

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETRÔNICA

MARCEL KUSUNOKI

**RETRANSMISSÃO DO SINAL DE TV DIGITAL NO PADRÃO
BRASILEIRO COM REDES SFN E GAP FILLER**

MONOGRAFIA DE ESPECIALIZAÇÃO

CURITIBA – PR
2013

MARCEL KUSUNOKI

**RETRANSMISSÃO DO SINAL DE TV DIGITAL NO PADRÃO
BRASILEIRO COM REDES SFN E GAP FILLER**

Monografia apresentada ao Departamento Acadêmico de Eletrônica, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná como requisito parcial para obtenção do título de Especialista em Teleinformática e Redes de Computadores.

Orientador: Prof. Dr. Valmir de Oliveira

CURITIBA – PR
2013



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Diretoria do Campus Curitiba
Gerência de Pesquisa e Pós-graduação
Departamento Acadêmico de Eletrônica
Curso de Especialização em Teleinformática e Redes de Computadores

TERMO DE APROVAÇÃO

Retransmissão do sinal de TV Digital no padrão brasileiro com redes SFN e Gap Filler

por

Marcel Kusunoki

Esta monografia foi apresentada às 20 h, do dia 31 de julho de 2013, como requisito parcial para a obtenção do título de Especialista em Teleinformática e Rede de Computadores – Departamento Acadêmico de Eletrônica – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O candidato apresentou o trabalho para a Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após a deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho APROVADO CRM NOTA 9,0

(aprovado, aprovado com restrições, reprovado)

Prof. Dr. Valmir de Oliveira
(UTFPR)
Orientador

Prof. Dr. Walter Godoy Junior
(UTFPR)
Coordenador do Curso de Especialização em
Teleinformática e Redes de Computadores

Dedico este trabalho aos meus pais e irmã que sempre me mostraram o valor e importância de uma educação de qualidade, possibilitando o crescimento como ser humano e contribuindo para um mundo melhor.

AGRADECIMENTOS

Ao Ivan Miranda, diretor de Engenharia da RPC TV, e Marco Antônio Martins, gerente de Engenharia da RPC TV, por permitirem a utilização de equipamentos e informações da empresa RPC TV colhidas durante a ativação dos sistemas de transmissão de TV Digital.

Aos colegas de trabalho pelo auxílio e dedicação durante a realização das medidas em campo.

Ao professor Dr. Valmir de Oliveira por ser meu orientador e pela dedicação, paciência e incentivo na realização deste trabalho.

Aos colegas do curso de especialização pela troca de conhecimentos e experiências do dia-a-dia, fato esse que contribui para aumentar o aproveitamento desta pós-graduação.

RESUMO

KUSUNOKI, Marcel. **Retransmissão do sinal de TV Digital no padrão Brasileiro com redes SFN e Gap Filler**. 2013. 68 f. Monografia (Especialização em Teleinformática e Redes de Computadores) – Programa de Pós-Graduação em Tecnologia, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2013.

Esta pesquisa apresenta uma abordagem teórica-prática sobre padrões de TV Digital no mundo, dando enfoque ao padrão brasileiro ISDB-Tb; modulação OFDM e as redes de frequência única SFN e *Gap Fillers*. Este trabalho tem como objetivo comprovar que as redes SFN e *Gap Fillers* podem ser utilizadas para expansão da área de cobertura das emissoras de televisão em formato digital, trazendo como benefício o uso consciente do espectro. Destacam-se ainda as técnicas utilizadas durante a etapa da modulação para gerar robustez ao sinal OFDM contra ruídos impulsivos e multipercursos, tanto de ordem natural quanto impostos pelos transmissores da rede SFN. São apresentados resultados práticos a fim de comprovar o objetivo proposto.

Palavras-chave: SFN. Gap Filler. Rede de Frequência Única. ISDB-Tb. Intervalo de guarda.

ABSTRACT

KUSUNOKI, Marcel. **Brazilian Digital TV Standard Retransmission with SFN and Gap Filler**. 2013. 68 f. Monografia (Especialização em Teleinformática e Redes de Computadores) – Programa de Pós-Graduação em Tecnologia, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2013.

This research presents a theoretical-practical approach about Digital TV in the world, focus in ISDB-Tb Brazilian standard, OFDM modulation and single frequency networks SFN and Gap Fillers. This work has a goal to prove that SFN and Gap Fillers can be used to expand the coverage area of digital television stations, bringing as consequence a conscious spectrum use. Also highlight the techniques during modulation step to improve the OFDM signal strength against impulsive noise and multipath, from natural source as imposed by transmitters in SFN. Practical results are presented to prove the proposed objective.

Keywords: SFN. Gap Filler. Single Frequency Network. ISDB-Tb. Guard Interval.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Qualidade da Imagem versus Área de Cobertura - Transmissão Digital e Analógica.....	20
Figura 2 - Condições para haver a ortogonalidade das portadoras OFDM (no tempo e frequência)	22
Figura 3 - Modulador básico OFDM em blocos	23
Figura 4 - Demodulador básico OFDM em blocos	24
Figura 5 - Sistema OFDM com IFFT e FFT	27
Figura 6 - Deslocamento do Sinal Digital no Canal	28
Figura 7 - Máscara do Espectro de Transmissão.....	31
Figura 8 - Visão geral do sistema de TV Digital	32
Figura 9 - Diagrama em blocos do sistema de transmissão.....	33
Figura 10 - Divisão do canal de 6 MHz em segmentos	34
Figura 11 - Divisão do canal em camadas	35
Figura 12 - Diagrama em blocos da codificação de canal.....	37
Figura 13 - Estrutura de um quadro multiplex	38
Figura 14 - Formato do TSP MPEG-2 TS e TSP RS.....	38
Figura 15 - Exemplo de divisão do TS em dois níveis hierárquicos	39
Figura 16 - Entrelaçamento de bit e mapeamento da modulação QPSK	40
Figura 17 - Constelação da modulação QPSK.....	40
Figura 18 - Entrelaçamento de bit e mapeamento da modulação 16QAM.....	40
Figura 19 - Constelação da modulação 16QAM.....	41
Figura 20 - Entrelaçamento de bit e mapeamento da modulação 64QAM.....	41
Figura 21 - Constelação da modulação 64QAM.....	42
Figura 22 - Entrelaçamento no tempo contra o ruído impulsivo	42
Figura 23 - Entrelaçamento na frequência contra o multipercurso	42
Figura 24 - Inserção do intervalo de guarda do símbolo OFDM.....	43
Figura 25 - Exemplo de Rede MFN.....	45
Figura 26 - Exemplo de Rede SFN	45
Figura 27 - Rede de Frequência Única Distribuída	46
Figura 28 - Inserir de atraso na rede SFN.....	47
Figura 29 - Dimensionamento de rede SFN - caso ideal.....	48
Figura 30 - Dimensionamento da rede SFN - caso real	49
Figura 31 - Dimensionamento da rede SFN - caso crítico.....	49
Figura 32 - Rede de Frequência Única de Repetição - <i>Gap Filler</i>	51
Figura 33 - Cancelador de Eco.....	51
Figura 34 - Análise de multipercurso com Cancelador de Eco desligado	52
Figura 35 - Análise de multipercurso com Cancelador de Eco ativado	53
Figura 36 - Pontos para análise da rede SFN na região de Cianorte.....	57
Figura 37 - Região onde os sinais estão fora do IG (casos 1/16 e 1/8).....	57
Figura 38 - Análise de multipercurso no Ponto Cianorte 1 IG 1/16	59

Figura 39 - Análise de multipercurso no Ponto Cianorte 2 IG 1/16	60
Figura 40 - Análise de multipercurso no Ponto Terra Boa IG 1/16	60
Figura 41 - Análise de multipercurso no Ponto Indianopolis IG 1/16.....	61
Figura 42 - Análise de multipercurso no Ponto Indianopolis IG 1/8.....	62
Figura 43 - Pontos para análise do Gap Filler na região de Araucária.....	63
Figura 44 - Análise de multipercurso GF Araucária - Ponto 1	64
Figura 45 - Análise de multipercurso GF Araucária - Ponto 2	65
Figura 46 - Análise de multipercurso GF Araucária - Ponto 3	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Canalização da TV Digital	29
Tabela 2 - Especificações das máscaras do espectro de transmissão	31
Tabela 3 - Parâmetros do sistema de transmissão	34
Tabela 4 - Taxas de dados disponíveis a cada camada	35
Tabela 5 - Taxa de dados de um segmento	36
Tabela 6 - Quantidade de TSP dentro de um quadro multiplex.....	38
Tabela 7 - Pontos para análise da rede SFN na região de Cianorte	56
Tabela 8 - Atrasos teóricos entre sinais calculados para IG 1/16.....	58
Tabela 9 - Atrasos teóricos entre sinais calculados para IG 1/8.....	58
Tabela 10 - Pontos para análise do Gap Filler na região de Araucária	63
Tabela 11 - Atrasos teóricos entre sinais calculados para IG 1/8.....	63

LISTA DE SIGLAS

1PPS	Um Pulso por Segundo
8-VSB	<i>Eight-level Vestigial Side-Band</i>
16QAM	<i>Sixteen Quadrature Amplitude Modulation</i>
64QAM	<i>Sixty-Four Quadrature Amplitude Modulation</i>
ABERT	Associação Brasileira de Emissoras de Rádio e Televisão
AC	<i>Auxiliary Channel</i>
ANATEL	Agência Nacional de Telecomunicações
ATSC	<i>Advanced Television System Committee</i>
AVC	<i>Advanced Video Coding</i>
AVC@L4.0	<i>Advanced Video Coding Level 4.0</i>
BP@L3.1	<i>Baseline Profile Level 3.1</i>
BST-OFDM	<i>Band Segmented Transmission - Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>
BTS	<i>Broadcast Transport Stream</i>
C/N	<i>Carrier to Noise Ratio</i>
COFDM	<i>Coded Segmented Transmission - Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>
CP	<i>Continual Pilot</i>
DBPSK	<i>Differential Binary Phase Shift Keying</i>
DFT	<i>Discret Fourier Transform</i>
DMB-T	<i>Digital Multimedia Broadcasting - Terrestrial</i>
DQPSK	<i>Diferential Quadrature Phase Shift Keying</i>
DVB	<i>Digital Video Broadcasting</i>
DVB-T	<i>Digital Video Broadcasting - Terrestrial</i>
DVB-H	<i>DVB Transmission System for Handheld Terminals</i>
EPG	<i>Electronic Program Guide</i>
FDM	<i>Frequency Division Multiplexing</i>
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i>
FEC	<i>Forward Error Correction</i>
HDTV	<i>High Definition Television</i>
IDFT	<i>Inverse Discret Fourier Transform</i>

IFFT	<i>Inverse Fast Fourier Transform</i>
IG	<i>Intervalo de Guarda</i>
ISDB	<i>Integrated Services Digital Broadcasting</i>
ISDB-T	<i>Integrated Services Digital Broadcasting - Terrestrial</i>
ISDB-Tb	<i>Integrated Services Digital Broadcasting - Terrestrial Brazilian Version</i>
LTE	<i>Long Term Evolution</i>
MER	<i>Modulation Error Rate</i>
MFN	<i>Multiple Frequency Network</i>
MPEG-2 TS	<i>Moving Picture Experts Group 2 Transport Stream</i>
MPEG-4	<i>Moving Picture Experts Group 4</i>
MPEG-4 HE-AAC@L3	<i>Moving Picture Experts Group 4, High Efficiency - Advanced Audio Coding, Level 3</i>
MPEG-4 HE-AAC@L4	<i>Moving Picture Experts Group 4, High Efficiency - Advanced Audio Coding, Level 4</i>
NSI	<i>Network Synchronization Information</i>
OFDM	<i>Orthogonal Frequency-Division Multiplexing</i>
QPSK	<i>Quadrature Phase Shift Keying</i>
RF	<i>Rádio Frequência</i>
RS	<i>Reed-Solomon</i>
SAP	<i>Second Audio Program</i>
SBTVD	<i>Sistema Brasileiro de Televisão Digital</i>
SDTV	<i>Standard Definition Television</i>
SET	<i>Sociedade de Engenharia de Televisão</i>
SFN	<i>Single Frequency Network</i>
SP	<i>Scattered Pilot</i>
TG	<i>Tempo de Guarda</i>
TMCC	<i>Transmission and Multiplexing Configuration Control</i>
TS	<i>Transport Stream</i>
TSP	<i>Transport Stream Packet</i>
UHF	<i>Ultra High Frequency</i>
VHF	<i>Very High Frequency</i>

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
1.1. TEMA.....	14
1.2. OBJETIVOS.....	16
1.3. JUSTIFICATIVA.....	16
1.4. METODOLOGIA DE PESQUISA.....	16
1.5. ETAPAS.....	16
1.6. ESTRUTURA DO TRABALHO	18
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
2.1. TRANSMISSÃO DE TV TERRESTRE.....	19
2.2. ATSC	20
2.3. DVB-T	21
2.4. ISDB-T	21
2.5. MODULAÇÃO OFDM	22
2.6. ESTUDO PARA ESCOLHA DO PADRÃO BRASILEIRO	26
2.7. CANALIZAÇÃO PARA TV DIGITAL NO BRASIL	28
2.8. ISDB-Tb.....	32
2.8.1. Definição do padrão.....	32
2.8.2. Sistema de transmissão terrestre	33
2.9. MER.....	43
2.10. SFN e GAP FILLERS.....	44
2.10.1. Definição de SFN.....	44
2.10.2. SFN Distribuída	46
2.10.3. SFN de Repetição	50
2.10.4. Vantagens e Desvantagens.....	53
3. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS	54
3.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	54
3.2. PROCEDIMENTOS UTILIZADOS – SFN DISTRIBUÍDA	55
3.3. RESULTADOS EM CAMPO – SFN DISTRIBUÍDA	58
3.4. PROCEDIMENTOS REALIZADOS – GAP FILLER	62
3.5. RESULTADOS EM CAMPO – GAP FILLER.....	64
4. CONCLUSÕES	66
REFERÊNCIAS	67

1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo é apresentada uma breve explicação sobre o tema, objetivos, metodologia de pesquisa adotada e a estrutura do estudo.

