na recepção, mesmo à velocidade de 120 km/h.

O teste realizado em Dorset utilizou uma rede com três transmissores de menor potência que os utilizados em Berlim, cada um fornecendo potência média do sinal digital de aproximadamente 10 W.

A maioria das medidas foi realizada em áreas rurais. Foram testadas diferentes configurações de transmissão, com um, dois ou três transmissores no ar.

Para um único transmissor operando, o modo A apresentou maior área de cobertura (de 2 a 4% maior) que o modo B. A provável explicação para isso é que o número de células piloto é proporcionalmente menor no modo A que no B, fazendo com que a relação sinal ruído nas células de dados seja maior no modo A para uma dada SNR do sinal.

Nos testes com dois e três transmissores, não foi observado nenhum efeito na recepção devido à velocidade do veículo, conforme observado no teste de Berlim. Nas



áreas em que houve superposição dos sinais de dois transmissores foi observado um ganho de rede. Uma área que não era bem coberta por apenas um dos transmissores foi bem coberta quando os dois operavam simultaneamente, como mostra a figura abaixo.

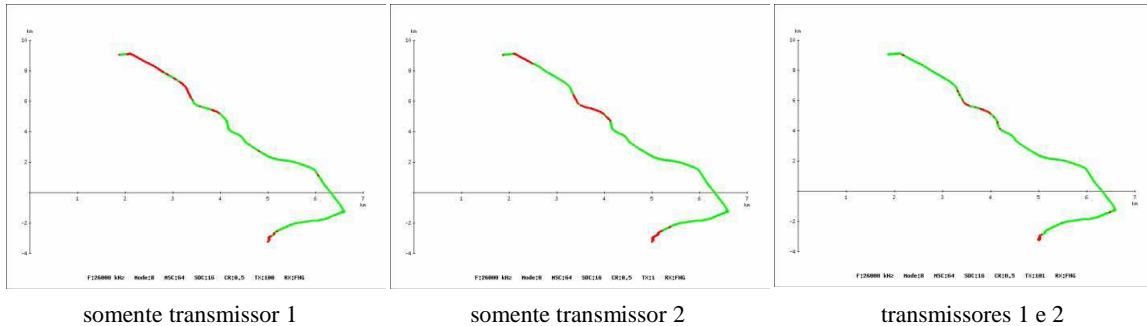


Figura 26. Ganho da rede devido à recepção de sinais de dois transmissores

Os pontos verdes nas figuras indicam boa recepção do sinal. Nesta fase o modo B propiciou melhor desempenho que o modo A, provavelmente por ser mais resistente ao efeito Doppler.

### 3.10.5 Testes de Longo Prazo

Transmissões regulares diárias têm sido feitas desde dezembro de 2001, chegando a 16 *sites* de transmissão em julho de 2003, representando 184 horas de transmissão por dia [11].

Com essa grande quantidade de dados disponíveis para recepção, o processo de recepção foi automatizado. Vários receptores DRM espalhados na Europa gravam automaticamente os dados recebidos e os enviam às centrais de análises de dados a cada 5 minutos. As figuras abaixo mostram o esquema de recepção automática e um dos receptores em detalhe.

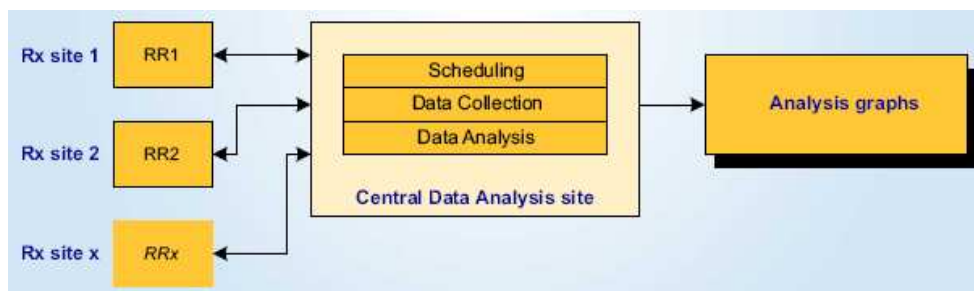


Figura 27. Esquema de recepção automática

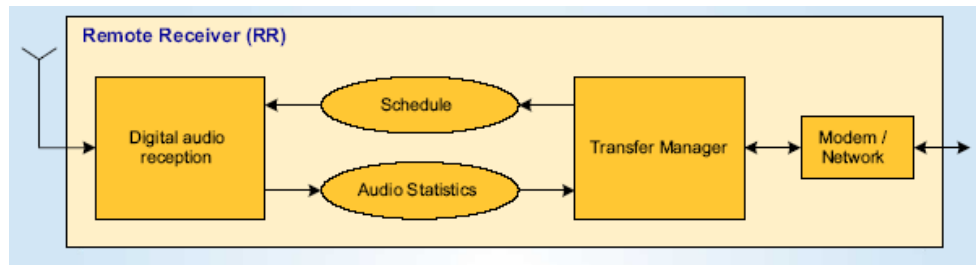


Figura 28. Detalhe de um receptor

### 3.10.6 Conclusões

Os testes mostraram a concordância do espectro do sinal irradiado com a máscara espectral e as relações de proteção recomendadas pela ITU. Foram comprovadas a superioridade da qualidade e da robustez do sinal digital em relação ao analógico, além da área de cobertura do sinal digital ser igual ou maior que a do sinal analógico.

Problemas foram revelados, permitindo o aperfeiçoamento do sistema antes de ser estabelecida sua especificação final. O projeto de receptores também evoluiu devido às falhas observadas durante os testes.

Os testes de campo tiveram contribuição significativa na padronização do sistema DRM nos órgãos IEC (*International Electrotechnical Commission*), ETSI (*European Telecommunications Standards Institute*) e ITU (*International Telecommunication Union*), uma vez que provaram a eficácia do mesmo.



## 4 Sistema de Radiodifusão Digital IBOC AM

O projeto do sistema IBOC surgiu no início da década de 90 com a *USA Digital Radio* (USADR). Em 1997, a empresa *Lucent Technologies* uniu-se a *USA Digital Radio* inspirada nos avanços do projeto ocorridos nos anos anteriores. No entanto, em 1999, as duas empresas separaram-se. Contudo cada uma continuou desenvolvendo seu próprio projeto do sistema IBOC. No mesmo ano, a *Lucent* realizou pesquisas no campo da codificação de áudio e transmissão digital, passando a se chamar *Lucent Digital Radio* (LDR). No ano de 2000, as duas empresas uniram-se novamente para formar, finalmente, a *iBiquity Digital Corporation* [12].

O IBOC AM é um sistema que permitirá aos radiodifusores transmitir o sinal digital junto com o sinal analógico existente, oferecendo a capacidade necessária para uma eventual transição para as transmissões totalmente digitais. Assim, o sistema possui dois modos de operação: o modo híbrido e o totalmente digital, que serão explicados no item 4.2. Este sistema opera nas frequências destinadas à radiodifusão AM (*In Band*) e possibilita aos radiodifusores transmitirem a informação nos canais existentes (*On Channel*).

Testes de campo e de laboratório foram realizados em 2001, nos Estados Unidos, com o objetivo de avaliar o desempenho do sistema IBOC AM. No mesmo ano, foi aprovado pela ITU.

Para implantação deste sistema, deverão ser realizadas alterações nos atuais transmissores. Será necessário adição de um excitador nos transmissores de banda larga, e nas antenas transmissoras será necessário mudanças em seus parâmetros, tais como impedância e VSWR, afim de obter a mesma área de cobertura do atual sistema AM.

Este sistema proporcionará uma melhoria na fidelidade do áudio e na recepção e oferecerá novos serviços de dados, dentre eles:

- MPS (*Main Program Service*) – inclui o MPA (*Main Program Service Áudio*), que é a programação de áudio, e o MPS Data, que oferece informações adicionais sobre a programação de áudio aos ouvintes, tais como, título da música e do álbum, gênero da música, nome do artista, comentários e propagandas [13].



- PDS (*Personal Data Service*) – possibilita aos usuários selecionar a programação desejada, receber automaticamente atualizações sobre a programação e escutá-las quando quiserem. Possibilita, também, criar listas com a programação favorita [13].

- SIS (*Station Identification Service*) – possibilita o controle necessário dos dados e a identificação da estação, que indiretamente faz com que os usuários procurem e selecionem as estações de rádio IBOC digital e seus serviços de suporte [13].

- AAS (*Auxiliary Application Service*) – as principais aplicações auxiliares são os serviços dinâmicos de multimídia. São eles [14]: serviço de informação incluindo notícias (esporte, condições do tempo, tráfego local...) entregues aos receptores no formato de texto ou de áudio; controle do serviço principal de áudio pelos ouvintes, que podem dar pausa, armazenar e rever a programação de áudio; serviço secundário de áudio que transmitido junto com o serviço principal de áudio possibilitará aos ouvintes realizarem play-back de modo fácil e rápido.

Oferecerá, também, aos radiodifusores e aos usuários a oportunidade de mudarem para a radiodifusão digital sem causar distorções nos serviços, mantendo, para as estações já existentes, a mesma frequência. Os usuários que adquirirem receptores digitais poderão receber as emissoras favoritas com qualidade de áudio superior, livre de interferência estática e interferência por multipercurso associadas aos atuais sistemas receptores de rádio analógico.

#### 4.1 Princípio de Funcionamento

O sistema IBOC AM opera nas frequências de onda média. O sinal digital é transmitido no canal em que é transmitido o sinal analógico e nos canais adjacentes, otimizando o uso do espectro.

Os sinais de áudio analógico e digital, juntamente com os dados auxiliares, que são informações de texto, são combinados na etapa 1 da figura abaixo [14].



Em seguida, a parte digital do sinal passa pelo codificador de fonte, codificador de canal e *interleaver* para aumentar a robustez do sistema através de técnicas capazes de regenerar o sinal sem acúmulo de degradação. Isso é feito na etapa 2 da figura 29.

O sistema utiliza ainda a modulação COFDM, que diminui o efeito Doppler e a interferência por multipercurso, etapa 3 da figura 29, e torna possível o uso da rede de frequência única, onde os transmissores irradiam o mesmo sinal na mesma frequência e ao mesmo tempo. Tanto os receptores digitais quanto os analógicos serão capazes de receber o sinal transmitido.



Figura 29. Transmissão do sinal IBOC AM

## 4.2 Modos de Operação

O sistema IBOC AM propõe uma transição flexível do sistema radiodifusor analógico para o sistema radiodifusor digital, proporcionando dois modos de operação: AM híbrido e AM totalmente digital. O AM híbrido transmite o sinal analógico e o sinal digital, enquanto o AM totalmente digital transmite apenas o sinal digital [15].



### 4.2.1 AM Híbrido

Este modo consiste na expansão do uso do espectro de frequências de cada emissora AM. O sinal analógico e o digital compartilham o mesmo canal de 30 kHz. O espectro sinal AM híbrido é mostrado na figura abaixo [15].

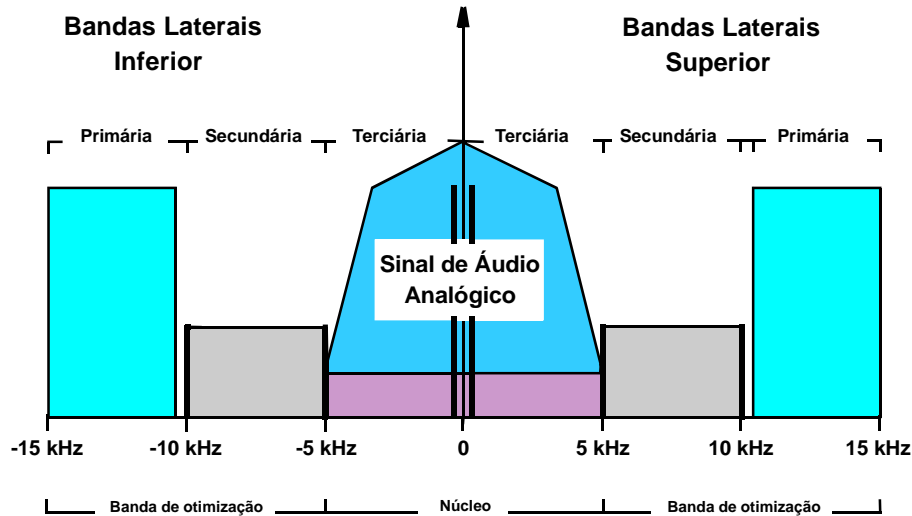


Figura 30. Espectro de frequência do sinal IBOC AM Híbrido

O espectro acima mostra que o sinal digital é dividido em três streams: o núcleo (subportadoras OFDM terciárias) embaixo do sinal AM analógico e dois streams de otimização nas bandas laterais superior e inferior (subportadoras OFDM primárias e secundárias). A portadora analógica funciona como uma referência de fase durante a transição dos sistemas. As subportadoras 1 e -1 correspondem às subportadoras de referência, que transmitem a informação de controle.