1.1. TEMA

A televisão é um importante meio de comunicação no Brasil. A TV Analógica aberta atinge aproximadamente noventa por cento dos lares brasileiros, sendo ela um importante meio de acesso à informação, cultura e lazer (ALENCAR, 2007).

Esse importante agente está seguindo a tendência de digitalização mundial, ou seja, os sistemas de transmissão analógicos estão sendo substituídos por plataformas digitais. No Brasil, foram realizados vários estudos sobre qual padrão de TV Digital seria adotado. Os modelos analisados foram o ATSC (*Advanced Television System Committee*), padrão utilizado nos Estados Unidos da América, DVB (*Digital Video Broadcasting*), padrão europeu, e o ISDB (*Integrated Services Digital Broadcasting*), adotado no Japão. Essa migração tinha como objetivos a melhoria na qualidade do serviço e aperfeiçoamento do uso do espectro de frequências, sendo possível transmitir várias programações em um mesmo canal (RÉGIS; FECHINE, 2007).

Durante o planejamento da TV Digital no Brasil foram definidas algumas premissas: o formato de vídeo deveria ser 16x9, seguindo o mesmo formato dos demais padrões estudados; os canais utilizados serão os mesmo da TV Analógica, não havendo alteração da faixa de frequência e nem da largura de banda; haveria transmissões de programação em SDTV (*Standard Definition Television*) e em HDTV (*High Definition Television*); o sistema teria robustez para enfrentar os efeitos de multipercurso, como, por exemplo, a seletividade em frequência e efeito Doppler; e os conteúdos de programação seriam de responsabilidade das emissoras (ALENCAR, 2007).

No dia 28 de junho de 2006 definiu-se o padrão brasileiro. O decreto 5.820/06 implantou o Sistema Brasileiro de Televisão Digital – SBTVD. Ele sofreu grande influência do padrão japonês, por isso também é chamado de ISDB-Tb (*Integrated Services Digital Broadcasting - Terrestrial Brazilian Version*). Apesar de

utilizar o ISDB como padrão de transmissão, a codificação do vídeo utilizada é o H264, ou seja, MPEG-4 Parte 10 (*Moving Picture Experts Group 4*), também conhecida como AVC (*Advanced Video Coding*) (CARVALHO, 2006).

O multipercurso pode ser definido como sinais emitidos pelo transmissor digital principal que percorrem diferentes caminhos e chegam ao receptor de TV Digital em instantes diferentes. Se esses sinais chegarem dentro do intervalo de guarda ainda serão identificados como sendo a mesma informação. Esse recurso denominado IG (intervalo de guarda) significa aumentar o tempo de duração do símbolo OFDM (*Orthogonal Frequency-Division Multiplexing*) a fim de garantir a robustez do sinal (YAMADA; BEDICKS; AKAMINE; RAUNHEITTE; DANTAS, 2004). Analogamente, se o mesmo contratempo estiver presente ao sinal de TV Analógica o vídeo sofreria com a presença de fantasmas, que significa sobreposições de imagens que chegaram ao receptor da TV em instantes distintos, diminuindo a qualidade do vídeo (BEDICKS JUNIOR, 2008).

Em um caso teórico, onde o relevo e prédios não afetam a propagação do sinal de RF (Rádio Frequência), a área de cobertura de um transmissor digital instalado na cidade de Curitiba poderia cobrir toda ela e sua região metropolitana. Mas, na prática, devido relevo e obstáculos no caminho, podemos prever que existirão áreas de sombra onde o sinal estará muito fraco, não possuindo nível suficiente para que o receptor digital consiga demodular o mesmo. Para solucionar esse problema surgiram as redes *Single Frequency Network* (SFN) e *Gap Fillers*, que têm como objetivo cobrir áreas não atendidas pelo transmissor principal. Esses equipamentos têm como característica inserir multipercursos controlados, porque transmitem na mesma frequência do transmissor principal. O ISDB-Tb permite que redes de frequência única sejam utilizadas para melhorar a área de cobertura de uma emissora ou retransmissora (FALLER, 2009).

A SFN possui algumas peculiaridades e dificuldades de implantação, que serão discutidas nessa monografia. As grandes vantagens de sua utilização é o melhor aproveitamento do espectro de frequências e a diversidade espacial, dando ao receptor a opção de definir qual o melhor sinal que será utilizado.

1.2. OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é comprovar que as redes SFN e *Gap Fillers* podem ser utilizados para aumentar a abrangência da cobertura de TV Digital na região de Curitiba – PR e Paranaíba - PR.

Os objetivos específicos são entender o funcionamento das redes SFN e *Gap Fillers*, apontar as diferenças, vantagens e desvantagens; mostrar as dificuldades de implantação dos dois sistemas e o comportamento do sinal que o receptor receberá na casa do telespectador.

1.3. JUSTIFICATIVA

A solução para aumentar a cobertura de TV Digital seria instalar vários transmissores emitindo os mesmos serviços, cada um trabalhando em uma frequência, de modo que não há interferência entre eles. Porém, pode-se concluir que o espectro numa determinada região ficaria bastante ocupado. Já as redes SFN e *Gap Fillers* utilizam o mesmo canal do transmissor principal, ou seja, há economia de espectro e este pode ser utilizado para outros tipos de serviços, como por exemplo, Internet Móvel 4G – *Long Term Evolution* (LTE).

1.4. METODOLOGIA DE PESQUISA

Análise do padrão ISDB-Tb e das redes SFN e *Gap Fillers*; Interconexão, configuração, operação e verificação da estabilidade das redes SFN e *Gap Fillers* nas empresas RPCTV Paranaíba e RPC TV Curitiba, respectivamente.

1.5. ETAPAS

O desenvolvimento do trabalho foi dividido em etapas. São elas:

1 – Levantamento de Literatura: esta etapa visa levantar referências bibliográficas para fundamentar a monografia.

2 – Montagem do Projeto: após levantar as referências, inicia-se a montagem da proposta da monografia, a fim de determinar os objetivos, justificativas, etapas, cronograma e título da monografia.

3 – Leitura sobre ISDB-Tb: esta etapa visa aprofundar os conceitos sobre o padrão Brasileiro de TV Digital. Serão utilizadas as referências bibliográficas levantadas na primeira etapa.

4 – Leitura sobre SFN e *Gap Fillers*: esta etapa visa aprofundar os conceitos sobre as redes SFN e *Gap Filler*. As fontes de conteúdo serão as referências levantadas na primeira etapa.

5 – Etapa Prática – Coleta e Dados: Será montado na prática um sistema de análise para acompanhar a interferência dos sinais do transmissor principal e retransmissores. Os equipamentos utilizados pertencem a RPC TV, que gentilmente permitiu a utilização deles, assim como os resultados coletados.

6 – Etapa Prática – Tratamento dos Dados: Após realização do teste prático, será realizado o tratamento dos dados coletados.

7 – Elaboração do Relatório Final: Com o embasamento teórico e resultados práticos, será dado início a elaboração do relatório final.

8 – Revisão do Texto: Com a etapa sete concluída, será possível revisar o texto.

9 – Entrega do Trabalho: Após a monografia estar corrigida, será realizada a entrega da mesma.

10 – Apresentação do Trabalho: Na data marcada, será defendida a monografia diante da banca. Serão apresentados os conceitos apreendidos na teoria e os resultados obtidos na prática.

1.6. ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho foi segmentado em quatro capítulos. O primeiro introduz o assunto, aponta os objetivos, justificativa e traça uma metodologia de trabalho.

O capítulo 2 faz o embasamento teórico sobre o assunto. Inicia-se com a apresentação das qualidades de uma transmissão digital terrestre em relação à transmissão analógica. Em seguida, descrevem-se brevemente os padrões de TV Digital já existentes no mundo e a modulação OFDM, que é utilizada em dois desses modelos. Após isso, apontam-se as premissas impostas pelo estudo realizado por um grupo de instituições a fim de escolher o padrão brasileiro de TV Digital e quais as medidas adotadas para inserir esse novo sinal no espectro, antes ocupado por apenas canais de TV Analógica. Com a apresentação do padrão escolhido, explicam-se características desse sistema: tipo de codificação de vídeo, áudio e dados adotados; normas; modos de operação e o detalhamento da etapa de modulação e transmissão do sinal digital. Por fim, explica-se o conceito das redes SFN e tipos de rede de frequência única, com suas vantagens e desvantagens.

O capítulo 3 apresenta as aplicações dos dois tipos de rede SFN na prática, metodologia de pesquisa de sinal, equipamentos utilizados, e os resultados obtidos.

O capítulo 4 apresenta as considerações finais com comentários sobre os resultados obtidos e se o objetivo proposto neste trabalho foi alcançado.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo faz a abordagem necessária para embasar teoricamente esta monografia, apresentando um breve relato sobre a história da TV Digital no Brasil, qual o padrão adotado, seus benefícios contra interferências e a possibilidade de trabalhar com redes de frequência única.

2.1. TRANSMISSÃO DE TV TERRESTRE

A constante busca pela transformação da televisão analógica para a digital vem embasada nos três principais sistemas de transmissão de TV Digital mundial: ATSC, que utiliza a modulação 8-VSB (*Eight-level Vestigial Side-Band*); DVB-T (*Digital Video Broadcasting Terrestrial*), que utiliza a tradicional tecnologia COFDM (*Coded Segmented Transmission – Orthogonal Frequency Division Multiplexing*); e o ISDB-T (*Integrated Services Digital Broadcasting - Terrestrial*), com a modulação BST-OFDM (*Band Segmented Transmission – Orthogonal Frequency Division Multiplexing*). Um quarto sistema chamado de DMB-T (*Digital Multimedia Broadcasting – Terrestrial*) é utilizado na China, atendendo as necessidades do país em questão.

Os benefícios da tecnologia de TV Digital são listados abaixo:

- O sinal transmitido é mais robusto em relação ao da TV Analógica.
- Vídeo e áudio com maior qualidade, sendo possível trabalhar com imagens em alta definição e múltiplos áudios.
- Informações extras de programação são transmitidas simultaneamente no mesmo sinal, como, por exemplo, EPG (*Electronic Program Guide*), *closed caption*, legendas, áudio SAP (*Second Audio Program*) e interatividade.
- Possibilidade de canal de retorno a fim de que o telespectador interaja com a programação de TV transmitida.
- Facilidade de que a programação seja armazenada em uma mídia digital para ser assistida em outro momento oportuno.

As interferências no sinal transmitido e problemas no canal de RF afetam tanto o sinal analógico quanto o digital. A diferença é que o segundo é mais robusto e o receptor digital consegue demodular o sinal mesmo que ele tenha níveis fracos comparados a valores comuns de nível de sinal analógico bom.

A figura 1 mostra a robustez do sinal digital em relação ao analógico no gráfico de qualidade de imagem x área de cobertura – distância da torre. O digital tem como característica conseguir ou não demodular o sinal transmitido, não existe meio termo. Já o sinal analógico apresenta uma curva não abrupta. O nível de Qualidade de Imagem igual a três seria uma qualidade aceitável para a TV Analógica. Valores abaixo disso são considerados ruins. Percebe-se que há uma distância “d” no qual o sinal digital ainda está sendo demodulado e o analógico está numa região de sinal pobre (BEDICKS JUNIOR, 2008).

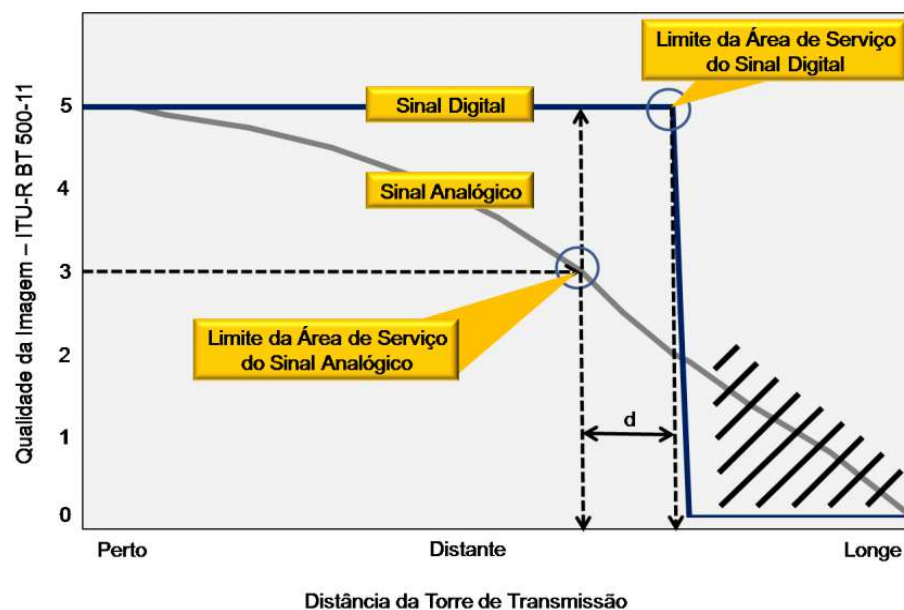


Figura 1 - Qualidade da Imagem versus Área de Cobertura - Transmissão Digital e Analógica
Fonte: Bedicks Junior (2008)

2.2. ATSC

O padrão americano é utilizado atualmente nos Estados Unidos, Canadá, México e Coréia do Sul. A modulação é a monoportadora 8-VSB e utiliza dois códigos corretores de erros, um do tipo *Reed Solomon* e um convolucional com taxa

de codificação 2/3, ou seja, a cada três bits transmitidos dois são de informação útil e um é de redundância. Com isso, fixa-se a taxa transmitida em 19,39 Mbps, o que é suficiente para a necessidade do padrão. Segundo Bedicks Junior (2008) esse padrão tem o melhor resultado de relação sinal-ruído (C/N – *Carrier to Noise*) de aproximadamente 15dB, podendo ser considerado o melhor para recepções distantes. A modulação 8-VSB apresenta robustez contra ruído impulsivo, mas não contra multipercurso ou eco e contra o efeito Doppler. Esse último item impede que ele seja utilizado para recepção em dispositivos móveis. Esses apontamentos caracterizaram o padrão como não sendo apropriado para utilização no Brasil.

2.3. DVB-T

O sistema europeu DVB-T é utilizado atualmente na Europa, alguns países asiáticos e africanos. A modulação é a COFDM de múltiplas portadoras e utiliza-se o intervalo de guarda. Na sua concepção inicial não estava prevista a recepção em dispositivos móveis. Em um segundo momento surgiu o padrão DVB-H (*DVB Transmission System for Handheld Terminals*) permitindo a modulação hierárquica onde existiam duas transmissões simultâneas, cada uma com sua característica de modulação e FEC (*Forward Error Correction*). O padrão DVB-T não obteve performance boa em ambientes fechados, com a utilização de antena interna, comparado ao ISDB-T, sendo considerado um ponto negativo (BEDICKS JUNIOR, 2008).

2.4. ISDB-T

O padrão japonês ISDB-T é utilizado no Japão e serviu de base para o padrão brasileiro. A modulação é o BST-OFDM. O padrão em questão segmenta a banda do canal em 14 segmentos distintos, sendo 13 deles para a transmissão do sinal de interesse e um que serve de banda de guarda no início e fim do canal; e há a inserção de *time interleaving* ou entrelaçamento temporal, que aumenta a robustez do sinal. As múltiplas portadoras podem ser moduladas em DQPSK (*Differential Quadrature Phase Shift Keying*), QPSK (*Quadrature Phase Shift Keying*), 16QAM

(16 *Quadrature Amplitude Modulation*) ou 64QAM (64 *Quadrature Amplitude Modulation*). As modulações em questão apresentam diferentes níveis de robustez, e quanto maior ela for menor a taxa de informação transmitida. A quantidade de portadoras presentes na banda do canal podem ser 1404 portadoras (modo 1 ou 2k), 2808 (modo 2 ou 4k) e 5616 (modo 3 ou 8k). O espaçamento entre elas e a duração de símbolo varia conforme o modo escolhido. As possibilidades de FEC são 1/2, 2/3, 3/4, 5/6 e 7/8, influenciando na robustez do sinal. Outra importante vantagem desse padrão é o intervalo de guarda, que gera certa imunidade ao efeito Doppler e multipercurso (BEDICKS JUNIOR, 2008).

2.5. MODULAÇÃO OFDM

Carvalho (2006) define a modulação OFDM como a evolução do FDM (*Frequency Division Multiplexing*), fortemente utilizada em telefonia, onde cada frequência representava um canal telefônico. Já no OFDM as portadoras são ortogonais entre si e o sinal digital é transmitido por várias portadoras.

A ortogonalidade das portadoras é garantida pelo fato de todas as subportadoras terem um número inteiro de ciclos na duração de um símbolo OFDM. A fim de evitar a interferência entre elas arranja-se de uma forma que no centro de suas frequências tenha-se um nulo (TELECO). A figura 2 mostra um sinal OFDM de quatro subportadoras, no tempo e frequência.

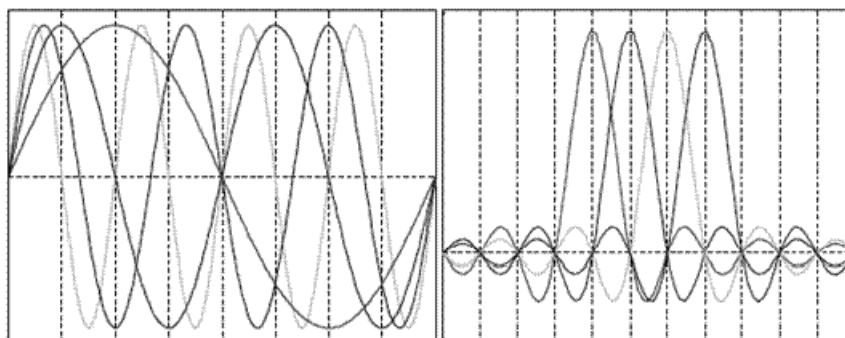


Figura 2 - Condições para haver a ortogonalidade das portadoras OFDM (no tempo e frequência)

Fonte: Teleco

Esse tipo de modulação apresenta alguns possíveis problemas nas multiportadoras OFDM, sendo suscetíveis a interferências senoidais, erros de fase e frequência.

A figura 3 mostra como funciona basicamente um modulador OFDM.

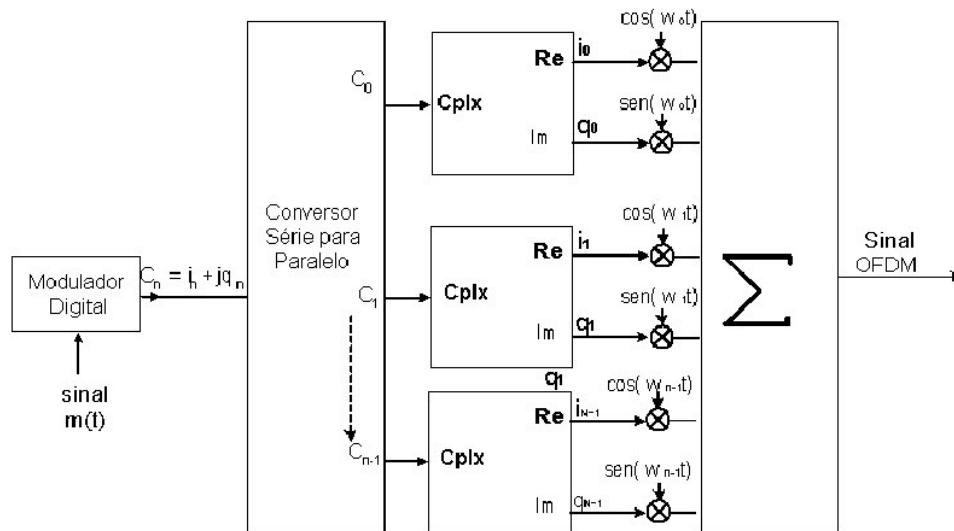


Figura 3 - Modulador básico OFDM em blocos

Fonte: Carvalho (2006)

Entende-se como $m(t)$ o sinal digital que será transmitido. O modulador digital mapeia a informação nos sinais (i_n) em fase e (q_n) em quadratura. A sequência C_n de sinais complexos seriais são convertidos em paralelos, onde cada saída paralela será uma subportadora complexa. Em seguida há a modulação de cada feixe complexo, a parte real é modulada com a função cosseno de w_n e a parte imaginária com a função seno de w_n . As N subportadoras adjacentes são ortogonais e apresentam um espaçamento entre elas igual ao inverso do tempo de símbolo OFDM.

Matematicamente pode-se deduzir o sinal OFDM, conforme é mostrado na sequência:

$$f_{OFDM}(t) = \sum_{n=0}^{N-1} \Re \{ c_n e^{-jw_n t} \}$$

$$f_{OFDM}(t) = \sum_{n=0}^{N-1} \Re \{ (i_n + jq_n) \cdot [\cos(w_n t) - j \sin(w_n t)] \}$$

$$f_{OFDM}(t) = \sum_{n=0}^{N-1} \Re \{ i_n \cos(w_n t) - j i_n \sin(w_n t) + j q_n \cos(w_n t) + q_n \sin(w_n t) \}$$

onde $\Re \{ \}$ é a parte real, ou seja, $i_n \cos(w_n t) + q_n \sin(w_n t)$

Portanto, o sinal OFDM será:

$$f_{OFDM}(t) = \sum_{n=0}^{N-1} \{ i_n \cos(w_n t) + q_n \sin(w_n t) \} \quad (2.1)$$

A demodulação é caracterizada na figura 4.

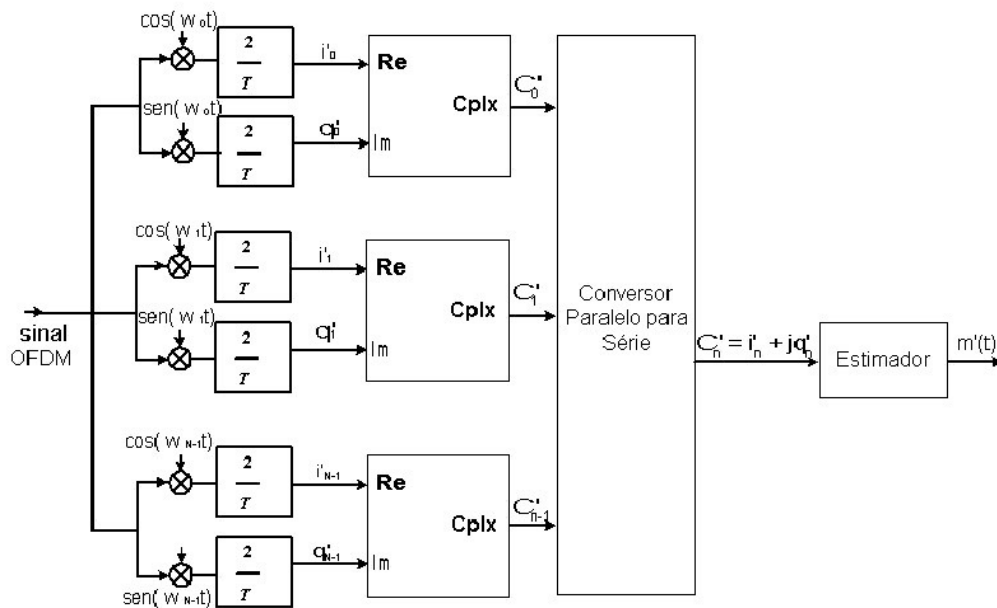


Figura 4 - Demodulador básico OFDM em blocos
Fonte: Carvalho (2006)

O tempo de duração do símbolo OFDM é T segundos. Os N osciladores complexos do transmissor e receptor estão em fase. Quanto maior o número N maior a complexidade desse sistema.

Considerando um caso teórico onde o canal é ideal, ou seja, não há ruído e nem distorção, a detecção é sem erros. A componente i'_n pode ser equacionada por:

$$i'_n = \frac{2}{T} \int_0^T r(t) \cos(w_n t) dt \quad (2.2)$$

onde $r(t)$ é o sinal recebido e neste caso ideal $r(t) = f_{OFDM}(t)$.

O componente i'_0 pode ser obtido através de:

$$i'_0 = \frac{2}{T} \int_0^T \sum_{n=0}^{N-1} [i_n \cos(w_n t) + q_n \sin(w_n t)] \cdot \cos(w_0 t) dt$$

$$\begin{aligned}
i'_0 &= \frac{2}{T} \int_0^T \sum_{n=0}^{N-1} i_n \cos(w_n t) \cdot \cos(w_0 t) dt + \underbrace{\frac{2}{T} \int_0^T \sum_{n=0}^{N-1} q_n \sin(w_n t) \cdot \cos(w_0 t) dt}_0 \\
i'_0 &= \frac{2}{T} \int_0^T i_0 \cos(w_0 t) \cdot \cos(w_0 t) dt + \underbrace{\frac{2}{T} \int_0^T \sum_{n=0}^{N-1} i_n \cos(w_n t) \cdot \cos(w_0 t) dt}_0 \\
i'_0 &= \frac{2i_0}{T} \int_0^T \cos^2(w_0 t) dt = i_0 \tag{2.3}
\end{aligned}$$

Esse mesmo procedimento se repete para os demais valores de n . É importante destacar novamente a necessidade da ortogonalidade se manter a fim de garantir o sincronismo entre o transmissor e receptor. Para que essa condição seja satisfeita, utilizam-se portadoras pilotos. Elas carregam sinais de referência para o receptor a fim de sincronizar a fase e sincronismo dos osciladores.

O aumento de portadoras pode tornar esse método inviável. Para solucionar essa limitação percebeu-se que o sinal OFDM pode ser analisado como uma série de Fourier, ou seja, $f_{OFDM}(t) = s_{OFDM}(t)$.

$$s_{OFDM}(t) = \sum_{n=0}^{N-1} \{i_n \cos(w_n t) + q_n \sin(w_n t)\} \tag{2.4}$$

onde os coeficientes i_n e q_n são os coeficientes das bases ortogonais $\cos(w_n t)$ e $\sin(w_n t)$ em comparação a série de Fourier com N elementos e coeficientes i_n e q_n .

A taxa de amostragem do sinal OFDM será:

$$f_s = \frac{1}{T_s} = R_s \tag{2.5}$$

onde f_s representa a frequência de amostragem.

A equação 2.4 pode ser reescrita da seguinte forma:

$$s_{OFDM}(t) = \sum_{n=0}^{N-1} [i_n \cos(\Omega_n t_s m) + q_n \sin(\Omega_n t_s m)] \tag{2.6}$$

onde $m = 1, 2, \dots, N-1$ e Ω_n é a frequência angular digital da n -ésima subportadora amostrada.

$$\Omega_n = 2\pi f_n \tag{2.7}$$

$$f_n = \frac{n}{T} \text{ e } f_0 = 0 \text{ [Hz]} \tag{2.8}$$

No intervalo t_m amostra-se o sinal OFDM conforme a equação 2.9.

$$t_m = mt_s \quad (2.9)$$

onde t_s é a duração do símbolo OFDM conforme a equação 2.10.

$$T = Nt_s \quad (2.10)$$

Utilizando as equações 2.6, 2.7, 2.8, 2.9 e 2.10 pode-se representar o sinal OFDM em banda básica com a equação 2.11:

$$s_{OFDM}(t) = \sum_{n=0}^{N-1} \left[i_n \cos\left(\frac{2\pi n t_s}{N T_s} m\right) + q_n \sin\left(\frac{2\pi n t_s}{N T_s} m\right) \right]$$

$$s_{OFDM}(t) = \Re \left\{ \sum_{n=0}^{N-1} \left[c_n e^{-j \frac{2\pi n}{N} m} \right] \right\} \quad (2.11)$$

Com isso, os N símbolos complexos c_n podem ser obtidos pela Transformada Inversa Discreta de Fourier – IDFT (*Inverse Discret Fourier Transform*). Portanto, como a IDFT, a partir de um espectro de freqüências, gera um sinal no domínio do tempo, pode-se considerar o vetor c_n como sendo o espectro de frequência do símbolo OFDM. Para a recepção utiliza-se a DFT (*Discret Fourier Transform*).