Além das subportadoras especificadas, existe uma subportadora entre as bandas laterais primária e secundária (IDS1) e outra entre as bandas secundária e terciária (IDS2). Estas são conhecidas como subportadoras IDS (*IBOC Data System*) e, são usadas em aplicações com baixa taxa de dados e baixo atraso.

Cada símbolo OFDM tem duração de 5,8 ms e cada subportadora ocupa uma faixa de frequência igual a 181,7 Hz [15].

A tabela abaixo mostra o intervalo de subportadoras, o nível de potência, em dB, de cada subportadora relativo à portadora analógica não modulada e o tipo de modulação utilizada, em cada banda lateral.





Tabela 16. Características do espectro de frequências do sinal IBOC AM Híbrido

Banda Lateral	Intervalo de Subportadoras	Potência (dB)	Tipo de Modulação
Primária Superior	57 a 81	-30	64-QAM
Primária Inferior	-57 a -81	-30	64-QAM
Secundária Superior	28 a 52	-43 ou -37	16-QAM
Secundária Inferior	-28 a -52	-43 ou -37	16-QAM
Terciária Superior	2 a 26	-	QPSK
Terciária Inferior	-2 a -26	-	QPSK
Referência Superior	1	-26	BPSK
Referência Inferior	-1	-26	BPSK
IDS1 Superior	27	-43 ou -37	16-QAM
IDS2 Superior	53	-43 ou -37	16-QAM
IDS1 Inferior	-27	-43 ou -37	16-QAM
IDS2 Inferior	-53	-43 ou -37	16-QAM

A tabela acima mostra que neste modo de operação são transmitidas, no total, 156 subportadoras digitais. Os intervalos de subportadoras de 54 a 56 e -54 a -56 não são transmitidos para evitar interferência no primeiro canal adjacente.

A taxa de transmissão do modo de operação AM Híbrido pode ser gerenciada pelo radiodifusor, contento as seguintes configurações [16]:

- 36 kbps de áudio, sem transmissão de dados;
- 32 kbps de áudio, sendo 4 kbps destinados a transmissão de dados;
- 28 kbps de áudio, sendo 8 kbps destinados a transmissão de dados;
- 24 kbps de áudio, sendo 12 kbps destinados a transmissão de dados;
- 20 kbps de áudio, sendo 16 kbps destinados a transmissão de dados.

Além dos 36 kbps relativos aos serviços de áudio e dados, são transmitidos 0,4 kbps de dados auxiliares destinados ao MPS Data.

#### 4.2.2 IBOC AM Totalmente Digital

Neste modo de operação o sinal analógico existente é substituído pelo sinal digital. O sinal digital passará a ocupar uma largura de banda de 20 kHz, como mostrado na figura abaixo. A potência do sinal digital, em relação ao modo híbrido, é maior, fazendo com que o sinal seja mais robusto a interferência de canal adjacente [15].

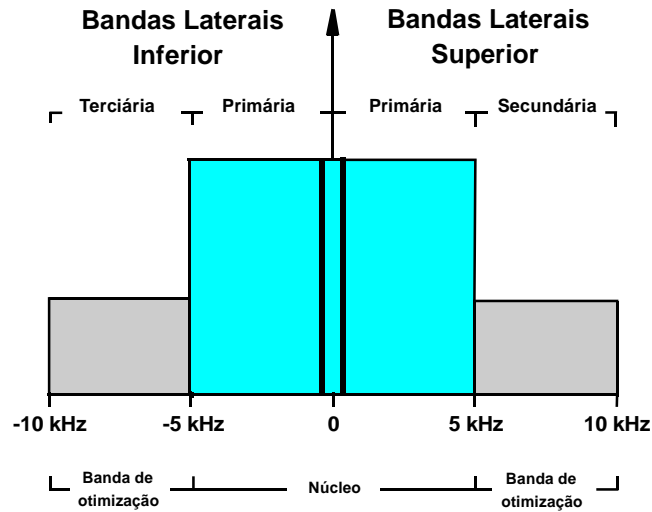


Figura 31. Espectro de frequência do sinal IBOC AM Totalmente Digital

Assim como no modo híbrido, o modo totalmente digital possui três streams: o núcleo e dois streams de otimização nas bandas laterais superior e inferior, onde são transmitidos o conteúdo de áudio e os dados auxiliares. As subportadoras IDS estão localizadas entre o núcleo e as bandas laterais. A duração do símbolo OFDM e a faixa de frequência de cada subportadora são iguais aos valores especificados no modo AM Híbrido.

A tabela abaixo mostra o intervalo de subportadoras, ou seja, o número de subportadoras digitais, o nível de potência, em dB, de cada subportadora relativo à portadora analógica não modulada e o tipo de modulação utilizada, em cada banda lateral.

Tabela 17. Características do espectro de frequência do sinal IBOC AM Totalmente Digital

Banda Lateral	Intervalo de Subportadoras	Potência (dB)	Tipo de Modulação
Primária Superior	2 a 26	-15	64-QAM
Primária Inferior	-2 a -26	-15	64-QAM
Secundária	28 a 52	-30	64-QAM
Terciária	-28 a -52	-30	64-QAM
Referência Superior	1	-15	BPSK
Referência Inferior	-1	-15	BPSK
IDS1	27	-30	16-QAM
IDS2	-27	-30	16-QAM

A tabela acima mostra que neste modo de operação são transmitidas, no total, 104 subportadoras digitais. As bandas laterais secundária e terciária usam metade do número de subportadoras, quando comparadas com o modo híbrido. Isto porque não é mais necessário colocar as subportadoras digitais em quadratura com o sinal analógico, pois a portadora do mesmo está em banda básica, ou seja, não está modulado.



Neste modo, o núcleo proporciona um rendimento na saída de aproximadamente 20 kbps e os streams de otimização proporcionam um rendimento de 40 kbps.

### 4.3 Codificador de Fonte

O codificador de fonte do sistema IBOC AM era o MPEG-2 AAC. No entanto, este não será utilizado na versão final do sistema. A versão final, que será comercializada, utilizará o codificador de fonte que a própria iBiquity está desenvolvendo. Não foi possível realizar o estudo sobre esse item, pois a iBiquity ainda não disponibilizou nenhum documento sobre este novo codificador de fonte. Apenas, sabe-se, que se chamará HDC.

### 4.4 Codificador do Canal

Pelo mesmo motivo do item anterior, não foi possível realizar o estudo sobre o codificador de canal.

### 4.5 *Interleaving*

A técnica de *interleaving* é configurada pelos modos de serviços, explicados no subitem 4.7.2, no interior da camada física.

São utilizados os *interleaving* curto, que possibilita a aquisição rápida do sinal de áudio digital, e o *interleaving* longo nos canais lógicos.

Este sistema utiliza o *interleaving* em blocos. Assim, o *interleaver* apresenta o formato de uma matriz. Cada matriz consiste na informação de todos ou de parte dos canais lógicos e está associada a uma porção específica do espectro transmitido.

Os fundamentos da técnica de *interleaving* estão explicados no anexo 3.

### 4.6 Mapeamento de Constelações

O sistema IBOC AM usa as constelações QAM (16-QAM e 64-QAM) e PSK (BPSK e QPSK), como detalhado nas tabelas 16 e 17. Estas constelações são utilizadas para obter eficiência na largura de faixa, possibilitando as transmissões com qualidade de áudio próxima do FM estéreo, e para proporcionar a área de cobertura adequada.



Todo o processo mapeamento de constelação é realizado no interior da camada física.

Os fundamentos básicos dessas modulações estão explicados no anexo 2.

#### 4.7 Detalhamento Das Camadas de Funcionamento do IBOC AM

A estrutura do sistema IBOC AM está organizada com base no modelo de camadas ISO OSI (*International Standards Organization Open Systems Interconnection*), como mostra a figura abaixo.

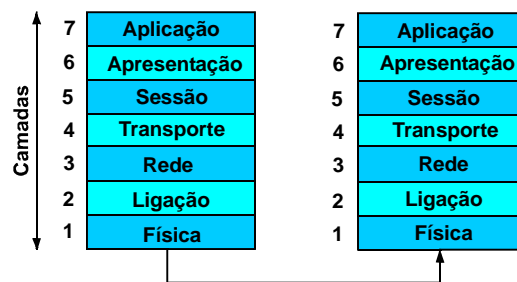


Figura 32. Estrutura das camadas do modelo ISO OSI

Cada camada OSI do sistema de radiodifusão possui uma camada correspondente no sistema receptor [17]. A funcionalidade das camadas pode ser visualizada na tabela abaixo.

Tabela 18. Função de camada utilizada no sistema IBOC AM

Camadas	Função
Física	Responsável pela transmissão das informações (bits) e pelo controle de erros – Modem, <i>Interleaving</i> , FEC.
Ligação	Responsável pelo roteamento dos frames da camada 1 até a 4
Rede	Está camada não é utilizada pelo sistema IBOC
Transporte	Responsável pela entrega de dados de maneira confiável, em um determinado formato, tais como: áudio digital, textos.
Sessão	Está camada não é utilizada pelo sistema IBOC.
Apresentação	Oferece à camada de aplicação um conjunto de serviços de estruturação e formatação de dados que preservam o conteúdo das informações. Imagem, áudio e textos.
Aplicação	Proporciona informações para o usuário via interface homem-máquina: áudio, processamento de áudio; texto, processamento em display; vídeo, apresentação de imagens em vídeo; etc.



As camadas de rede e sessão não são utilizadas, pois o sistema IBOC AM não faz uso de protocolos IP e nem trocas de informações, sendo o canal unidirecional.

Este trabalho apenas dará atenção à descrição da camada física por ser a de maior interesse.

#### 4.7.1 Estrutura da camada física

A camada física é responsável pelo processo de conversão da informação e de controle, proveniente da camada de ligação, do sinal IBOC AM, a partir da aplicação da codificação de fonte do símbolo OFDM. A informação e o controle são transportados em frames discretos dos canais lógicos por meio do *service access point* (SAP). Os frames de transporte são denominados *service data units* (SDUs).

O tamanho e o formato dos SDUs dependem do modo de serviço selecionado. O modo de serviço é o componente principal do sistema de controle, que determina as características de transmissão de cada canal lógico.

A figura abaixo mostra os componentes funcionais da camada física [17].

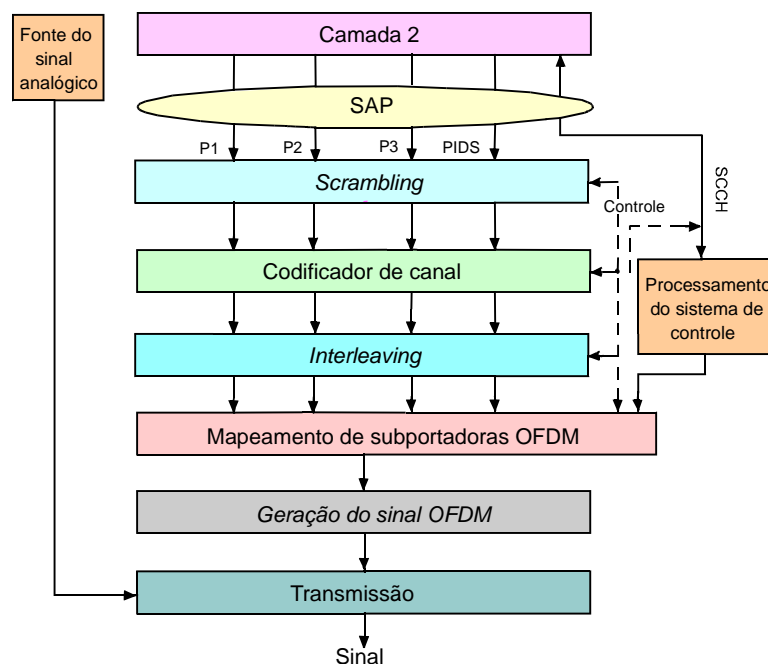


Figura 33. Estrutura da camada física

Scrambling: embaralha os dados carregados em cada canal lógico para reduzir a regularidade do sinal.