O grande número de portadoras junto às operações de IDFT e DFT implica em grande esforço computacional. Para diminuir esses esforços pode-se utilizar o algoritmo rápido da Transformada de Fourier denominado FFT (*Fast Fourier Transform*) e a IFFT (*Inverse Fast Fourier Transform*) (Carvalho, 2006).

O sistema OFDM completo com IFFT e FFT é representado na figura 5.

2.6. ESTUDO PARA ESCOLHA DO PADRÃO BRASILEIRO

A escolha do padrão brasileiro se baseou no relatório apresentado a ANATEL (Agência Nacional de Telecomunicações) com conclusões da pesquisa e teste de TV Digital realizados pelo grupo Mackenzie, SET (Sociedade de Engenharia de Televisão) e ABERT (Associação Brasileira de Emissoras de Rádio e Televisão) (BEDICKS JUNIOR, 2008). Os principais pontos apontados na conclusão são:

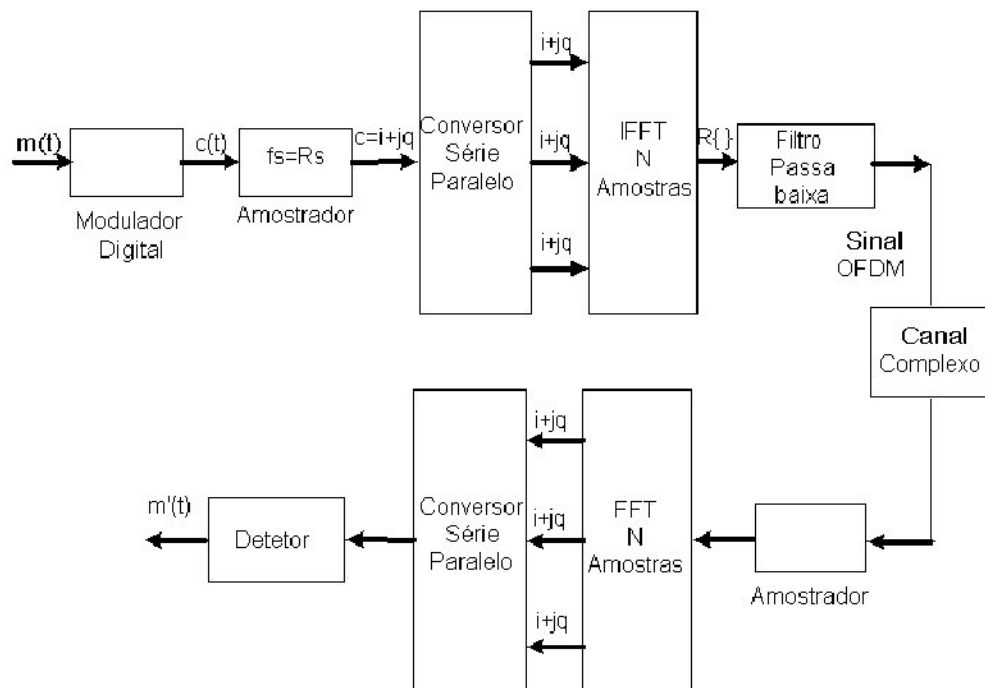


Figura 5 - Sistema OFDM com IFFT e FFT
Fonte: Carvalho (2006)

- A modulação COFDM apresenta a robustez necessária para transmissão em alta definição, melhor desempenho contra multipercurso e ruído impulsivo, recepção móvel e possibilidade de melhorar a cobertura de áreas com redes de frequência única.
- A vantagem da relação sinal-ruído do 8-VSB, 4dB em relação ao COFDM (no 8-VSB é necessário uma relação sinal-ruído C/N de 15dB e no ISDB-T 19dB), não foi traduzida em melhoria de cobertura na prática; a vantagem de menor consumo do 8-VSB prejudica a emissora e não o telespectador.
- A relação de proteção de canais adjacentes, desvantagem no COFDM, pode ser solucionada com a utilização de melhores filtros de rejeição nos receptores.
- A modulação COFDM é mais flexível na solução e otimização da cobertura dos sistemas de transmissão analógica.

2.7. CANALIZAÇÃO PARA TV DIGITAL NO BRASIL

A fim de evitar a interferência de canais analógicos sobre o canal digital inseriu-se um deslocamento de 1/7 MHz. Essa solução é caracterizada na figura 6. A explicação para isso é o fato da portadora de áudio do canal inferior poder interferir sobre o início do canal digital. Com esse deslocamento, a distância entre o fim do canal inferior e o início das portadoras OFDM é 364 kHz. Já a distância entre a última portadora OFDM e o início do canal superior ficou em 64 kHz. Após o fim das transmissões analógicas, a distância entre o fim das portadoras OFDM do canal digital e início das portadoras OFDM do canal superior será de 1/14 do canal de 6 MHz (BEDICKS JUNIOR, 2008).

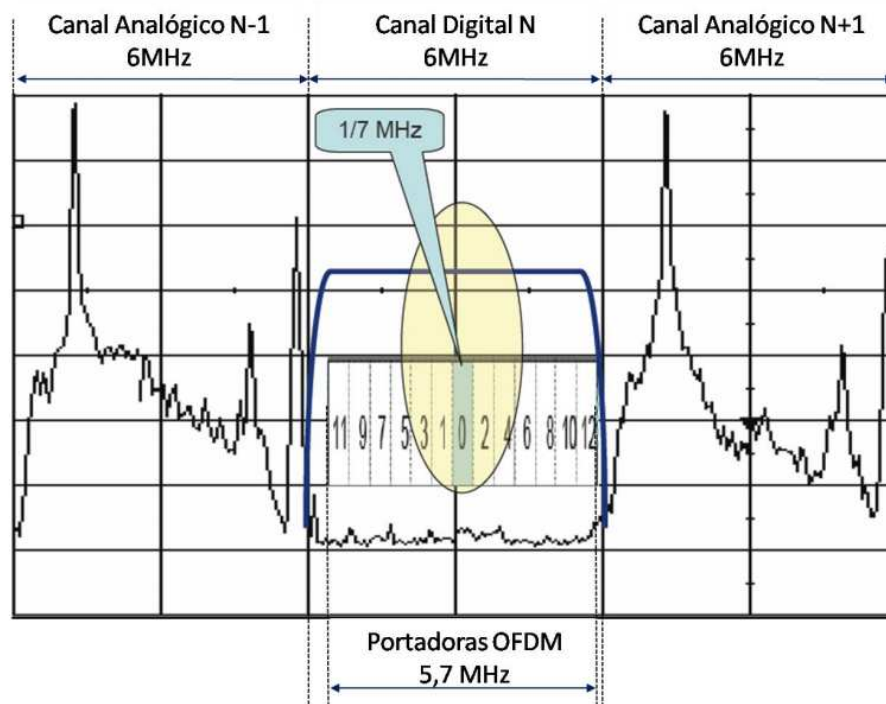


Figura 6 - Deslocamento do Sinal Digital no Canal
 Fonte: Bedicks Junior (2008)

A canalização da TV Digital é caracterizada na tabela 1. Nela estão presentes canais VHF (*Very High Frequency*) e UHF (*Ultra High Frequency*).

Tabela 1 - Canalização da TV Digital

Canal	Freq. Inicial [MHz]	Freq. Final [MHz]	Freq. Central [MHz]
VHF			
7	174	180	177,142857
8	180	186	183,142857
9	186	192	189,142857
10	192	198	195,142857
11	198	204	201,142857
12	204	210	207,142857
13	210	216	213,142857
UHF			
14	470	476	473,142857
15	476	482	479,142857
16	482	488	485,142857
17	488	494	491,142857
18	494	500	497,142857
19	500	506	503,142857
20	506	512	509,142857
21	512	518	515,142857
22	518	524	521,142857
23	524	530	527,142857
24	530	536	533,142857
25	536	542	539,142857
26	542	548	545,142857
27	548	554	551,142857
28	554	560	557,142857
29	560	566	563,142857
30	566	572	569,142857
31	572	578	575,142857
32	578	584	581,142857
33	584	590	587,142857
34	590	596	593,142857
35	596	602	599,142857
36	602	608	605,142857
37	Canal não utilizado para TV. Uso para rádio astronomia.		
38	614	620	617,142857
39	620	626	623,142857
40	626	632	629,142857
41	632	638	635,142857
42	638	644	641,142857
43	644	650	647,142857
44	650	656	653,142857
45	656	662	659,142857
46	662	668	665,142857
47	668	674	671,142857

48	674	680	677,142857
49	680	686	683,142857
50	686	692	689,142857
51	692	698	695,142857
52	698	704	701,142857
53	704	710	707,142857
54	710	716	713,142857
55	716	722	719,142857
56	722	728	725,142857
57	728	734	731,142857
58	734	740	737,142857
59	740	746	743,142857
60	746	752	749,142857
61	752	758	755,142857
62	758	764	761,142857
63	764	770	767,142857
64	770	776	773,142857
65	776	782	779,142857
66	782	788	785,142857
67	788	794	791,142857
68	794	800	797,142857
69	800	806	803,142857

Fonte: NBR 15.601 (ABNT, 2007)

A largura de banda do sinal de TV Digital possui 5,7 MHz. Para garantir que isso seja cumprido e evitar que o sinal interfira sobre os canais adjacentes criaram-se três máscaras para delimitar o sinal OFDM. A utilização de cada uma delas depende de critérios de localização do canal e potência do transmissor. Os excessos de nível de sinal fora da banda devem ser reduzidos com filtros adequados. As máscaras são: não-crítica, sub-crítica e crítica. Elas são caracterizadas na figura 7.

A tabela 2 especifica os limites das máscaras conforme a norma NBR 15.601 da ABNT.

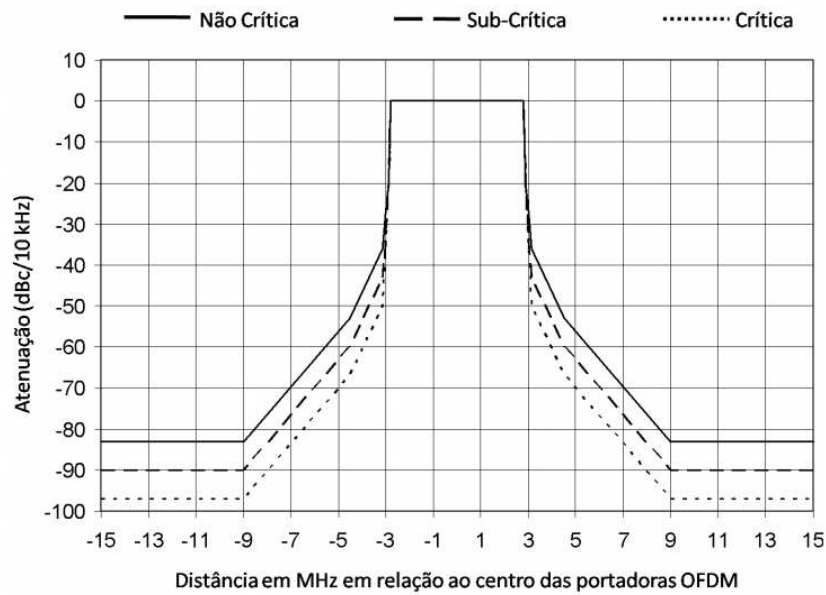


Figura 7 - Máscara do Espectro de Transmissão
Fonte: ABNT (2007)

Tabela 2 - Especificações das máscaras do espectro de transmissão

Distância em relação à portadora central [MHz]	Atenuação mínima em relação à potência média, medida na frequência da portadora central		
	Máscara não-crítica [dB]	Máscara subcrítica [dB]	Máscara crítica [dB]
-15	83	90	97
-9	83	90	97
-4,5	53	60	67
-3,15	36	43	50
-3	27	34	34
-2,86	20	20	20
-2,79	0	0	0
2,79	0	0	0
2,86	20	20	20
3	27	34	34
3,15	36	43	50
4,5	53	60	67
9	83	90	97
15	83	90	97

Fonte: NBR 15.601 (ABNT, 2007)

2.8. ISDB-Tb

2.8.1. Definição do padrão

O sistema brasileiro de TV Digital escolhido foi o ISDB-Tb (COELHO, 2008). A modulação BST-OFDM em 6 MHz foi baseada no sistema japonês, podendo ser transmitido em VHF e UHF. Uma das alterações em relação ao ISDB-T é a codificação de áudio e vídeo. No SBTVD a compressão de vídeo utilizada é o H.264/AVC@L4.0 (*Advanced Video Coding Level 4.0*) para o serviço *full-seg* e H.264 BP@L3.1 (*Baseline Profile Level 3.1*) para o serviço *one-seg*. A codificação do áudio é o MPEG-4 HE-AAC@L4 (*Moving Picture Experts Group 4, High Efficiency - Advanced Audio Coding, Level 4*) para o *full-seg* e MPEG-4 HE-AAC@L3 (*Moving Picture Experts Group 4, High Efficiency - Advanced Audio Coding, Level 3*) para o *one-seg*.

O *middleware*, que gerencia as funções de interatividade na TV Digital, escolhido foi o Ginga. Ele tem origem no Brasil.

O TS ISDB-Tb está no formato MPEG-2 TS (*Moving Picture Experts Group 2 Transport Stream*), permitindo que vários serviços sejam agrupados em um único fluxo. Após as etapas de codificação de canal haverá um único sinal OFDM.

O canal de 6 MHz é dividido em quatorze segmentos, sendo que treze deles constituirão o sinal OFDM. Cada segmento terá 1/14 de 6 MHz, ou seja, 428,572 MHz.

Normas da ABNT regularizam o padrão brasileiro de TV Digital. As NBRs discutem sobre o sistema de transmissão, codificação de áudio e vídeo, multiplexação, receptor digital terrestre, proteção de conteúdo, codificação de dados, interatividade, guia de operação e acessibilidade.

A figura 8 mostra uma visão geral do sistema de TV Digital, desde a codificação do vídeo e áudio, até a transmissão do sinal OFDM na antena de transmissão.

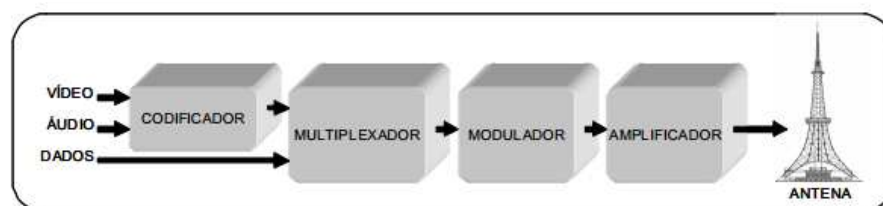


Figura 8 - Visão geral do sistema de TV Digital
Fonte: ABNT (2007)

2.8.2. Sistema de transmissão terrestre

A BST-OFDM permite a modulação hierárquica, com divisão em camadas e transmissão de multiserviços simultâneos. Cada camada hierárquica possui parâmetros de modulação das portadoras OFDM, taxa de *inner code* – FEC e *time interleaving*. Há a possibilidade de segmentação do canal em até três camadas. As divisões dos segmentos em camadas e parâmetros de codificação ficam a cargo do radiodifusor. Todas as configurações devem ser armazenadas no sinal TMCC (*Transmission and Multiplexing Configuration Control*) que será utilizada para que o receptor obtenha as informações necessárias para decodificar corretamente o sinal.

A figura 9 mostra um diagrama em blocos do sistema de transmissão. Nela, pode-se observar a estrutura interna do Modulador, onde é feita a codificação do canal.

Há três modos de espaçamento entre as portadoras OFDM disponíveis para o SBTVD. O primeiro modo, denominado modo 1, impõe ao sistema um espaçamento de 4 kHz entre as portadoras, o segundo modo 2 kHz e o terceiro modo 1 kHz. Como a largura de banda do canal e a taxa de dados mantém-se os mesmos, altera-se para cada modo a quantidade de portadoras e o intervalo de tempo que cada portadora irá transmitir o mesmo símbolo.

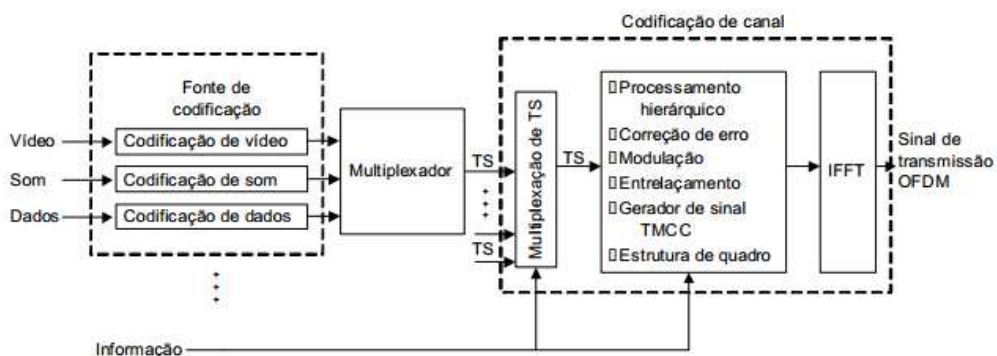


Figura 9 - Diagrama em blocos do sistema de transmissão
Fonte: ABNT (2007)

A tabela 3 mostra informações referentes aos modos do sistema, desde quantidade total de portadoras a duração do símbolo.

A divisão do canal em 14 segmentos visou alocar uma região de proteção contra interferências de outros canais. Um deles não transporta dados, sendo

utilizado como banda de guarda no início e fim do canal. A figura 10 mostra a segmentação da banda de 6 MHz.

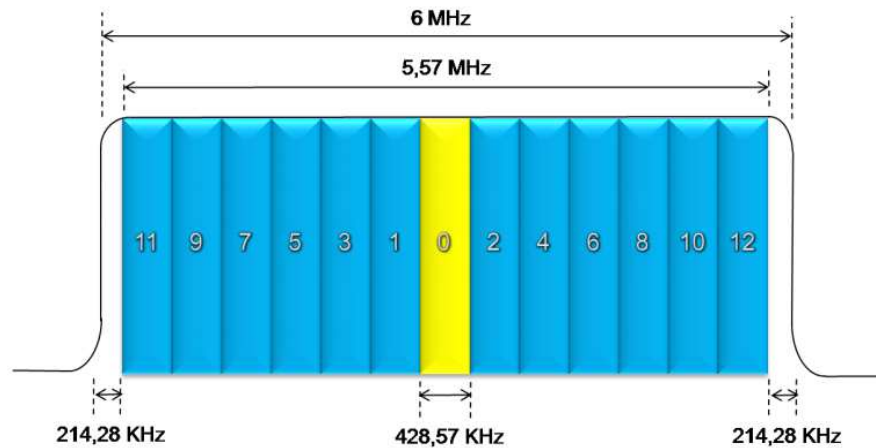


Figura 10 - Divisão do canal de 6 MHz em segmentos
Fonte: Bedicks Junior (2008)

Tabela 3 - Parâmetros do sistema de transmissão

Parâmetros	Valores				
	IG 1/4	IG 1/8	IG 1/16	IG 1/32	
Número de segmentos	13				
Largura do Segmento	$6000/14 = 428,57$ kHz				
Banda ocupada	modo 1	5,575 MHz			
	modo 2	5,573 MHz			
	modo 3	5,572 MHz			
Número de portadoras	modo 1	1405			
	modo 2	2809			
	modo 3	5617			
Métodos de modulação	DQPSK, QPSK, 16QAM e 64QAM				
Duração dos símbolos ativos	modo 1	252 μ s			
	modo 2	504 μ s			
	modo 3	1008 μ s			
Espaçamento de portadoras	modo 1	$Bws/108 = 3,968$ kHz			
	modo 2	$Bws/216 = 1,984$ kHz			
	modo 3	$Bws/432 = 0,992$ kHz			
Duração do intervalo de guarda	modo 1	63 μ s	31,5 μ s	15,75 μ s	7,875 μ s
	modo 2	126 μ s	63 μ s	31,5 μ s	15,75 μ s
	modo 3	252 μ s	126 μ s	63 μ s	31,5 μ s
Duração total dos símbolos	modo 1	315 μ s	283,5 μ s	267,75 μ s	259,875 μ s
	modo 2	628 μ s	565 μ s	533,5 μ s	517,75 μ s
	modo 3	1260 μ s	1134 μ s	1071 μ s	1039,5 μ s
Duração do quadro de transmissão	204 símbolos OFDM				
Codificação de canal	1/2, 2/3, 3/4, 5/6 e 7/8				

Fonte: NBR 15.601 (ABNT, 2007)

As emissoras de TV no Brasil estão adotando a utilização de duas camadas: A e B. A primeira utiliza apenas o segmento zero para a recepção de dispositivos móveis como celulares e receptores portáteis, o chamado *one-seg*; a camada B utiliza 12 segmentos e transporta o sinal para receptores fixos, chamados de *full-seg* ou sinal HDTV. A figura 11 mostra como as emissoras estão utilizando os segmentos e sua divisão em camadas.

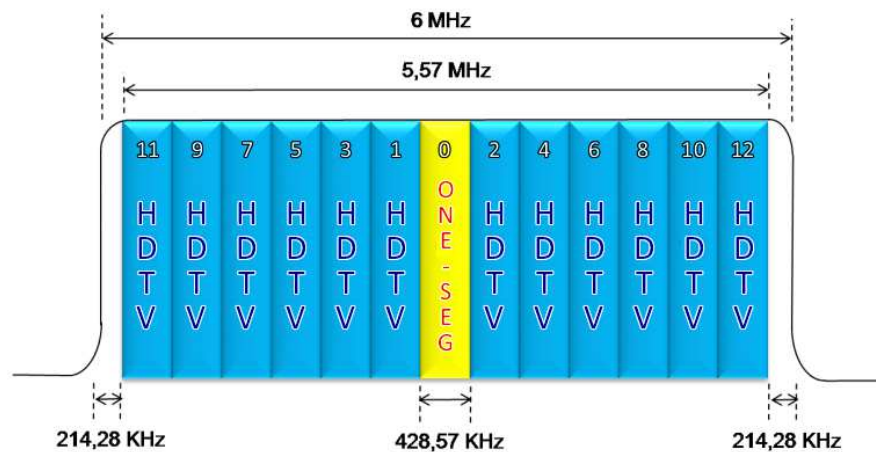


Figura 11 - Divisão do canal em camadas
Fonte: Adaptado de Bedicks Junior (2008)

A flexibilidade de escolha de modulação, FEC e intervalo de guarda diferentes têm como consequência taxas de dados úteis variadas. A tabela 4 mostra algumas combinações possíveis desses parâmetros de transmissão.

Tabela 4 - Taxas de dados disponíveis a cada camada

Combinação	Serviço	Segmentos	Modulação	Modo	FEC	IG	Taxa de Bits [kbps]
1	HDTV	12	16QAM	8k	1/2	1/16	7930,08
	1seg	1	QPSK	8k	1/2	1/16	330,42
2	HDTV	12	16QAM	8k	2/3	1/8	9986,04
	1seg	1	QPSK	8k	2/3	1/8	416,08
3	HDTV	12	64QAM	8k	3/4	1/8	16851,48
	1seg	1	QPSK	8k	3/4	1/8	468,09
4	HDTV	12	64QAM	8k	3/4	1/16	17842,8
	1seg	1	QPSK	8k	2/3	1/16	440,56

Fonte: Autoria própria

A alteração da modulação, FEC e intervalo de guarda variam conforme a necessidade de taxa de dados, cobertura desejada do sinal, estrutura do terreno e

construções, e potência de transmissão irradiada. Com isso, deixa-se o sinal com a maior robustez possível para satisfazer a necessidade da emissora.

Para calcular a taxa de dados, em bits, de outras combinações utilizam-se os dados da tabela 5. Ela mostra a taxa de dados de um único segmento conforme variação dos parâmetros.

Tabela 5 - Taxa de dados de um segmento

Modulação da Portadora	Código Convolucional	Número de TSP transmitidos por quadro [modos 1/2/3]	Taxa de dados [kbps]			
			Intervalo de Guarda 1/4	Intervalo de Guarda 1/8	Intervalo de Guarda 1/16	Intervalo de Guarda 1/32
DQPSK	1/2	12/24/48	280,85	312,06	330,42	340,43
	2/3	16/32/64	374,47	416,08	440,56	453,91
QPSK	3/4	18/36/72	421,28	468,09	495,63	510,65
	5/6	20/40/80	468,09	520,1	550,70	567,39
	7/8	21/42/84	491,50	546,11	578,23	595,76
16QAM	1/2	24/48/96	561,71	624,13	660,84	680,87
	2/3	32/64/128	748,95	832,17	881,12	907,82
	3/4	36/72/144	842,57	936,19	991,26	1021,30
	5/6	40/80/160	936,19	1040,21	1101,40	1134,78
	7/8	42/84/168	983,00	1092,22	1156,47	1191,52
64QAM	1/2	36/72/144	842,57	936,19	991,26	1021,30
	2/3	48/96/192	1123,43	1248,26	1321,68	1361,74
	3/4	54/108/216	1263,86	1404,29	1486,9	1531,95
	5/6	60/120/240	1404,29	1560,32	1652,11	1702,17
	7/8	63/126/252	1474,50	1638,34	1734,71	1787,28

Fonte: NBR 15.601 (ABNT, 2007)

A fim de explicar como o intervalo de guarda é adicionado ao símbolo OFDM, é necessário entender as etapas completas de codificação de canal.

A figura 12 mostra o diagrama de blocos completo dessa etapa do sistema de transmissão de TV Digital.