Codificador de canal: é responsável pela codificação da informação e introdução de bits para correção de erros.

Interleaving: é responsável pelo embaralhamento dos bits de acordo com um mapeamento pré-determinado, reduzindo os erros em rajada.

Processamento de controle do sistema: controla as seqüências de dados provenientes da camada 2, como modo de serviço e opções de configuração. Esta informação é usada no receptor para determinar o processamento do sinal IBOC AM.

Mapeamento das subportadoras OFDM: as subportadoras OFDM são mapeadas de acordo com uma matriz pré-determinada, representando, assim, o sinal no domínio da frequência.

Geração do sinal OFDM: é responsável pela geração da porção digital dos espectros de frequência das figuras 30 e 31. O princípio de funcionamento da modulação COFDM encontra-se no anexo 4.

Transmissão: formata a forma de onda banda básica para a mesma ser transmitida em um canal de onda média, ou seja, é responsável pela modulação do áudio analógico e pela combinação deste com o sinal digital.

#### **4.7.2 Modos de Serviço**

O sistema IBOC AM proporciona quatro modos de serviço, que são: MA1, MA2, MA3 e MA4 [15].

Os modos de serviços MA1 e MA2 são utilizados no modo de operação híbrido, enquanto os modos de serviços MA3 e MA4 são usados no modo de operação totalmente digital. MA2 e MA4 apresentam maior taxa de transmissão e menor robustez que os modos MA1 e MA3, respectivamente.

Os radiodifusores têm a opção de configurar os modos de operação MA1 e MA2 de forma a obter o controle do nível de potência e da largura de faixa de áudio analógico. Quanto mais elevado for o nível de potência maior será a robustez do sinal digital. No entanto, haverá uma diminuição na compatibilidade entre certas classes de rádio analógico existentes. O controle da faixa de áudio permite que o áudio analógico seja transmitido utilizando uma largura de faixa de 5 kHz ou de 8 kHz. Se a largura de faixa usada para



transmissão for de 8 kHz, a robustez do sinal digital diminuirá na presença da interferência devido ao segundo canal adjacente.

A fim de proporcionar robustez durante a recepção, o sistema IBOC aplicada a técnica de diversidade no tempo entre os sinais de áudio analógico e digital, conhecida como *blending*. Assim, o *blending* possibilita uma transição suave do sinal digital para o analógico quando o sinal digital for corrompido.

### 4.7.3 Canais lógicos

Canal lógico é um sinal que transporta dados pela camada física, determinado pelo modo de serviço. A interface da camada física proporciona quatro canais lógicos para as camadas superiores do protocolo: P1, P2, P3 e PIDS. P1, P2 e P3 são encarregados do transporte de áudio e dados, enquanto o canal PIDS é designado para transportar os serviços de informações de dados (IDS – *Information Data Service*) [15].

Os canais lógicos P1 e P2 são mais robustos que o canal P3. Os canais P1 e P3 estão disponíveis para todos os modos de serviços, enquanto P2 apenas está disponível para os modos MA2 e MA4.

A performance de cada canal lógico depende de três parâmetros de caracterização: taxa de transmissão; atraso (tempo gasto no processo de *interleaving*) e robustez (o nível de robustez decresce de 1 até 10). Esses parâmetros são determinados de acordo com a taxa de codificação, profundidade do *interleaving*, diversidade no tempo e mapeamento das constelações.

As tabelas abaixo mostram os parâmetros de caracterização de cada canal lógico de acordo com o modo de serviço selecionado.

**Tabela 19.** Taxa de informação de cada canal lógico

Modo de Serviço	Taxa de Informação do canal em kbps				Modo de Operação
	P1	P2	P3	PIDS	
MA1	20	0	16	0,4	Híbrido
MA2	20	20	16	0,4	Híbrido
MA3	20	0	20	0,4	Totalmente Digital
MA4	20	20	20	0,4	Totalmente Digital

**Tabela 20.** Atraso de cada canal lógico

Modo de Serviço	Atraso (sec.)				Modo de Operação
	P1	P2	P3	PIDS	



MA1	5,94	- - -	1,49	0,19	Híbrido
MA2	5,94	1,49	1,49	0,19	Híbrido
MA3	5,94	- - -	1,49	0,19	Totalmente Digital
MA4	5,94	1,49	1,49	0,19	Totalmente Digital

Tabela 21. Robustez de cada canal lógico

Modo de Serviço	Robustez				Modo de Operação
	P1	P2	P3	PIDS	
MA1	6	- - -	7 ou 10	4 ou 8	Híbrido
MA2	9	9	7 ou 10	4 ou 8	Híbrido
MA3	1	- - -	5	3	Totalmente Digital
MA4	2	2	5	3	Totalmente Digital

Os canais lógicos são alocados em bandas de frequência diferentes de acordo com o modo de serviço selecionado [15]:

#### MA1:

Neste modo de serviço, o canal lógico P1 é transmitido nas bandas laterais primária inferior e superior. Assim, este transmite informação redundante que utiliza o *interleaving* curto para que o áudio digital seja adquirido rapidamente.

O canal lógico P3 é transmitido nas bandas secundárias e terciárias. Como este canal é menos robusto que o canal P1, o sinal estéreo é transmitido nele.

A figura abaixo ilustra a posição dos canais lógicos no modo MA1:

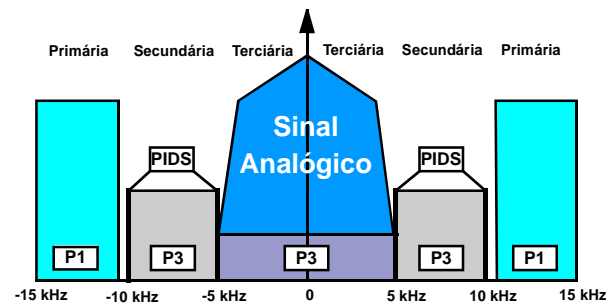


Figura 34. Posição dos canais lógicos no modo de serviço MA1

#### MA2:

Neste modo de serviço, é inserido o canal lógico P2 em substituição ao canal lógico P1 da banda primária superior do modo MA1. Desta forma, não é transmitida informação redundante. Assim, a robustez deste modo é menor, diminuindo a área de cobertura quando comparado com o modo MA1.

Os canais P1 e P2 utilizam o *interleaving* longo, fazendo com que o tempo de aquisição do sinal de áudio seja maior que o tempo do modo MA1.





A figura abaixo ilustra a posição dos canais lógicos no modo MA2:

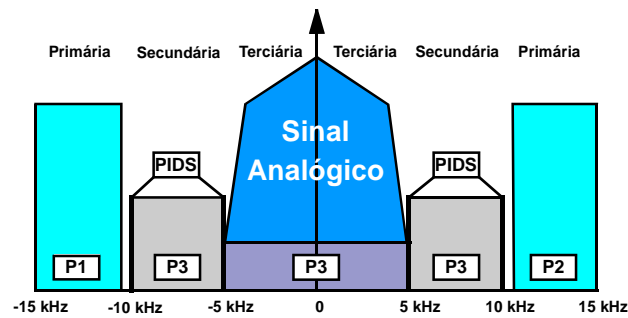


Figura 35. Posição dos canais lógicos no modo de serviço MA2

#### MA3 e MA4:

Estes modos equivalem aos modos MA1 e MA2, respectivamente, nas transmissões totalmente digitais. No modo MA3, o canal lógico P1 está alocado nas bandas primárias, enquanto o canal lógico P3 está alocado nas bandas secundária e terciária. A figura abaixo ilustra a posição dos canais lógicos no modo MA3:

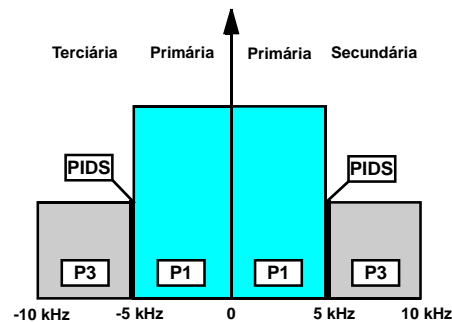


Figura 36. Posição dos canais lógicos no modo de serviço MA3

No modo MA4, o canal lógico P1, do modo MA3, está localizado na banda primária superior é substituído pelo P2. A figura abaixo ilustra a posição dos canais lógicos no modo MA4:

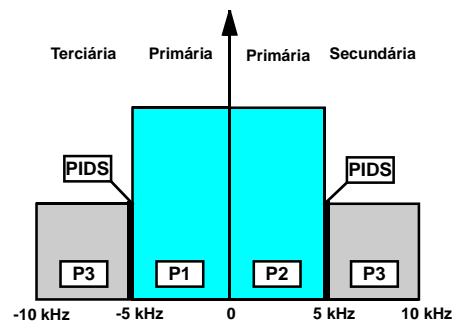


Figura 37. Posição dos canais lógicos no modo de serviço MA4



A existência de diferentes modos de serviço e canais lógicos reflete a flexibilidade do sistema IBOC AM em transmitir simultaneamente áudio digital e dados [17].

#### 4.8 Alterações nos Atuais Transmissores para Implantação do IBOC AM

Os atuais transmissores de radiodifusão AM devem ser de banda larga e apresentar mínima distorção na fase para poderem operar no sistema IBOC AM. Como a portadora central funciona como um sinal de referência de fase, o conjunto de atrasos no transmissor pode ser crítico e ensaios no áudio do transmissor AM deverão ser realizados para indicar a melhor largura de faixa a ser utilizada. Os atuais transmissores poderão apresentar problemas durante a transição para o sistema IBOC AM se as medidas de resposta em frequência desviarem para níveis indesejados, ou seja, frequências mais altas [18].

Desta forma, os atuais transmissores não apresentam a linearidade suficiente para operarem no sistema radiodifusor digital, sendo necessária a implantação de um excitador, como mostrado na figura abaixo, e de um amplificador, em alguns casos, na entrada do transmissor AM, fazendo com que tal transição analógico/digital seja possível [18].

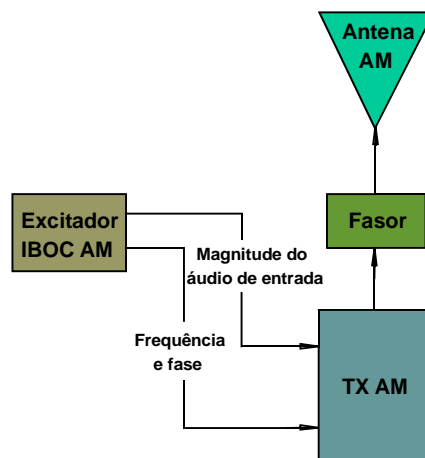




Figura 38. Implementação do transmissor IBOC AM

O excitador é um aparelho cuja função básica é oferecer melhorias na performance, no funcionamento e durante a transição do sinal AM analógico para o sinal IBOC AM, sendo responsável pela modulação da fase da portadora AM e combinação do sinal de áudio analógico com o digital. Este aparelho é composto pelos seguintes elementos [19]:

- Cartões de áudio: são dois cartões, um para o áudio analógico e outro para o áudio digital, que são conectados ao Audio I/O (*In/Out*). Estes cartões são sincronizados com taxa de 44,1 kHz. O áudio digital é processado e modulado na placa mãe e o áudio analógico é inserido em um circuito de atraso e convertido em sinais banda básica I (em fase) e Q (em quadratura) antes de serem inseridos no *upconverter* digital.
- *Upconverter* digital: recebe a informação complexa, I e Q, e a informação de magnitude em banda básica da barra de controle da placa mãe. Os sinais I e Q são convertidos em componentes de sinais de magnitude e de fase, respectivamente. Estes sinais são filtrados, amplificados e enviados para o RF I/O.
- RF I/O: conecta as saídas do GPS e do *upconverter* digital no painel da parte de trás do excitador.
- Audio I/O: realiza a amostragem da magnitude do sinal AM analógico e envia a informação para o controlador.
- Controlador: monitora o estado da placa mãe, o valor da tensão da fonte de alimentação, o nível de potência de entrada e saída de RF, os defeitos ocorridos e a geração de alarmes.