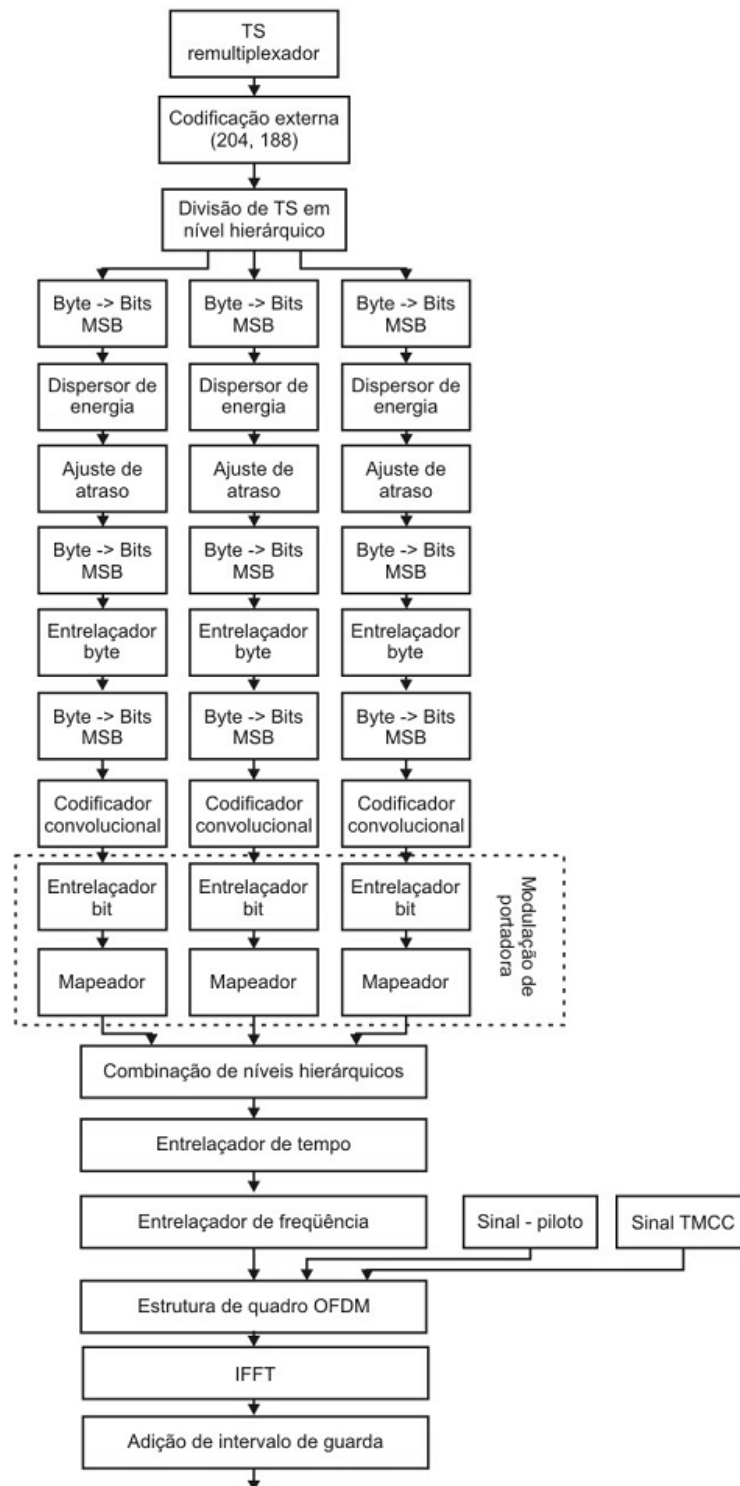


Figura 12 - Diagrama em blocos da codificação de canal
Fonte: ABNT (2007)

Os vários TS (*Transport Stream*) alimentam o remultiplexador, que tem por finalidade arranjar o TSP (*Transport Stream Packet*) para o seu correto processamento. O TS na saída dessa etapa possui quadros multiplex com n pacotes TSP. O valor n é obtido através da tabela 6.

Tabela 6 - Quantidade de TSP dentro de um quadro multiplex

Modo	Número de TSP transmitidos dentro de um quadro multiplex			
	IG 1/4	IG 1/8	IG 1/16	IG 1/32
1	1280	1152	1088	1056
2	2560	2304	2176	2112
3	5120	4608	4352	4224

Fonte: NBR 15.601 (ABNT, 2007)

A figura 13 mostra a organização de um quadro multiplex para o modo 1 e IG 1/8.

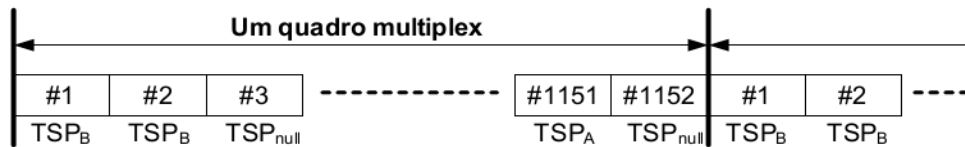


Figura 13 - Estrutura de um quadro multiplex
Fonte: ABNT (2007)

Convertem-se os TS para um sinal em rajada de 188 bytes (utiliza-se um clock quatro vezes o de amostragem da IFFT), e em seguida aplica-se o código de bloco RS (*Reed-Solomon*). Na entrada da codificação há 188 bytes, 1 byte de sincronismo e 187 de dados, e na saída 204 bytes, ou seja, insere-se 16 bytes de paridade. A figura 14 caracteriza o procedimento dessa etapa.

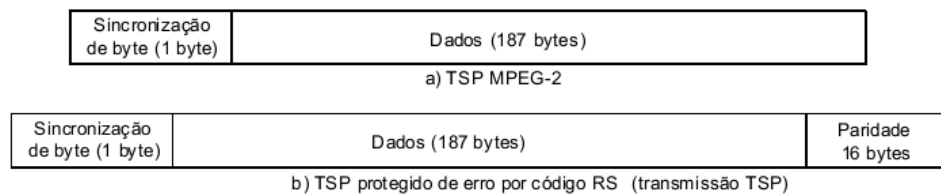


Figura 14 - Formato do TSP MPEG-2 TS e TSP RS
Fonte: ABNT (2007)

Em seguida, divide-se o TS remultiplexado de acordo com a configuração de camadas hierárquicas. No máximo, haverá três fluxos paralelos de processamento de sinais. Os TSP nulos são removidos e o quadro deve deslocar o byte de sincronismo do começo da informação. A figura 15 mostra o que ocorre nesta etapa.

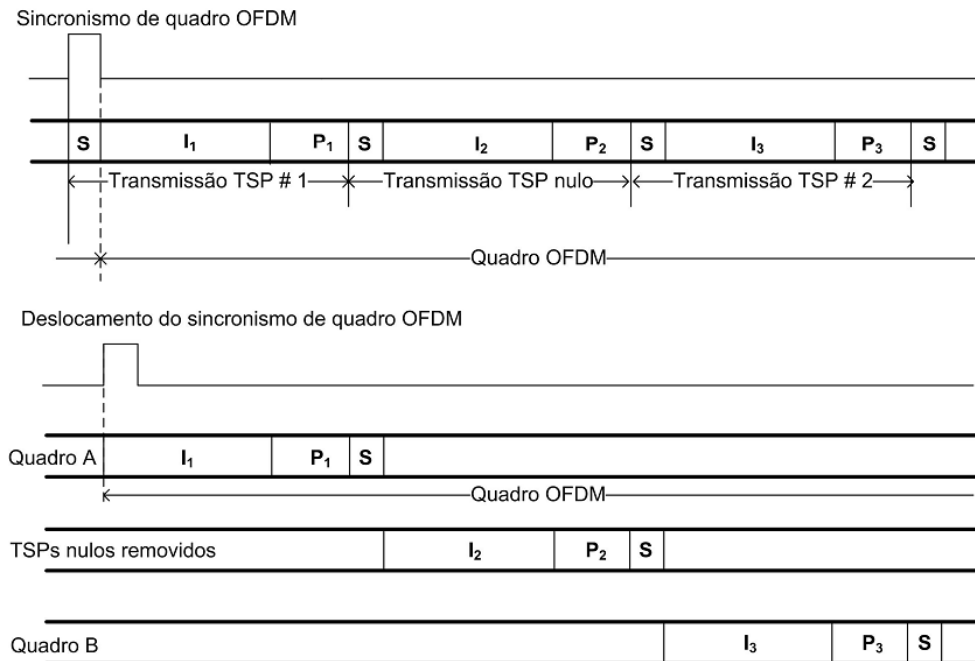


Figura 15 - Exemplo de divisão do TS em dois níveis hierárquicos
Fonte: ABNT (2007)

A etapa de dispersão de energia tem como função evitar que uma sequência de sucessivos zeros ou uns (informações binárias) seja transmitida.

O ajuste de atraso tem como função inserir um *delay*, de forma independente, para cada camada hierárquica. Vale lembrar que cada nível possui características e configurações de parâmetros diferentes, gerando diferentes taxas de bits de transmissão.

O entrelaçador de byte impõe ao TSP de 204 bytes, protegido pela codificação RS e dispersão de energia, uma codificação convolucional. Os bytes são misturados a fim de proteger o sinal de efeitos negativos do canal de transmissão, como o ruído impulsivo.

A codificação interna (*inner code*) é um código convolucional que utiliza o FEC escolhido pelo radiodifusor. A função é inserir bits de redundância aos bits de informação. Os valores possíveis de FEC são 1/2, 2/3, 3/4, 5/6 e 7/8. Por exemplo, o valor 1/2 significa que a cada bit de informação há um bit de paridade, tendo como consequência maior robustez e menor taxa de informação útil transmitida se comparado aos demais valores de *inner code*.

A etapa modulação de portadora impõe um entrelaçamento de bit e o mapeamento conforme a modulação escolhida para cada camada.

Na modulação QPSK, cada símbolo possui dois bits. Esses bits são agrupados conforme a figura 16. Há um atraso de 120 bits imposto antes do mapeamento, caracterizando o entrelaçamento de bit.

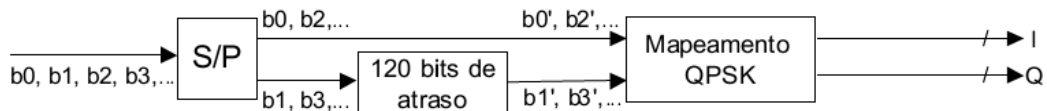


Figura 16 - Entrelaçamento de bit e mapeamento da modulação QPSK
Fonte: ABNT (2007)

A figura 17 representa o mapeamento da modulação QPSK. Esse diagrama também é conhecido como constelação.

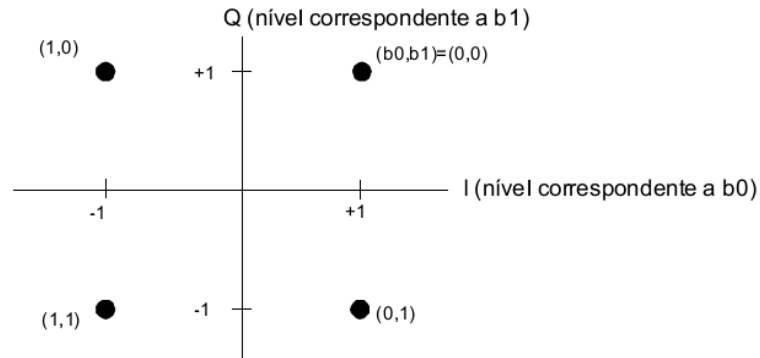


Figura 17 - Constelação da modulação QPSK
Fonte: ABNT (2007)

A modulação 16QAM tem como característica um símbolo carregar quatro bits. O entrelaçamento de bits e atraso imposto a sequência é mostrado na figura 18.

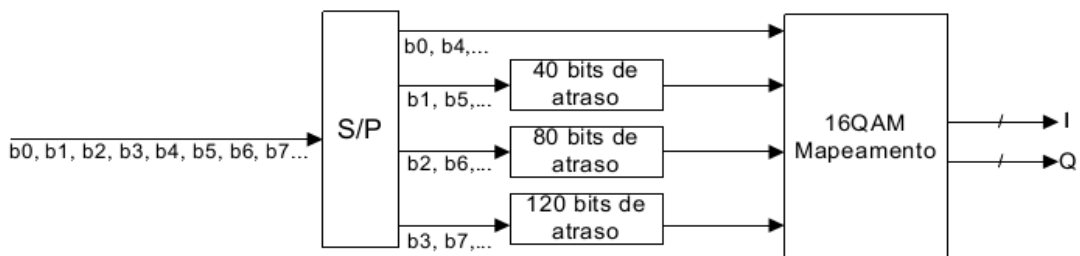


Figura 18 - Entrelaçamento de bit e mapeamento da modulação 16QAM
Fonte: ABNT (2007)

O diagrama de constelação da modulação 16QAM é caracterizado na figura

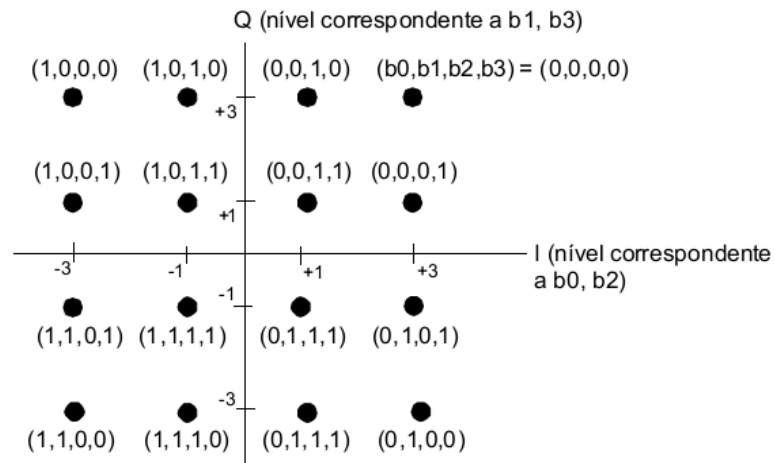


Figura 19 - Constelação da modulação 16QAM
 Fonte: ABNT (2007)

Na modulação 64QAM cada símbolo possui 6 bits. O entrelaçamento de bits é mostrado na figura 20 e o diagrama de constelação na figura 21.

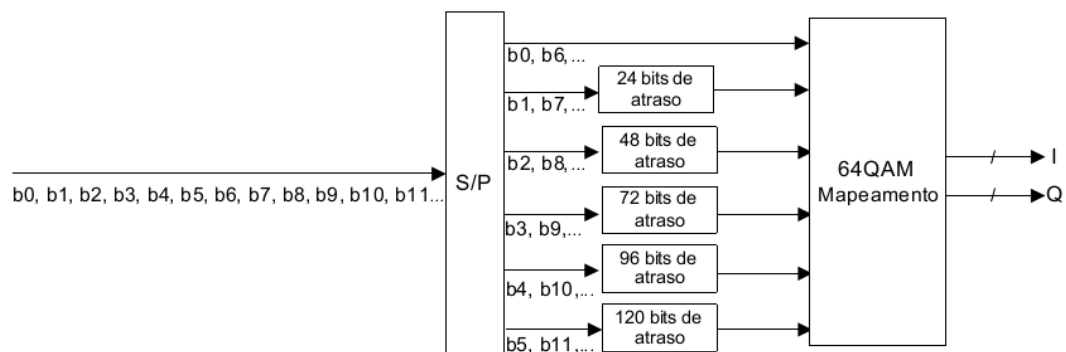


Figura 20 - Entrelaçamento de bit e mapeamento da modulação 64QAM
 Fonte: ABNT (2007)

Depois da modulação das portadoras, as camadas hierárquicas devem ser combinadas. Nessa etapa insere-se o entrelaçamento no tempo e frequência. O primeiro tem a função de inserir atrasos entre portadoras do mesmo segmento, ou seja, os dados não são transmitidos na mesma sequência que foram gerados. O entrelaçamento na frequência gera um embaralhamento nas portadoras de um mesmo segmento. Esses processos são executados a fim de garantir a robustez contra variação de intensidade de campo, interferência multipercurso na recepção móvel e ruído impulsivos.

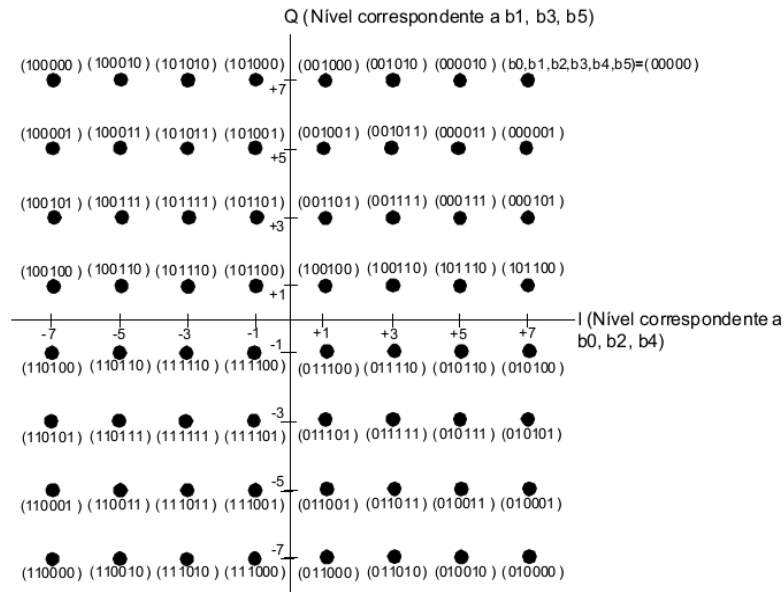


Figura 21 - Constelação da modulação 64QAM
 Fonte: ABNT (2007)

Os efeitos indesejados no canal são mostrados nas figuras 22 e 23. A primeira mostra a proteção do entrelaçamento no tempo contra o ruído impulsivo. Já a segunda a proteção do entrelaçamento na frequência contra o efeito do multipercurso.



Figura 22 - Entrelaçamento no tempo contra o ruído impulsivo
 Fonte: Egberto (2008)

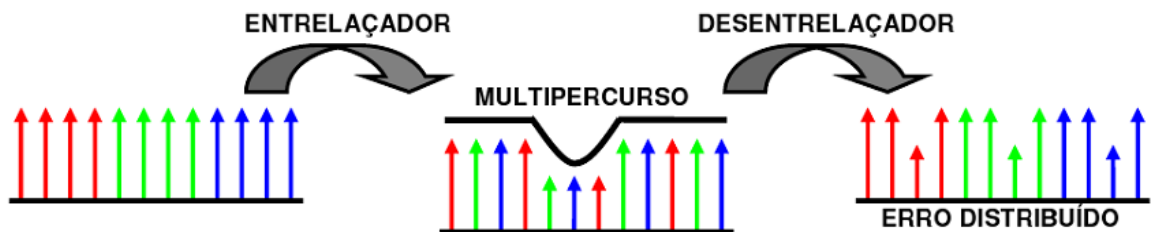


Figura 23 - Entrelaçamento na frequência contra o multipercurso
 Fonte: Egberto (2008)

A informação da TMCC deve ser corretamente decodificada pelo receptor. Por isso, ela recebe uma portadora específica para transmissão.

Por fim, para montar o quadro OFDM final, soma-se após o entrelaçamento na frequência a TMCC e sinais-piloto de sincronização (SP – *Scattered Pilot*, CP – *Continual Pilot*, AC – *Auxiliary Channel*). O sinal SP tem como função sincronizar os segmentos que utilizam modulação síncrona, o sinal CP sincronizar segmentos que utilizam modulação diferencial e AC por carregar informações adicionais. A TMCC é modulada em DBPSK (*Differential Binary Phase Shift Keying*).

Com a formação dos quadros OFDM, após o processo IFFT onde surge o sinal de RF, insere-se um intervalo de guarda. Esse período de tempo (1/4, 1/8, 1/16 ou 1/32 de tempo de duração do símbolo) possui a mesma informação do final de cada símbolo OFDM, dando uma proteção contra ambientes severos de transmissão, como multipercurso e reflexões entre o transmissor e o receptor. O intervalo de guarda tem como função reduzir as dificuldades impostas pela interferência intersimbólica, mas para isso o sinal refletido deve ser detectado pelo receptor num intervalo menor do que a duração do intervalo de guarda. A figura 24 exemplifica a inserção do intervalo de guarda.

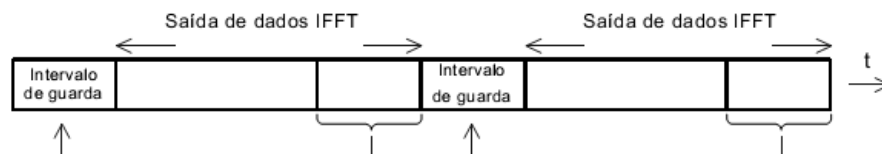


Figura 24 - Inserção do intervalo de guarda do símbolo OFDM
Fonte: ABNT (2007)

2.9. MER

A MER (*Modulation Error Rate*) indica a taxa de erro de modulação, podendo ser comparada a uma relação sinal-ruído de um sinal modulado de forma digital. Ela mede a deterioração do sinal modulado, influenciando diretamente na capacidade do receptor demodular corretamente a informação transmitida.

Ela pode ser definida por:

$$MER = \frac{\sum_{j=1}^N (\tilde{I}_j^2 + \tilde{Q}_j^2)}{\sum_{j=1}^N [(I_j - \tilde{I}_j)^2 + (Q_j - \tilde{Q}_j)^2]} \quad (2.12)$$

$$MER_{dB} = 10 \log \left(\frac{MER}{100} \right) [dB] \quad (2.13)$$

onde N indica a quantidade de símbolos durante um intervalo, I_j e Q_j são as componentes em fase e quadratura, respectivamente, dos j -ésimos símbolos recebidos e \tilde{I}_j e \tilde{Q}_j são componentes idealmente demoduladas em fase e quadratura, respectivamente, dos j -ésimos símbolos recebidos. Ou seja, quanto mais distantes os símbolos estão da sua posição ideal menor o valor da MER. Outra característica da diminuição da MER é o aumento da taxa de erro de bit (BER), que irá gerar erros na recuperação da informação recebida em relação à transmitida (OLIVEIRA, 2008).

Essa medida será bastante importante durante a análise das medidas realizadas em campo.

2.10. SFN e GAP FILLERS

2.10.1. Definição de SFN

A rede de frequência única pode ser definida como um grupo de transmissores transmitindo simultaneamente a mesma informação utilizando o mesmo canal de transmissão numa determinada região (CARVALHO, 2006).

A grande vantagem desse sistema é possibilitar o uso de apenas um canal de frequência, tendo como consequência um uso racional do espectro.

A rede SFN é o oposto da rede MFN (*Multiple Frequency Network*). Esta última tem como característica a utilização de canais diferentes na retransmissão do mesmo sinal. Um exemplo de utilização é a retransmissão da TV Analógica. A figura 25 mostra como a rede MFN trabalha, onde a Geradora trabalha com um canal diferente de suas retransmissoras. A banda total ocupada são cinco canais de 6 MHz, resultando em 30 MHz.

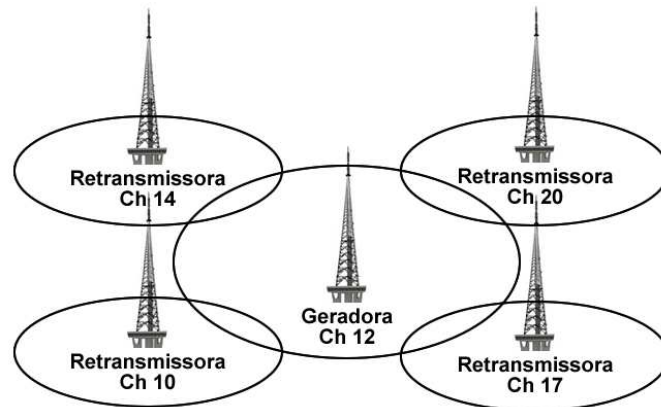


Figura 25 - Exemplo de Rede MFN
 Fonte: Autoria própria

A figura 26 apresenta a rede SFN, com seu canal único para todos os transmissores, tanto na Geradora quanto retransmissoras. Ressalta-se que não se considerou o aumento da quantidade de retransmissoras necessárias. A banda total ocupada é de apenas um canal, ou seja, 6 MHz.

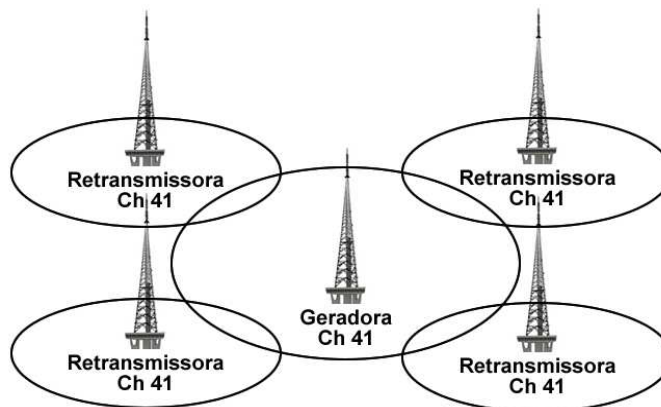


Figura 26 - Exemplo de Rede SFN
 Fonte: Autoria própria

Um fato importante para implantação dessa rede de frequência única é saber como a interferência intersimbólica será tratada pelo sistema e se na região de sobreposição das coberturas os sinais dessa rede estarão dentro do intervalo de guarda.

A rede SFN para TV Digital pode ser encontrada de dois tipos. São eles:

- Rede Distribuída
- Rede de Repetição

2.10.2. SFN Distribuída

Essa rede tem como característica utilizar a mesma frequência nos transmissores de uma determinada região; a informação transmitida deve ser exatamente igual, bit a bit; e o sinal que alimenta o transmissor na retransmissora é o BTS (*Broadcast Transport Stream*).

O BTS deve estar presente na retransmissora e ser exatamente o mesmo fornecido pela Geradora. Haverá um pequeno atraso em relação ao original, mas que será corrigido com a correta configuração da rede. A fim de satisfazer essa condição, deve-se implementar uma forma de levar o sinal de BTS da Geradora até as retransmissoras, como por exemplo, por fibra óptica, microondas ou satélite. Esse fato é considerado uma desvantagem desse tipo de SFN.

A figura 27 caracteriza a rede Distribuída com adição dos enlaces da Geradora para as retransmissoras do BTS.

Um elemento importante nesse tipo de rede é o insersor de atraso, cuja função é atrasar o sinal o sinal do BTS na entrada do transmissor a fim de que todos os equipamentos de transmissão da rede iniciem a propagação no mesmo instante de tempo. A figura 28 mostra onde o insersor está presente no sistema.

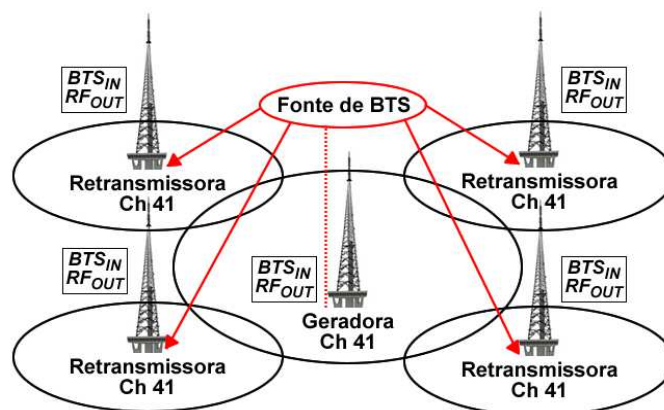


Figura 27 - Rede de Frequência Única Distribuída
Fonte: Autoria própria

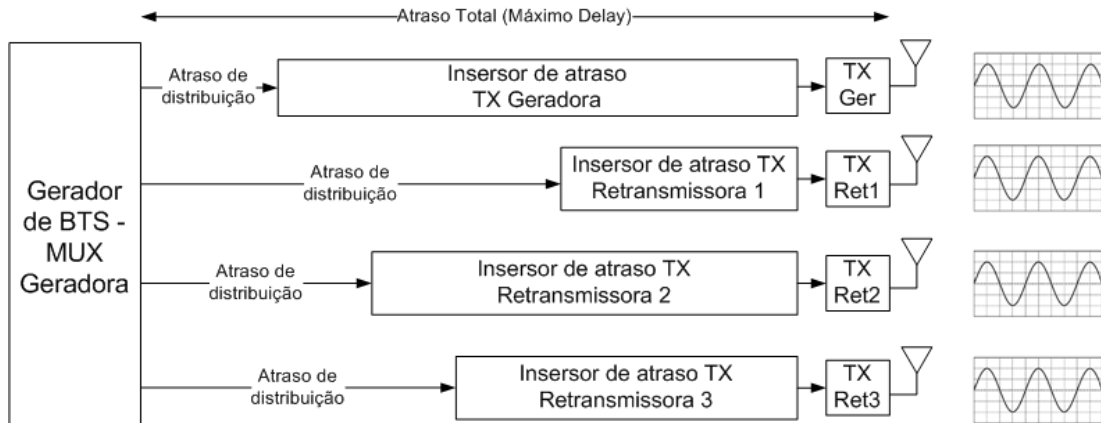


Figura 28 - Insensor de atraso na rede SFN
Fonte: Autoria própria

As redes SFN Distribuídas podem ser classificadas quanto ao modo de operação. São eles:

- **Modo Dinâmico:** neste modo há a necessidade de referenciar todos os transmissores e multiplexador, presente na Geradora, com o sinal de 1PPS (Pulso por segundo). O atraso para cada transmissor é calculado dinamicamente conforme os parâmetros configurados no MUX. A vantagem é a facilidade de configuração para crescimento da rede, já que o atraso é calculado automaticamente. A desvantagem é a necessidade do sinal 1PPS em todos os retransmissores e na Geradora.