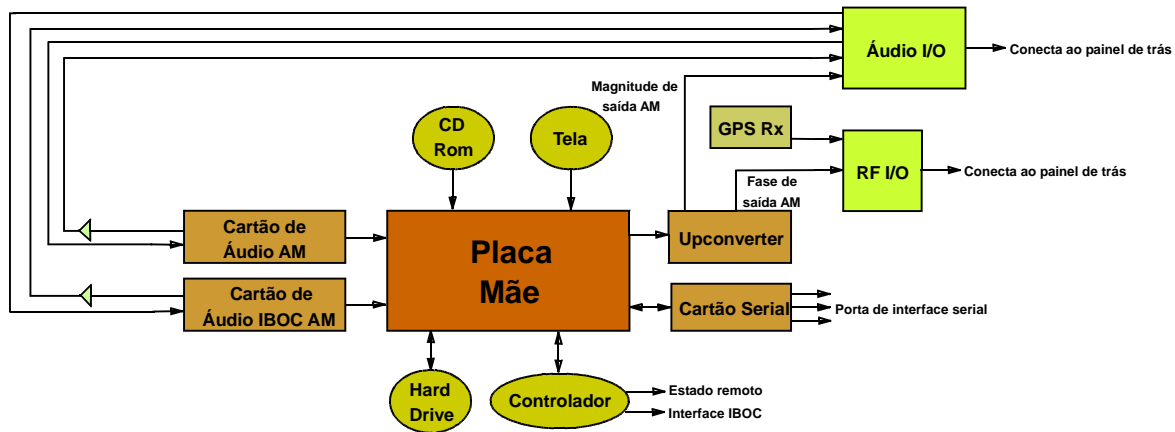


Figura 39. Diagrama de blocos do excitador

O excitador também pode ser utilizado com um aparelho opcional, chamado ePal, que é responsável pela sincronização do áudio em relação a um sinal de referência GPS, pela conversão das taxas de amostragem do sinal para 44,1 kHz, pela geração da diversidade no tempo do sinal de áudio por meio da capacidade de chaveamento, pela distribuição do áudio (separa o áudio digital do analógico e coloca-os em dois caminhos diferentes) e permite a instalação de outro excitador [19].

#### 4.9 Alterações nas Atuais Antenas para Implantação do IBOC AM

Alterações terão de ser realizadas nas antenas de transmissão para implantação do sistema IBOC. Sabe-se, que o sistema de transmissão IBOC requer antenas com desempenho similar ao das antenas de AM. Com a implantação do excitador na entrada do transmissor, os parâmetros do sistema de antenas devem manter o transmissor operando normalmente [18].

O sistema IBOC AM tem realizado testes com diferentes tipos de antenas: onidirecional, diretiva e antenas de fio. Nestes testes verificou-se que não é possível a recepção dos sinais analógico e digital nos nulos do diagrama de irradiação. Contudo, a região de nulos, utilizando antenas diretivas, é bem menor na transmissão digital.

Para que o desempenho na transmissão seja ótimo a impedância característica das antenas usadas pelo sistema IBOC AM deve ter valor próximo de  $50 \Omega$ , as medidas do sistema de antenas devem ser simétricas em torno da frequência central,  $f_c$ , como mostrado na figura abaixo. Desta forma, as bandas laterais devem ser simétricas. A simetria de



amplitude deve apresentar valor próximo de 0,02 dB. Assim, o ajuste apropriado mantém a informação em quadratura e minimiza o efeito da diafonia, que é a interferência entre os canais digital e principal [18]. Os testes realizados pela *Broadcast Eletronics*, BE, mostraram que tanto a VSWR (*Voltage Standing Wave Ratio*) como a orientação da impedância afetam a recepção do sinal, sendo necessário, para uma boa recepção do sinal IBOC, VSWR de 1,4:1, 15 kHz acima e abaixo da frequência da portadora [20].

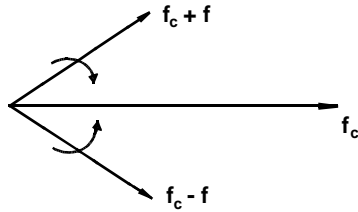


Figura 40. Simetria em torno da frequência central

A tabela abaixo mostra os ajustes necessários nas atuais antenas para implementação do sistema IBOC AM.

Tabela 22. Ajustes necessários nas atuais antenas transmissoras

Ajustes Necessários	
Impedância	Próxima de $50\Omega$
Simetria de Amplitude	Próxima de 0,02 dB
VSWR	1,4 : 1
Medidas do sistema de antenas	Devem ser simétricas em torno de $f_c$

## 4.10 Receptores

Atualmente o sistema IBOC é referido como híbrido. Durante o modo de operação híbrido, os receptores existentes continuarão a receber o sinal analógico, como mostrado na figura abaixo.

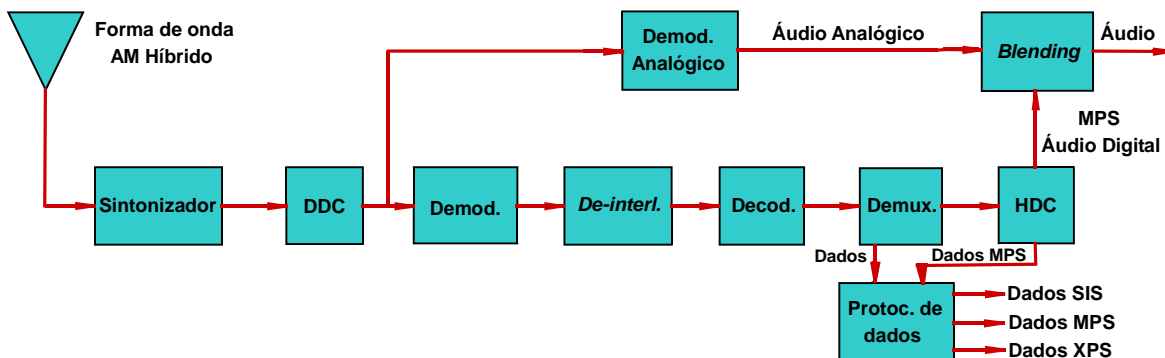




Figura 41. Figura – Diagrama de blocos do receptor

Basicamente, um rádio convencional teria um *downconverter* digital (DDC) inserido antes dos decodificadores analógico e digital. O *blending* é feito para possibilitar uma transição suave entre os sinais digital e analógico quando o sinal digital não puder ser decodificado ou for perdido durante a recepção.

Espera-se que os novos receptores digitais em desenvolvimento incorporem os dois modos de operação, híbrido e totalmente digital.

Os principais fabricantes são: Alpine, Delphi, Harman/Kardon, JVC, Kenwood e Visteon.

#### 4.11 Resultados dos Testes Realizados nos Estados Unidos

Em 2001 foram realizados testes nos laboratórios da NRSC (*National Radio System Committee*) e em campo a fim de avaliar o desempenho do sistema IBOC AM e a compatibilidade do mesmo com o atual sistema AM analógico. Os critérios utilizados para avaliação estão mostrados na tabela abaixo [21]. Os testes relacionados à performance do sistema foram conduzidos pela ATTC (*Advanced Television Technology Center*) na Alexandria, Virginia, e os testes de compatibilidade foram conduzidos pela *Xetron Inc.* na cidade de Cincinnati, Ohio.

Tabela 23. Critérios de avaliação

Performance do Sistema IBOC AM	Compatibilidade com o Sinal Analógico
Qualidade do áudio	Impacto no sinal analógico da própria estação
Área de serviço	Impacto no sinal analógico de outras estações
Durabilidade/Robustez	
Capacidade de dados auxiliares	
Comportamento frente à degradação do sinal	
Flexibilidade	
Performance na aquisição do sinal	
Separação estereofônica	

Os testes de campo foram realizados em três estações de rádio comercial e numa estação de caráter experimental. Na realização destes testes foram utilizados os equipamentos da própria iBiquity. A tabela abaixo mostra as características das estações citadas acima [22].



Tabela 24. Características das estações utilizadas nos testes

Estação	Localização	Frequência (kHz)	Classe	Formato	Potência	Potência	Potência
					Analogica Diurna	Analogica Noturna	Digital (kW)
WTOP	Washington, DC	1500	A	Noticiário	50 kW	50 kW	2,9
WWJ	Detroit, MI	950	B	Noticiário	50kW	50kW	2,9
KABL	Oakland, CA	960	B	Programação Adulta	5 kW	5 kW	0,30
WD2XAM	Cincinnati, OH	1660 (diurna)	C	Diversos	10 kW	1 kW	0,58 (d)
		1650 (noturna)					0,058 (n)

Nos testes foram feitos dois tipos de medições: a objetiva e a subjetiva. A medição objetiva consiste na obtenção dos valores referente à potência do sinal e à relação sinal-ruído ou taxa de erro. Já a medição subjetiva é basicamente um teste de opinião pública, denominado de ACRM (*Absolute Category Rating Mean opinion score*), onde as pessoas participantes, que possuem elevada capacidade de diferenciar a qualidade de áudio, escutam várias amostras de áudio (AM, IBOC AM e FM estéreo) e as classificam dentro de 5 categorias (5-Excelente, 4-Bom, 3-Regular, 2-Fraco, 1-Ruim), levando em consideração as interferências presentes [21].

Todos os testes foram realizados utilizando a versão do sistema IBOC AM implementada com o MPEG-2 AAC, apesar de que a versão final do sistema irá utilizar outra tecnologia de codificação de áudio, denominada HDC.

Não foram realizados testes para o modo de operação totalmente digital.

Os resultados dos testes de desempenho encontram-se abaixo:

#### Qualidade de Áudio

Os testes mostraram que uma das vantagens do sistema IBOC AM é melhorar a qualidade de áudio, que será igual ou próxima à qualidade de áudio do FM estéreo, como mostra o resultado das medições subjetivas na tabela abaixo [22]:

Tabela 25. Comparação entre o sinal de áudio IBOC AM e FM estéreo

Tipo de Programa	Sinal IBOC AM	Sinal FM estéreo
Clássico	4,7	4,6
Rock	4,5	4,7
Voz	4,0	4,8
Voiceover	3,9	3,9



### Área de Serviço

Foram realizados testes de campo para medir a área de cobertura do sistema digital, que mostraram que este proporciona uma extensa área de cobertura. Os testes mostraram que, mesmo operando com 5% da potência do sinal analógico, o sistema IBOC AM é capaz de oferecer área de cobertura até o contorno de 2 mV/m durante o dia. Em algumas áreas, essa cobertura estendia-se até o contorno de 1 mV/m.

Já a cobertura noturna é mais limitada, devido aos elevados níveis de interferência na faixa de AM, e o serviço de rádio digital é recebido com boa qualidade até o contorno de 10 mV/m. Em algumas áreas, essa cobertura estendeu-se até o contorno de 5 mV/m. Contudo, a área de cobertura noturna melhorará significativamente com a implementação do modo de operação totalmente digital [22].

Os testes mostraram que a área de cobertura oferecida pelo sistema IBOC AM nunca será menor que a do atual sistema AM analógico.

### Durabilidade/Robustez

Esses testes tiveram como objetivo examinar o impacto de diferentes tipos de interferências na área de cobertura do sistema IBOC AM, dando especial atenção às interferências de co-canal e canal adjacente e às imperfeições do canal. Para tal, adicionou-se interferências e imperfeições nos sinais analógico e digital [22].

Os testes mostraram que o sistema IBOC AM apresenta elevada resistência a interferência co-canal, como mostrado na tabela abaixo, que apresenta o resultado das medições subjetivas.

**Tabela 26.** Resultado dos testes de laboratório com interferência co-canal

<b>Receptores</b>	<b>Núcleo</b>	<b>Banda de otimização</b>
IBOC AM	4,3	4,4
Pioneer	2,4	2,6
Technics	2,5	2,7

As tabelas abaixo ilustram os resultados dos testes referentes às interferências de 1º (simples e duplo), 2º e 3º canal adjacente. Estes testes foram realizados com quatro





receptores de diferentes marcas (Pioneer, Technics, Delphi e Sony), além do receptor IBOC AM.

Os testes de 1º canal adjacente, tabela 26, mostraram que a robustez do sistema digital é moderadamente superior à do atual sistema AM. Os testes de 2º canal adjacente, tabela 27, de modo geral, mostraram que o sistema IBOC AM é significativamente mais robusto a este tipo de interferência que o sistema AM analógico. Por fim, a partir dos resultados dos testes de 3º canal adjacente, tabela 28, foi possível concluir que o sistema digital é extremamente robusto a este tipo de interferência.

**Tabela 27.** Resultado dos testes de laboratório com interferência no 1º canal adjacente

Receptores	Interf. de 1º canal adjacente simples		Interf. de 1º canal adjacente dupla
	Núcleo	Banda de otimização	Núcleo
IBOC AM	3,6	3,5	3,7
Pioneer	1,0	2,4	2,6
Technics	1,0	2,3	2,4
Delphi	1,0	2,6	2,6
Sony	1,5	2,4	1,8

**Tabela 28.** Resultado dos testes de laboratório com interferência no 2º canal adjacente

Receptores	Núcleo	Banda de otimização
IBOC AM	3,7	4,1
Sony	1,5	2,5
Pioneer	Falhou	1,7

**Tabela 29.** Resultado dos testes de laboratório com interferência no 3º canal adjacente

Tipo de Programa	Núcleo (-43 dB D/U)		Banda de otimização (-37 dB D/U)	
	IBOC AM	Portátil analógico	IBOC AM	Portátil analógico
Clássico	4,2	Falhou	4,2	1,3
Rock	4,4	Falhou	4,5	1,7
Voz	2,8	Falhou	4,3	1,2
Voiceover	2,7	Falhou	2,3	1,2

Já os testes referentes às imperfeições do canal, tabela abaixo, mostraram que o sistema IBOC AM apresenta elevada resistência ao ruído e que sua performance é melhor que a do sistema analógico para três diferentes níveis de ruído testados.



Tabela 30. Resultado dos testes de laboratório referentes às imperfeições do canal

Receptores	Nível de Ruído (Hz)					
	Núcleo			Banda de otimização		
	120	510	1800	120	510	1800
IBOC AM	3,4	3,5	3,4	4,2	4,3	4,1
Delphi	2,0	2,3	2,3	2,7	2,9	2,6
Sony	1,7	2,0	2,1	2,4	2,6	2,3

De modo geral, o sistema IBOC AM proporcionará uma melhora significativa na robustez quando comparado ao atual sistema AM, mesmo operando com nível de potência mais baixo.

#### Capacidade de Dados Auxiliares

O sistema IBOC AM apresenta capacidade para transmissão de dados auxiliares com taxa mínima de 0,4 kbps. Como esta capacidade é uma característica deste sistema, nenhum teste foi realizado neste sentido, pois o sistema AM analógico não suporta a transmissão de dados auxiliares [21].

#### Comportamento frente à Degradação do Sinal

Quando não é possível a recepção do sinal digital, o sistema IBOC AM oferece a opção de transição para o sinal analógico, através do *blending*, fazendo com que se tenha pouca ou nenhuma perda durante a recepção. Desta forma, o sistema IBOC AM apresenta qualidade de áudio superior ou similar ao áudio analógico [21].

#### Flexibilidade

O sistema IBOC AM possui características que oferecem flexibilidade tanto para os radiodifusores como para os fabricantes, que podem oferecer serviços e equipamentos que atendam melhor às expectativas dos ouvintes, bem como garantir melhorias na performance do sistema no futuro.

Dentre essas características, pode-se citar: o modo de operação, a taxa de codificação de áudio, a taxa de transmissão dos dados auxiliares e a possibilidade de utilização de SFN. No entanto, nenhum teste relacionado a estas características foi realizado [21].



### Performance na Aquisição do Sinal

Quando o receptor é ligado, o mesmo demodula o sinal analógico da estação sintonizada, utilizando a porção analógica do sinal IBOC AM Híbrido. Depois de 300 ms (tempo de aquisição medido nos testes), o sinal digital é totalmente identificado pelo receptor, que realiza o *blending* para o sinal digital. Assim, a performance na aquisição do sinal do receptor IBOC AM é similar à do rádio analógico [21].

### Separação Estereofônica

A separação estereofônica é definida como a relação entre as saídas dos canais estéreos (direito e esquerdo), quando aplicada uma entrada em apenas um dos canais.

O sistema IBOC AM oferece aos ouvintes dois canais estéreos. O áudio estéreo é suportado pela banda de otimização do sistema IBOC AM, de forma que quando os 36 kbps de áudio digital são recebidos, o áudio estéreo estará disponível. Sob condições de degradação, o áudio monofônico estará disponível.

Os testes indicaram que quando o receptor IBOC AM está operando no modo estéreo num canal AWGN (*Additive White Gaussian Noise*), este oferece uma boa separação estereofônica [21].

### Impacto no sinal analógico da própria estação

Os testes de compatibilidade confirmaram que a introdução do sinal IBOC AM não causa interferência prejudicial no sistema analógico da estação. Em muitos casos, a introdução do sinal IBOC AM não teve impacto notável sobre o sinal analógico.

O resultado dos testes subjetivos mostrado abaixo concluiu que há pouca ou nenhuma mudança no áudio do sinal analógico devido à introdução do sinal digital [22].

**Tabela 31.** Resultado dos testes de compatibilidade

Receptores	Sem Sinal IBOC	Com Sinal IBOC
Delphi	4,1	4,0
Pioneer	4,2	3,5
Sony	4,2	2,0
Technics	3,1	2,7

### Impacto no sinal analógico de outras estações



Os testes de compatibilidade realizados pelo ATTC verificaram a performance do sinal analógico desejado quando da inclusão de uma estação transmitindo sinal IBOC AM em modo Híbrido em canais adjacentes. A relação entre o sinal desejado e o indesejado é representada por D/U (*Desired/Undesired*).

- Compatibilidade entre co-canais

A compatibilidade entre co-canais não foi testada, pois a introdução do sinal IBOC AM em modo híbrido não deverá causar interferência adicional na recepção AM. Isto porque o nível de potência da parte analógica do sinal IBOC interferente é significativamente maior que o nível de potência das subportadora digitais e a parte analógica do sinal interferido, freqüentemente, coincide com a parte analógica do sinal desejado [21].

- Compatibilidade com 1º canal adjacente

Testes de laboratório e de campo demonstraram que a introdução do sinal IBOC não causará impacto prejudicial no 1º canal adjacente de outras estações. Os testes de laboratório indicaram que o sinal IBOC causa maior interferência quando a relação sinal desejado (apenas o analógico) e sinal indesejado (sinal IBOC) é aproximadamente de +15 dB. No entanto, os testes de campo, na maioria dos casos, indicaram que a performance do sinal analógico é completamente degradada neste ponto, minimizando, assim, o impacto do sinal IBOC [22].

Os testes de laboratório foram estruturados a fim de avaliar o impacto do sinal IBOC para as seguintes relações D/U: 0 dB, +15 dB e +30 dB. Para a relação D/U igual a 0 dB, a performance do sinal analógico já era tão degradada antes da introdução do sinal IBOC, que a adição do sinal digital não causou impacto significativo. Similarmente, para a relação D/U igual a +30 dB, o impacto da adição do sinal IBOC AM foi mínima, sendo imperceptível pelos ouvintes. Para a relação D/U igual a +15 dB, a performance do sinal analógico foi aceitável, contudo não boa, e deverá sofrer pequeno impacto do sinal IBOC AM, como mostrado na tabela abaixo.

**Tabela 32.** Resultado dos testes de compatibilidade do 1º canal adjacente com +15 dB D/U

Receptores	1º Adjacente Inferior	1º Adjacente Superior
------------	-----------------------	-----------------------



	Sem sinal IBOC	Com sinal IBOC	Sem sinal IBOC	Com sinal IBOC
Delphi	29,2	28,7	29,5	28,4
Pioneer	27,8	27,9	28,8	26,9
Sony	25,5	27,0	29,7	25,7
Technics	27,0	29,2	30,1	26,4

Na maioria dos casos, os testes indicaram que a introdução do sinal IBOC AM não deverá causar impacto nas operações de 1º canal adjacente. Para D/U de 15 dB, os testes mostraram que o impacto do sinal IBOC no analógico não fez com que os ouvintes mudassem a estação de rádio sintonizada [22].

- Compatibilidade com 2º canal adjacente

Foram realizados testes de campo e de laboratório, indicando que a introdução do sinal IBOC AM não causará, na maioria dos casos, impacto no sinal analógico do 2º canal adjacente de outras estações.

O resultado dos testes de campo, realizado para três diferentes relações D/U, +9 ou +10, +16 e +21 dB, está mostrado na tabela abaixo [22].

**Tabela 33.** Resultado dos testes de campo com 2º canal adjacente

Receptores	9-10 dB		16 dB		21 dB	
	Sem Sinal	Com Sinal	Sem Sinal	Com Sinal	Sem Sinal	Com Sinal
	IBOC	IBOC	IBOC	IBOC	IBOC	IBOC
Delphi	2,8	2,7	3,7	3,8	3,1	3,2
Pioneer	2,7	2,8	3,9	3,9	3,2	3,4
Sony	1,7	1,8	2,8	2,2	2,6	2,6
Technics	2,8	2,6	3,5	3,1	2,9	3,0

O resultado dos testes subjetivos de laboratório, realizados para três diferentes relações D/U, 0, +15 e +30 dB, está mostrado na tabela abaixo.

**Tabela 34.** Resultado dos testes de laboratório com 2º canal adjacente

Receptores	0 dB		15 dB		30 dB	
	Sem Sinal	Com Sinal	Sem Sinal	Com Sinal	Sem Sinal	Com Sinal
	IBOC	IBOC	IBOC	IBOC	IBOC	IBOC
Delphi	3,5	3,4	3,6	3,6	3,6	3,6
Pioneer	3,7	2,8	3,6	3,6	3,7	3,8
Sony	3,2	1,5	3,5	2,8	3,9	3,8
Technics	3,7	2,0	3,8	3,4	3,8	3,7

- Compatibilidade com 3º canal adjacente



A introdução do sinal IBOC AM no 3º canal adjacente não degrada a performance do sinal analógico. A tabela abaixo ilustra que não houve impacto nos rádios analógicos mesmo com alto nível de interferência [22].

**Tabela 35.** Resultado dos testes de compatibilidade do 3º canal adjacente com -10 dB D/U

Receptores	1º Adjacente Inferior		1º Adjacente Superior	
	Sem sinal IBOC	Com sinal IBOC	Sem sinal IBOC	Com sinal IBOC
Delphi	45,1	45,1	45,1	45,0
Pioneer	45,4	45,5	45,5	45,4
Sony	40,8	40,7	40,8	40,8
Technics	43,4	42,3	44,7	44,7

#### 4.11.1 Conclusões

Os testes realizados mostraram que o sistema IBOC AM oferece benefícios que não podem ser oferecidos pelo atual sistema AM analógico, por exemplo, a capacidade de transmissão de dados auxiliares, e que o sinal IBOC AM pode ser transmitido com o sinal AM analógico sem causar interferência prejudicial ao último. Foi possível concluir também que a qualidade de áudio do novo sistema é bem melhor que a do atual sistema analógico, sendo equivalente ou próxima à qualidade de áudio do sinal FM estéreo. Esta melhoria na qualidade de áudio se deve à robustez do sistema IBOC AM às interferências co-canal e de canal-adjacente e às imperfeições do canal. Ainda, verificou-se que o novo sistema apresenta uma área de cobertura igual ou maior que a do atual sistema AM analógico.

#### 4.12 Demonstração do Sistema IBOC AM no Brasil

Em março de 2003, foi realizada uma demonstração do sistema IBOC AM em Porto Alegre.

A Rádio Gaúcha, que sediou os testes, possui dois transmissores de 50 kW em paralelo para transmissão do sinal analógico. Para transmissão dos sinais analógico e digital, contudo, foi utilizado apenas um dos transmissores. Para combinação dos sinais, foram utilizados o excitador DEXSTAR e o ePal, mostrados na figura abaixo.



Figura 42. ePal e excitador DEXSTAR

O sinal transmitido ocupou largura de banda de 30 kHz, como esperado. O espectro do sinal transmitido está mostrado abaixo.

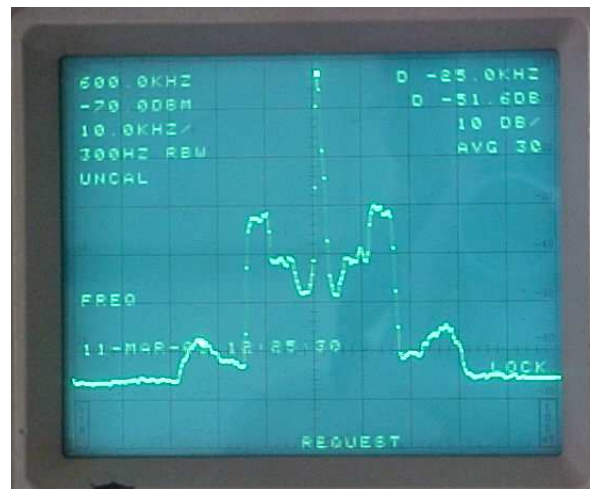


Figura 43. Espectro do sinal transmitido

O sinal digital era monofônico. O sinal analógico foi ajustado para ser 0,9 segundo atrasado em relação ao digital para que, quando ocorresse o *blending*, o ouvinte não percebesse descontinuidade na programação.

A capacidade de dados transmitida foi de 0,4 kbps. Com isso, foram transmitidas as letras RBS, nome do grupo dono da Rádio Gaúcha. A figura abaixo mostra o protótipo de um receptor veicular com os caracteres transmitidos no sinal digital.



Figura 44. Protótipo do receptor IBOC AM

Não foi possível verificar a ocorrência ou não de interferência co-canal e de canal adjacente por não haver emissoras nestes canais em Porto Alegre. Quanto ao sinal analógico da própria Rádio Gaúcha, não foi observada qualquer alteração.





## 5 Requisitos da ITU para os Sistemas DRM e IBOC AM

A tabela abaixo faz uma análise comparativa do atendimento de cada sistema aos requisitos estabelecidos pela ITU [23], onde o grau de importância decresce de “A” até “C”.

**Tabela 36.** Requisitos da ITU para os sistemas DRM e IBOC AM

<b>Requisitos</b>	<b>Importância</b>	<b>DRM</b>	<b>IBOC AM</b>
<i>Requisito padrão do sistema</i>			
Receptor digital deve operar em todo o mundo	A	Sim	Sim
<i>Capacidade de transição gradual do sinal analógico para o digital</i>			
Simulcast (sinais analógico e digital compartilham o mesmo canal)	A	Sim	Sim
Multicast (sinais analógico e digital ocupando canais diferentes)	A	Sim	Sim
<i>Transmissão de dados</i>			
Capacidade de transmissão de dados	B	Sim	Sim
Controle de acesso e embaralhamento	C	Sim	Sim
<i>Requisitos de desempenho do áudio</i>			
Melhora na qualidade de áudio com relação ao sistema analógico	A	Sim	Sim
Transmissão do áudio em diferentes idiomas	B	Sim	Não
Capacidade estereofônica	B	Sim	Sim
Gerenciamento da taxa de bit entre áudio e dados	B	Sim	Sim
<i>Eficiência espectral</i>			
Uso da rede de frequência única	B	Sim	Sim
Largura de faixa e espaçamento entre os canais de acordo com as especificações da ITU	A	Sim	Sim
Interferência potencial no máximo igual a do atual sistema AM analógico	A	Sim	Sim
<i>Confiabilidade no serviço</i>			
Maior confiabilidade na recepção	A	Sim	Sim
Redução da susceptibilidade ao efeito do desvanecimento	A	Sim	Sim
Seleção automática da frequência no receptor	A	Sim	Sim
Recepção veicular, portátil e fixa	A	Sim	Sim
Sintonização rápida	A	Sim	Sim
Degradação suave	B	Sim	Sim
Mesma área de cobertura em relação ao sistema analógico	A	Sim	Sim
Boa recepção <i>in door</i>	A	Sim	Sim
<i>Serviço de Informação para sintonia de emissoras</i>			
Seleção de serviços usando dados relacionados aos programas para escolha da emissora e do tipo de programação	B	Sim	Sim
<i>Considerações sobre o sistema de transmissão</i>			
Uso de transmissores modernos com capacidade para transmissões analógica e digital	A	Sim	Sim
Redução da potência de operação, cobrindo a mesma área de serviço e mesma confiabilidade que o sistema analógico	C	Sim	Sim



Nível de emissões espúrias e fora da banda dentro do estabelecido nas regulamentações da ITU	A	Sim	Sim
<i>Considerações sobre os receptores</i>			
Receptores com baixo custo	A	Sim	Sim
Receptores com baixo consumo de potência	B	Sim	Sim
<i>Gerenciamento dos Parâmetros</i>			
Possibilidade de selecionar os parâmetros do sistema de acordo com as necessidades do radiodifusor	B	Sim	Sim



## 6 Conclusões

Os sistemas de rádio digital DRM e IBOC AM foram desenvolvidos para operar na faixa de frequências inferior a 30 MHz. As principais vantagens inerentes a estes sistemas são: qualidade de áudio do sinal digital superior à do analógico; aumento da eficiência do uso de espectro radioelétrico nos canais destinados à radiodifusão AM analógica, já que o espaçamento entre os sinais digitais pode ser menor que o atualmente estabelecido para os sinais analógicos; transmissão de dados junto com os serviços de áudio, que podem ser gerenciados pelo radiodifusor de acordo com suas necessidades; e redução da potência de transmissão para cobrir mesma área de serviço que o sinal analógico.

As vantagens apresentadas acima são possíveis devido à robustez do sinal digital, que possui maior imunidade a ruído e interferências co-canal e de canal adjacente que o sinal analógico, propiciada pelo uso das técnicas de codificação, correção de erros e modulação COFDM.

Atualmente, existem apenas protótipos dos receptores capazes de decodificar os sinais DRM e IBOC AM. No entanto, os dois sistemas esperam que em 2004 uma grande variedade de receptores de baixo custo seja disponibilizada no mercado.

A realização dos testes foi de suma importância, pois revelaram alguns problemas que permitiram o aperfeiçoamento dos sistemas antes de serem estabelecidas suas especificações finais. Comprovaram, também, a eficácia dos mesmos, contribuindo para a aprovação pelos principais órgãos que regem as telecomunicações.

Diante deste estudo, constatamos que quaisquer dos sistemas, DRM e IBOC AM, poderão vir a ser implantados no Brasil, pois utilizam a mesma faixa de frequências destinadas à radiodifusão AM analógica e permitem uma transição suave do sistema analógico para o digital através da transmissão simultânea dos sinais analógico e digital.

Outro fator determinante na adoção destes sistemas é o aproveitamento de parte dos transmissores atuais, que podem ser adaptados para transmissão do sinal digital, uma vez que os sistemas abordados neste trabalho foram desenvolvidos para garantir a compatibilidade dos transmissores existentes com a modulação digital.



A continuidade deste trabalho consiste na análise destes sistemas no cenário de radiodifusão sonora brasileiro. Isso incluirá a realização de testes para verificar o atendimento às relações de proteção estabelecidas pela ITU e às que serão estabelecidas pela Anatel (Agência Nacional de Telecomunicações) e um estudo minucioso enfocando uma análise comparativa dos parâmetros de cada sistema, tais como: codificação de fonte, codificação de canal, *interleaving*, etc. O objetivo desta análise é dar respaldo técnico ao governo na decisão de qual(is) sistema(s) adotar para renovar o sistema de radiodifusão AM no Brasil.



## 7 Referências Bibliográficas

- [1] Site oficial do DRM: [www.drm.org](http://www.drm.org)
- [2] ETSI: “*Digital Radio Mondiale (DRM): System Specification*”, Versão 1.2.2, abril/2003.
- [3] BRANDENBURG, K., KUNZ, O. e SUGIYAMA, A: “*MPEG-4 Natural Audio Coding*”.
- [4] HOFMANN, Frank, HANSEN, Christian e SCHÄFER, Wolfgang: “*Digital Radio Mondiale (DRM) Digital Sound Broadcasting in the AM Bands*”, setembro/2003.
- [5] MASO, A., TRESTINO, C. e MIAN, G. A.: “*Real Time Implementation of the HVXC MPEG-4 Speech Coder*”, Alemanha, setembro/2002.
- [6] KUNZ, Oliver: “*SBR explained: White paper*”.
- [7] LAGES, Paulo: “*DRM – Digital Radio Mondiale*”, Portugal, 2003.
- [8] Thales Broadcast and Multimedia: “*Skywave 2000 End-to-End LW/MW/SW System for Digital Radio Broadcasting*”.
- [9] Working Party 6E, ITU: “*Planning Parameters for Digital Broadcasting at Frequencies below 30 MHz*”, março/2002.
- [10] Working Party 6E, ITU: “*System for Digital Sound Broadcasting in the Broadcasting Bands below 30 MHz*”, outubro/2000.
- [11] BRIGGS, James: “*DRM – A Summary of the Field Tests*”, 2003.
- [12] FALLER, C., JUANG, B., KROON, P., LOU, H., RAMPRASHAD, S. A. e SUNDBERG, C.: “*Technical Advances in Digital Audio Radio Broadcasting*”, 2002.
- [13] iBiquity Digital Corporation: “*HD Radio™ Air Interface Design Description – Main Program Service Data*”, abril/2003.
- [14] Site oficial da iBiquity: [www.ibiquity.com](http://www.ibiquity.com)
- [15] JOHNSON, Steven A.: “*The Structure and Generation of Robust Waveforms for AM In Band On Channel Digital Broadcasting*”.
- [16] LIEBISH, Gary: “*IBOC System & Implementation*”, março/2003.



- [17] iBiquity Digital Corporation:, “*IBOC AM Transmission Specification*”, novembro/2001.
- [18] DETWEILER, Jeff: “*Conversion Requirements for AM & FM IBOC Transmission*”.
- [19] Harris, DEXSTAR: “*Industry Standard AM or FM IBOC Exciter with Optional e-Pal Switching*”.
- [20] Broadcasting Eletrocnics: “*The Effect of VSWR and Impedance Orientation on IBOC Reception*”.
- [21] DAB Subcomitee: “*Evaluation of iBiquity Digital Corporation IBOC System – Part 2 – AM IBOC*”, abril/2002.
- [22] iBiquity Digital Corporation: “*AM IBOC Laboratory and Field Testing*”, janeiro/2002.
- [23] Working Party 6E, ITU: “*Compliance table of ITU Requirements for DRM and IBOC System*”, março/2002.
- [24] LATHI, B. P.: “*Modern Digital and Analog Communication Systems*”. Oxford University Press, 1998.
- [25] ENE - UnB: “*Curso de Fundamentos de Sistemas de Comunicação*”.
- [26] <http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/toolbox/commblks/usersguide/tutor2-b.shtml>.
- [27] FARIA, Gerard: “*COFDM: An Opportunity to Operate Differently Broadcast Networks?*”, ITIS, França.
- [28] FARIA, Gerard: “*Single Frequency Networks – A Magic Feature of the COFDM*”, ITIS, França.
- [29] ISO/IEC JTC1/SC29/WG11 N4668: “*Overview of the MPEG-4 Standard*”, março/2002.
- [30] PURNHAGEN, Heiko: “*An Overview of MPEG-4 Audio Version 2*”.
- [31] STOTT, Jonathan: “*Digital Radio Mondiale: Key Technical Features*”, fevereiro/2002.



## Anexo 1 – Canalização de Serviços de Radiodifusão Sonora

A figura abaixo mostra as faixas de frequências destinadas aos serviços de onda média (OM), onda tropical – 120 metros (OT) e onda decamétrica (OD), que abrange parte das ondas tropicais e as ondas curtas (OC), e frequência modulada (FM).

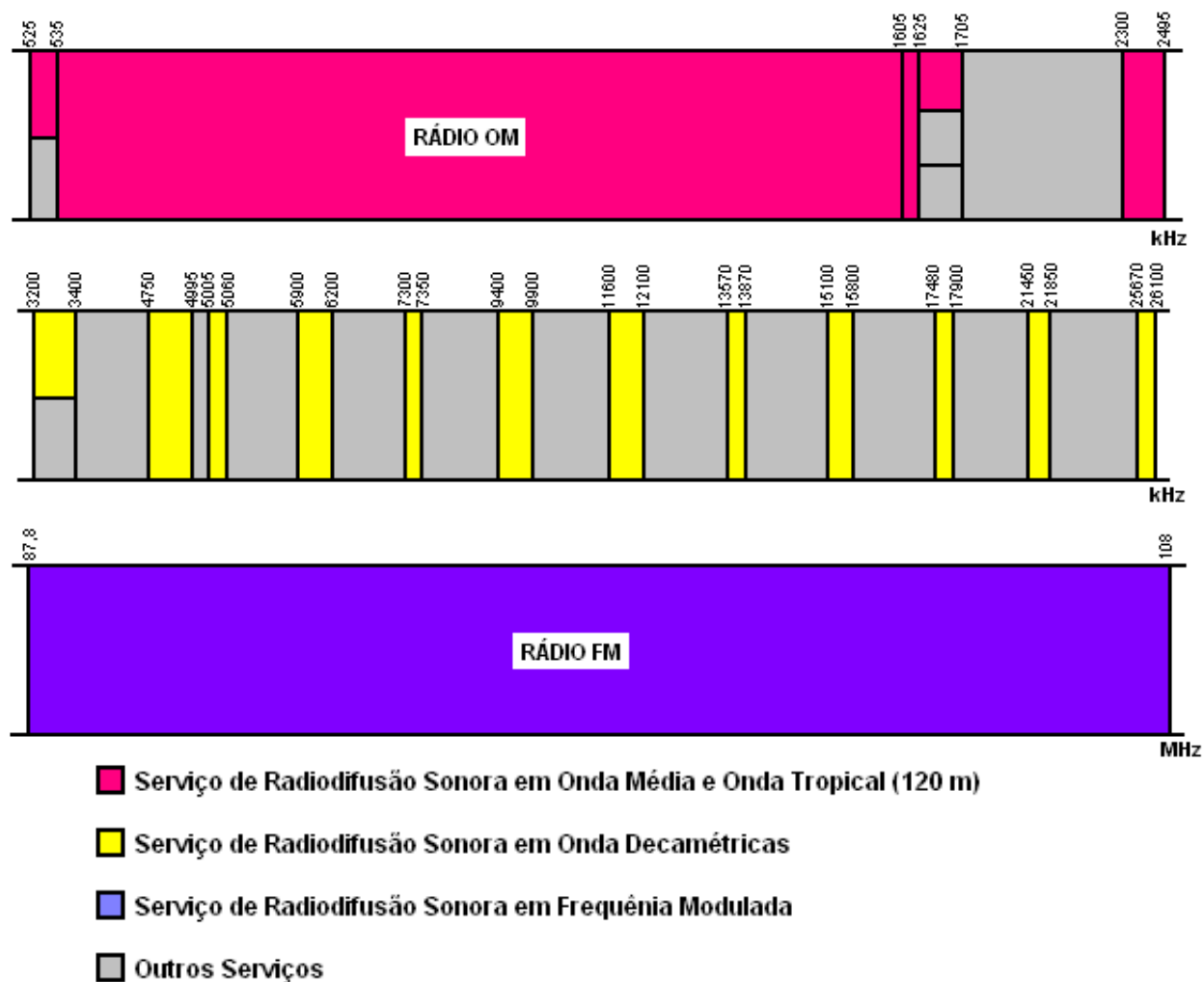


Figura 1. Faixas de frequência dos serviços de radiodifusão sonora



## Anexo 2 – Modulações Digitais

Modulação é o processo pelo qual são modificadas uma ou mais características da onda portadora, segundo um sinal modulante, que é a informação que se deseja transportar pelo meio. A modulação pode ser feita variando amplitude, frequência ou fase da onda portadora, isoladamente ou em conjunto. A informação impõe o modo como vai ser modificada a portadora. Depois, recupera-se a informação digital pelo processo de demodulação.

Os sistemas DRM e IBOC AM utilizam as modulações QAM e PSK.

### A2.1 QAM

A modulação QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*) modifica simultaneamente duas características da portadora: amplitude e fase. A figura abaixo descreve o processo de modulação e de demodulação do sinal QAM.

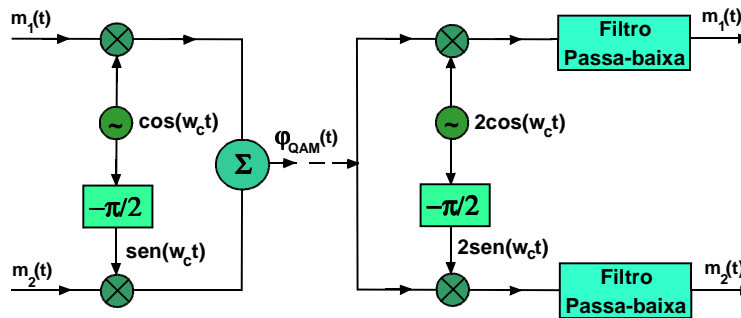


Figura 1. Diagrama de blocos do processo de modulação e demodulação

Este esquema de modulação é usado na transmissão de sinais digitais. Os sinais  $m_1(t)$  e  $m_2(t)$  são seqüências de pulsos polares binários e iguais a  $a_i p(t)$  e  $b_i p(t)$ , respectivamente, onde  $p(t)$  é um pulso banda básica. Estes sinais são modulados por portadoras com a mesma frequência e em quadratura de fase. A equação dos pontos da constelação M-QAM é:

$$\begin{aligned} p_i(t) &= a_i p(t) \cos(w_c t) + b_i p(t) \sin(w_c t) \\ p_i(t) &= r_i p(t) \cos(w_c t - \theta_i) \end{aligned} \quad \text{com } i = 1, 2, \dots, M \quad (1)$$

$$\text{Onde } r_i = \sqrt{a_i^2 + b_i^2}, \quad \theta_i = \tan^{-1} \frac{b_i}{a_i}.$$





A taxa de transmissão aumenta com o aumento de  $M$ , onde  $M = 2^n$  é o número de pontos da constelação M-QAM e  $n$  é o número de bits por símbolo. Supondo  $M = 16$ , cada pulso da equação 1 transmite a informação de  $\log_2 16 = 4$  dígitos binários. Isto pode ser feito da seguinte forma: existem 16 possibilidades de seqüências com 4 dígitos binários e 16 combinações de  $(a_i, b_i)$ , assim cada seqüência de 4 bits é transmitida de acordo com os valores de  $(a_i, b_i)$  ou  $(r_i, \theta_i)$ . A figura abaixo ilustra a constelação para  $M = 16$  [24].

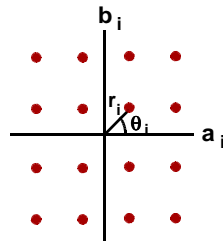


Figura 2. Constelação do 16-QAM

## A2.2 PSK

A modulação PSK (*Phase Shift Keying*) consiste em variar a fase da portadora de acordo com a informação a ser transmitida.

Na modulação PSK binária (BPSK – *Binary Phase Shift Keying*), a fase da portadora senoidal  $s(t)$  é deslocada de  $0^\circ$  ou  $180^\circ$  para representar os dados. Na figura abaixo estão representados o sinal binário e sua representação senoidal [25].

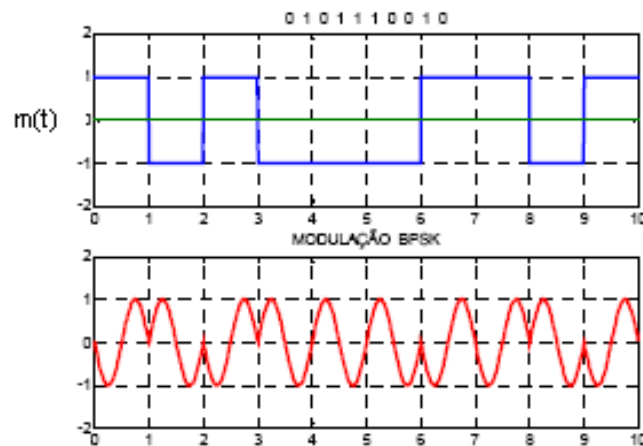


Figura 3. Sinal binário e sua representação senoidal

O sinal BPSK,  $\phi(t)$ , pode ser obtido realizando o produto  $s(t).m(t)$ , onde  $m(t)$  é um sinal banda básica digital polar (figura 3), representado pela seguinte expressão [25]:



$$\phi(t) = \cos(2w_c t + \theta_i) \quad (2)$$

A figura abaixo ilustra a constelação do sinal BPSK.

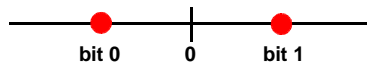


Figura 4. Constelação do sinal BPSK

A modulação QPSK, *Quadrature Phase Shift Keying*, é uma variação do esquema de modulação PSK onde dois sinais BPSK são transmitidos defasados de 180° [25]. Isto duplica a quantidade de informação transmitida. O sinal tem quatro elementos, com fases: 45°, 135°, 225° e 315°, como representado abaixo. Cada elemento representa um par de bits, por exemplo:

$$00 \Leftrightarrow A_c \cos(2w_c t + 45^\circ)$$

$$01 \Leftrightarrow A_c \cos(2w_c t + 135^\circ)$$

$$11 \Leftrightarrow A_c \cos(2w_c t + 225^\circ)$$

$$10 \Leftrightarrow A_c \cos(2w_c t + 315^\circ)$$

A figura abaixo ilustra a constelação do sinal QPSK:

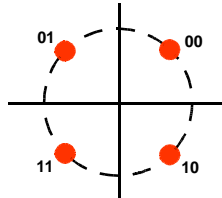


Figura 5. Constelação do sinal QPSK

A largura de banda de transmissão requerida por um sinal PSK é diretamente proporcional à taxa de modulação. No esquema QPSK, a taxa de modulação é a metade da taxa do BPSK. Conseqüentemente, a largura de banda de transmissão requerida por um sinal QPSK é a metade da requerida por um sinal BPSK. Além disso, o desempenho de um sistema QPSK é equivalente ao de um BPSK, ambos transmitindo a mesma potência.

A figura abaixo representa o diagrama de blocos do processo de demodulação do sinal PSK. Para demodular um sinal PSK é preciso usar um detector coerente.

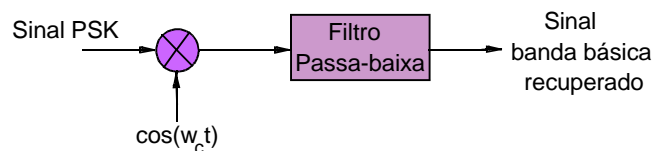


Figura 6. Diagrama de blocos do processo de modulação



## Anexo 3 - Interleaving

*Interleaving* é o embaralhamento de símbolos de acordo com um mapeamento pré-determinado, utilizado para minimizar perdas por erros em bits sucessivos. O *de-interleaving* usa o mapeamento inverso para restaurar a sequência original dos símbolos.

Sistemas digitais aplicam o *interleaving* para melhorar a performance do sistema na presença de imperfeições do canal. Projetistas de sistemas digitais devem manter uma relação entre o comprimento do *interleaver*, quantidade de símbolos embaralhados, e a performance do sistema. *Interleavers* com grande comprimento são desejados para proporcionar robustez na recepção do sinal.

Existem dois tipos de *interleaving*:

### A3.1 *Interleaving* em blocos

O *interleaving* em blocos reagrupa um conjunto de símbolos sem repetir e omitir nenhum dos símbolos. O número de símbolos embaralhados é determinado de acordo com o tamanho do *interleaver*.

O *interleaving* em blocos é efetuado por meio de uma matriz, onde os símbolos são inseridos linha por linha e transmitidos coluna por coluna. Por exemplo, para permutar a sequência de números de 1 até 16 da esquerda para a direita utilizando uma matriz 4 x 4 os números são inseridos linha por linha, obtendo a matriz abaixo.

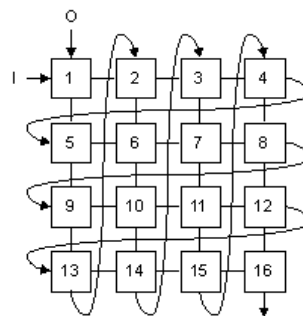


Figura 1 - Exemplo de *interleaving* em blocos

Desta forma, a sequência transmitida seria [1 5 9 13 2 6 10 14 3 7 11 15 4 8 12 16]. Assim, se esses bits forem modificados no canal, ou sofrerem erro em rajada, o



processo de *de-interleaving* no receptor desembaralhará os bits e irá reagrupá-los de forma a evitar que haja erro em dois bits sucessivos.

### A3.2 Interleaving Convolutional

O *interleaving* convolucional permuta os símbolos do sinal de entrada utilizando um conjunto de N registradores de deslocamento, onde N é o número de linhas. Cada registrador de índice k, com k variando de 1 a N, possui um tempo de atraso fixo, equivalente ao número de símbolos (k-1) que cabe no mesmo [26].

A figura abaixo ilustra o processo de *interleaving* e *de-interleaving*.

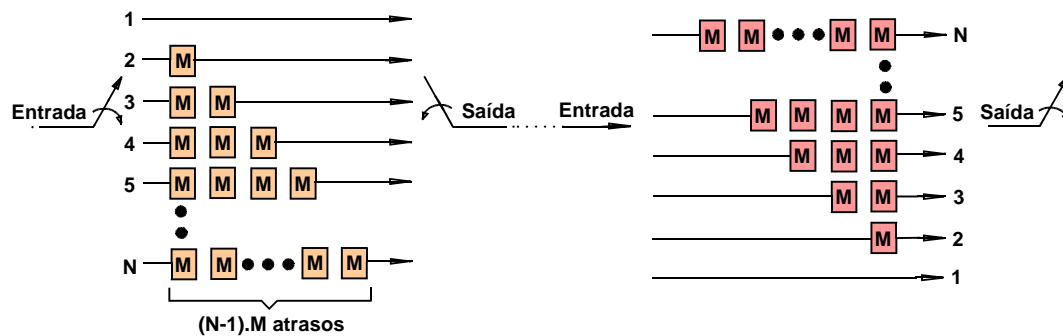


Figura 2 - Conjunto de N registros utilizados no *interleaving* convolucional

Supondo que para realizar o *interleaving* convolucional da sequência de números de 1 até 9 sejam utilizados 3 registradores de deslocamento, a sequência transmitida seria [1 4 2 7 5 3 8 6 9], como mostrado na figura abaixo:

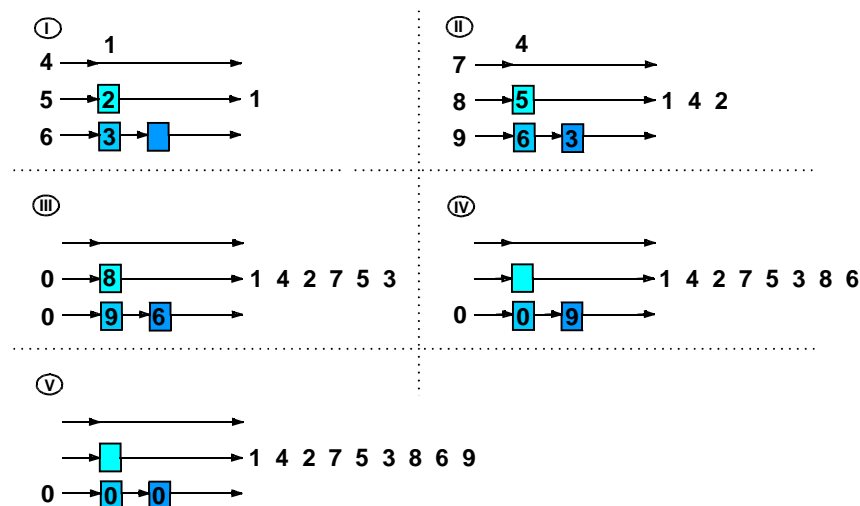


Figura 3 - Exemplo de *interleaving* convolucional



## Anexo 4 - COFDM

Os sistemas DRM e IBOC AM utilizam a modulação COFDM (*Coded Orthogonal Frequency Division Multiplex*), que é um sistema de modulação robusto e eficiente para transporte de dados digitais.

A partir da observação dos canais de propagação terrestre constatou-se que a resposta ao canal é diferente para cada sub-banda de frequência do canal. Então, a modulação COFDM espalha os dados a serem transmitidos sobre um grande número de sub-bandas de frequências com pequeno espaçamento entre elas, o que caracteriza a divisão do canal de transmissão no domínio da frequência. Esta multiplexação por divisão na frequência está representada pelas letras FDM (*Frequency Division Multiplex*) da sigla COFDM.

Os dados são codificados com códigos de proteção antes de serem transmitidos para que o receptor possa reconstruir parte dos dados das sub-bandas alteradas. Daí a letra C (*Coded*) na sigla.

As características do canal de transmissão variam também com o tempo. No entanto, para um pequeno intervalo de tempo, as características do canal são consideradas estáveis. Assim, a modulação COFDM divide o canal de transmissão no domínio do tempo.

A figura abaixo mostra um canal dividido no tempo e na frequência.

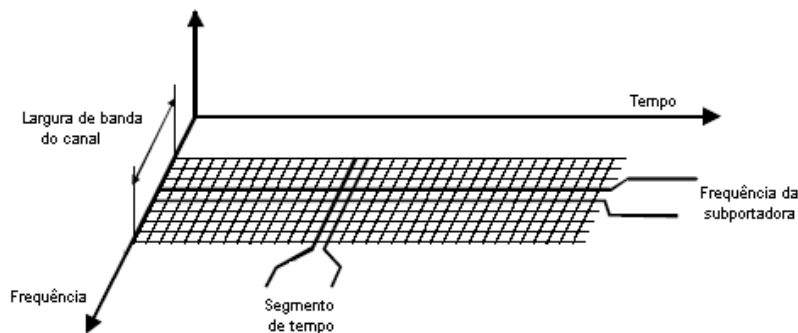


Figura 1 - Divisão do canal no tempo e na frequência

Em cada segmento de tempo, que recebe o nome de símbolo OFDM, existe uma subportadora para cada sub-banda de frequência. Para evitar interferência entre essas subportadoras, elas devem ser ortogonais (O (*Orthogonal*) da sigla), o que implica que o espaçamento entre elas é, no mínimo, igual ao inverso da duração do símbolo. Para evitar



interferência intersimbólica entre o final de um símbolo e o começo do símbolo seguinte, é inserido um intervalo de guarda entre os símbolos, como ilustra a figura abaixo.

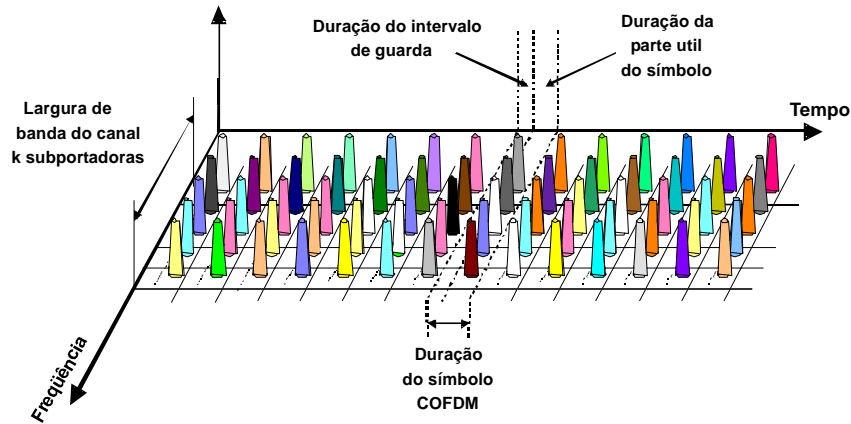


Figura 2 - Inserção do intervalo de guarda

Para demodulação correta do sinal, os receptores devem amostrar o canal nos instantes de tempo correspondentes ao período útil do símbolo OFDM, e não durante o intervalo de guarda. Então, é preciso inserir marcadores de sincronismo no sinal para orientar o receptor [27].

Divisão do canal no domínio do tempo e da frequência, codificação de dados, inserção do intervalo de guarda e inserção de marcadores de sincronismo são as características básicas da modulação COFDM. Apesar de “ocuparem” parte do canal, estas características permitem um equilíbrio entre robustez e capacidade de transmissão do canal.

Para aumentar a robustez da modulação COFDM, é feito *interleaving* na frequência e no tempo, espalhando símbolos OFDM consecutivos. Os sistemas de rádio digital DRM e IBOC AM utilizam as duas técnicas de *interleaving*.

#### A4.1 Rede de Frequência Única

Uma das maiores vantagens da modulação COFDM é sua capacidade de enfrentar com sucesso os ecos, sejam produzidos por reflexões no ambiente (multipercursos) ou por transmissores operando na mesma frequência (interferência co-canal). Os “ecos positivos” (que aumentam a potência do sinal recebido) são aproveitados e os outros são ignorados [28].



O eco deve ser confinado no período do intervalo de guarda. Assim, a parte do sinal recebido formada pela mistura de dois símbolos OFDM será ignorada pelo receptor que, como explicado anteriormente, só amostra o canal na duração da parte útil do símbolo.

Se os transmissores irradiarem o mesmo símbolo no mesmo instante de tempo, ou com intervalo muito pequeno (de  $\mu\text{s}$ ), o atraso correspondente aos diferentes percursos de propagação fica dentro do intervalo de guarda. Dessa forma, a soma dos sinais será construtiva, já que ambos carregam o mesmo símbolo OFDM (não há interferência intersimbólica).

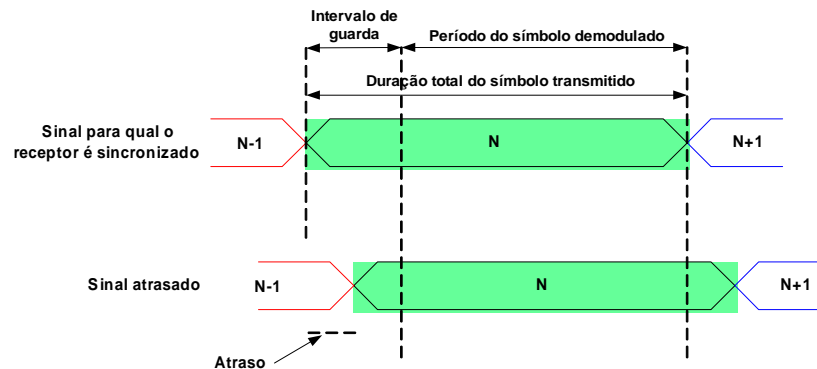


Figura 3 - Símbolo com atraso menor que o intervalo de guarda

Devido a esta característica da modulação COFDM, o radiodifusor pode utilizar uma rede de frequência única, SFN (*Single Frequency Network*), para melhorar a qualidade da cobertura. Ao invés de utilizar um único transmissor de alta potência, que pode não atender satisfatoriamente a área de cobertura em caso de existência de zonas de sombra, por exemplo, utiliza-se um número maior de transmissores/repetidores de baixa potência operando na mesma frequência.

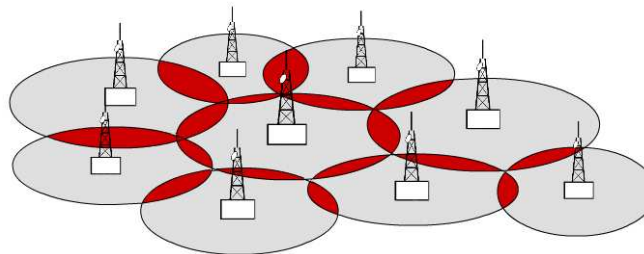


Figura 4 - Rede de frequência única – áreas vermelhas indicam sobreposição de sinais

Os transmissores da rede de frequência única devem irradiar os mesmos bits de dados ao mesmo tempo e na mesma frequência.



A rede de distribuição deve ser sincronizada da fonte até os receptores, sendo que qualquer atraso entre esses pontos deve ser precisamente conhecido e controlado. Do multiplexador aos transmissores, ocorrem dois tipos de atrasos:

- atrasos introduzidos pela rede de distribuição primária, ou seja, entre o multiplexador e os receptores dos transmissores (atraso 1 na figura abaixo);
- atrasos introduzidos dentro de cada transmissor (atraso 2 na figura abaixo).

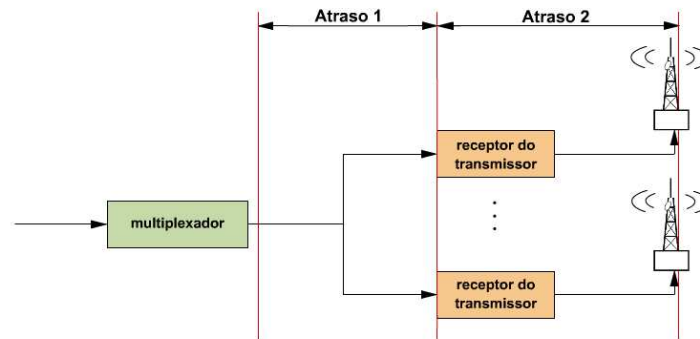


Figura 5 - Atrasos da SFN

No primeiro caso, os atrasos são diferentes para cada enlace. Para contornar este problema, uma função de compensação do atraso na rede, que permite detectar as variações de atraso no percurso e compensá-las, é implementada nos transmissores.

No segundo caso, os diferentes atrasos de processamento podem ser causados pelo fato dos moduladores serem de fabricantes diferentes e/ou pelo projeto da parte de RF dos transmissores serem diferentes. Para equalizar os atrasos de todos os transmissores, é implementada uma função de compensação do atraso devido aos transmissores.

Para garantir o sincronismo no tempo e na frequência entre os transmissores são utilizados receptores GPS.

A escolha da duração do intervalo de guarda determina o atraso máximo admitido pelo sistema SFN e, conseqüentemente, a distância máxima entre os transmissores da rede.