Os parâmetros de configuração e cálculo do atraso local estão presentes no campo NSI (*Network Synchronization Information*). Para cálculo do atraso local (LOCAL_DELAY) inicialmente soma-se o atraso imposto pelo caminho (PATH_DELAY) para levar o BTS da Geradora a retransmissora e o atraso imposto pelo processamento no transmissor desde a entrada do BTS e saída do símbolo OFDM (PROCESS_DELAY), e esse valor deduzir do atraso máximo configurado no MUX (MAX_DELAY). O valor de LOCAL_DELAY será imposto pela retransmissora a fim de transmitir ao mesmo tempo com a Geradora.

O valor de PATH_DELAY é calculado pelo transmissor baseado no sinal de 1PPS. No MUX há um marcador que mede a diferença de tempo entre o início do pulso do 1PPS e o início do primeiro pacote de um quadro de multiplexação. No transmissor o processo de

medição é repetido, e a diferença entre os contadores representa o atraso imposto pelo caminho.

- **Modo Estático:** neste modo é informado aos transmissores um valor absoluto de atraso (TIME_OFFSET). Porém, para calcular e configurar esse parâmetro é necessário conhecer o atraso de distribuição do BTS para cada retransmissora, deixando esse modo de operação mais complexo do que o dinâmico. O crescimento da rede pode gerar o recálculo e reconfiguração de todos os deslocamentos de atraso. A vantagem desse modo é que o sinal 1PPS não é necessário para referenciar os transmissores e multiplex.

O dimensionamento das redes SFN é de extrema importância para o perfeito funcionamento do sistema. Há a necessidade de conhecer ou simular a área de cobertura dos transmissores a fim de identificar a abrangência da área de sobreposição dos sinais de transmissores diferentes. Para fins de cálculo, entende-se como região de sobreposição onde os sinais de mesma frequência possuem uma diferença de potência menor que 30 dB.

A figura 29 mostra o caso mais simples, onde não há sobreposição dos sinais e, por conseguinte não há necessidade de ajuste e sincronização da rede SFN. Os dois transmissores trabalham com a mesma frequência.

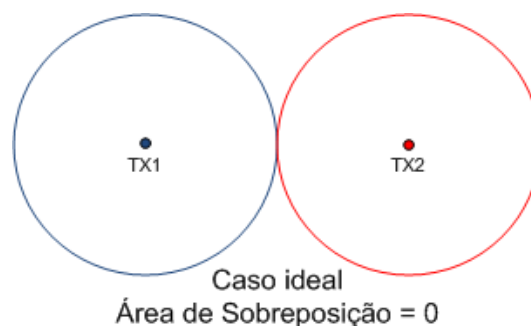


Figura 29 - Dimensionamento de rede SFN - caso ideal
Fonte: Adaptado de LIMA; MACHADO; BARCIA (2013)

O segundo caso possível é o chamado caso real. Nele há sobreposição dos sinais de mesma frequência, mas devido o intervalo de guarda ainda é possível demodular o sinal corretamente. Há a necessidade de sincronizar e configurar corretamente a rede SFN. A figura 30 apresenta esse caso.

A medida d corresponde à distância máxima da área de sobreposição e deve satisfazer a seguinte condição:

$$d < TG * 3 * 10^8 [m]$$

onde TG corresponde ao tempo de guarda, ou seja, a duração do intervalo de guarda. Essa informação é encontrada na Tabela 3.

Por exemplo, para o caso de IG 1/16 e modo 3 o TG é 63 μ s. Portanto:

$$d < 63 * 10^{-6} * 3 * 10^8$$

$$d < 18900 [m]$$

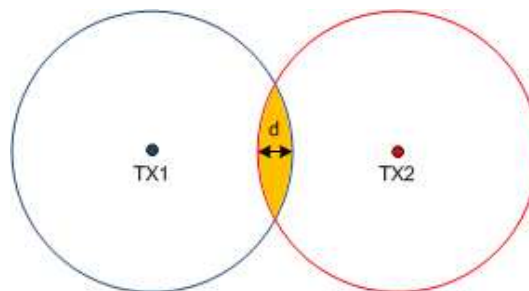


Figura 30 - Dimensionamento da rede SFN - caso real
 Fonte: Adaptado de LIMA; MACHADO; BARCIA (2013)

O terceiro caso é o chamando crítico, onde a distância máxima d é maior do que o intervalo de guarda consegue proteger. Os transmissores trabalham sincronizados.

$$d > TG * 3 * 10^8 [m]$$

Nos pontos em que os sinais chegam espaçados no tempo maior que o intervalo de guarda, o mais atrasado é considerado pelo receptor como ruído interferente. A figura 31 caracteriza essa situação.

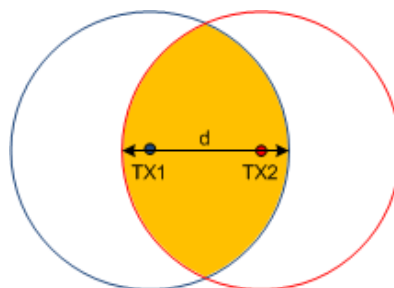


Figura 31 - Dimensionamento da rede SFN - caso crítico
 Fonte: Adaptado de LIMA; MACHADO; BARCIA (2013)

A fim de solucionar esse último caso pode-se focar em algumas possibilidades. A primeira seria reduzir a potência irradiada nos transmissores para que a área de sobreposição diminuísse e por consequência a distância máxima d passaria a satisfazer a condição do caso real. A consequência negativa dessa

solução é que se perde área de cobertura, havendo a necessidade de aumentar a quantidade de transmissores na rede para suprimir essa diminuição do alcance do sinal de RF. A segunda solução seria focar numa região de interesse dentro da área de sobreposição e garantir que os sinais irão chegar ao receptor nesse ponto dentro do intervalo de guarda. O ideal é que a região rejeitada seja uma área não habitada.

Destaca-se o fato da distância entre os transmissores não ser a medida para dimensionamento da rede e sim, a distância máxima da área de sobreposição das áreas de cobertura.

2.10.3. SFN de Repetição

A rede de repetição também tem como característica a utilização da mesma frequência nos transmissores, transmitir a mesma informação bit a bit da Geradora, mas o sinal que alimenta o transmissor é o próprio sinal de rádio frequência da emissora. Neste caso a retransmissora deve receber o sinal da emissora com nível suficiente para alimentar o transmissor de Repetição, que também é chamado de *Gap Filler*. As principais funções desse tipo de rede é cobrir falhas de cobertura, reforçar o sinal da Geradora em áreas de interesse e melhorar a recepção do serviço portátil one-seg.

O *Gap Filler* é alimentado com o sinal que está no ar, não sendo necessário enlace entre a Geradora e a retransmissora.

A dificuldade de trabalhar com o *Gap Filler* é o fato do sinal retransmitido ser somado ao recebido da Geradora e realimentar o transmissor. Para atenuar a realimentação utiliza-se o cancelador de eco (*Echo Canceller*), processo realizado internamente no *Gap Filler*.

A figura 32 mostra como é a Rede de Repetição com a utilização de *Gap Fillers*.

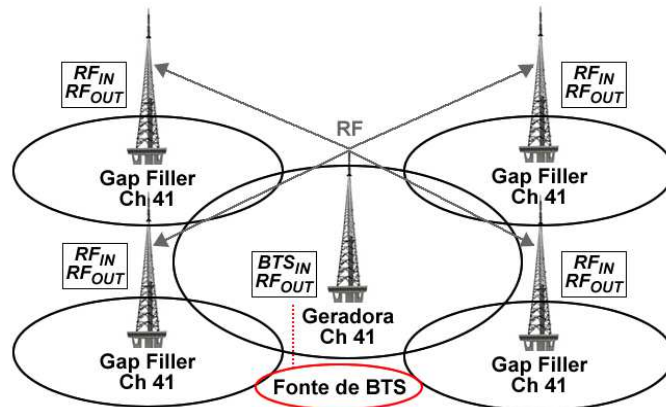


Figura 32 - Rede de Frequência Única de Repetição - *Gap Filler*
Fonte: Autoria própria

A correta escolha e instalação das antenas de recepção e transmissão é um ponto fundamental a fim de garantir a estabilidade do *Gap Filler*. O cancelador de eco impõe níveis máximos de acoplamento do sinal transmitido na antena de recepção, caso contrário o transmissor é desligado ou tem sua potência reduzida automaticamente. A figura 33 mostra o princípio do funcionamento do cancelador de eco. A condição de cancelamento é $W(\omega) = G(\omega)C(\omega)$.

O cancelador de eco trabalha com a detecção dos ecos em relação ao sinal principal e atenuação dos mesmos, a fim de que o sinal transmitido sofra o menos possível com a retroalimentação.

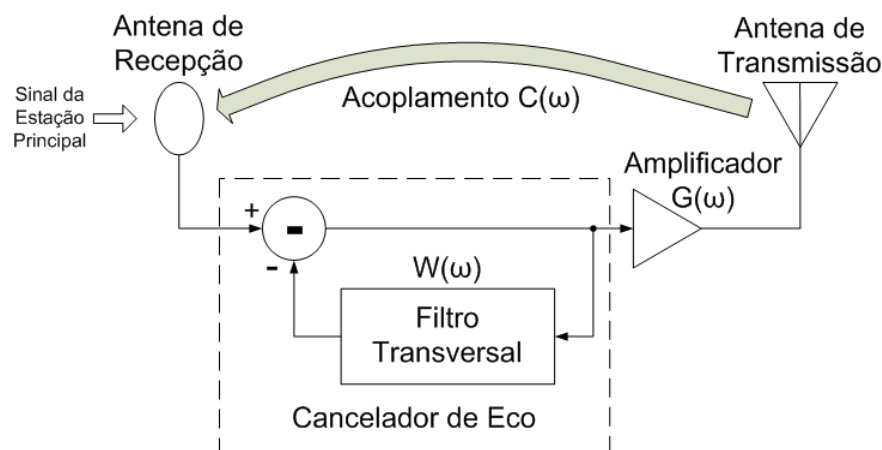


Figura 33 - Cancelador de Eco
Fonte: Adaptado de TAKAHASHI (2007)

A configuração do *Gap Filler* permite habilitar ou desabilitar o cancelador de eco. Em situações onde há excelente isolamento entre as antenas de transmissão e recepção, ou seja, há um pequeno valor de acoplamento do sinal transmitido sendo recebido pela antena de recepção, o cancelador de eco pode ser desligado. Com

isso, há redução do tempo de processamento interno. As figuras 34 e 35 mostram uma análise de multipercurso nos dois casos. Esses gráficos mostram o sinal principal e realimentações sendo recebidos no analisador de espectro, simulando a situação de um receptor. Além disso, podem-se verificar as linhas verticais pontilhadas verdes demarcando os sinais que estão protegidos pelo intervalo de guarda. Como os sinais estão dentro desse intervalo a demodulação é realizada sem problemas. A primeira figura apresenta o sistema com cancelador de eco desligado e a segunda com ele habilitado. Percebe-se na segunda imagem que as realimentações de menor intensidade são reduzidas consideravelmente e a primeira realimentação de maior intensidade é atenuada em mais de 14 dB.

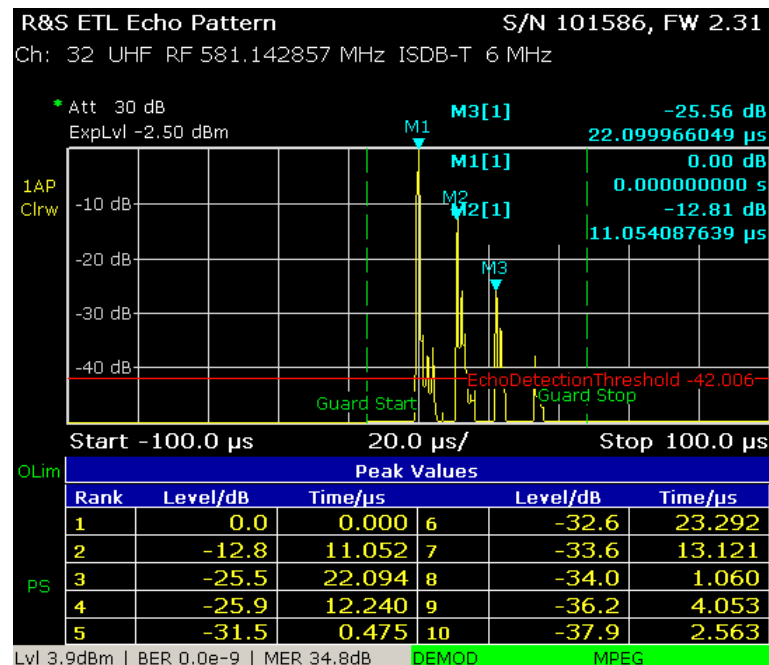


Figura 34 - Análise de multipercurso com Cancelador de Eco desligado

Fonte: Autoria própria

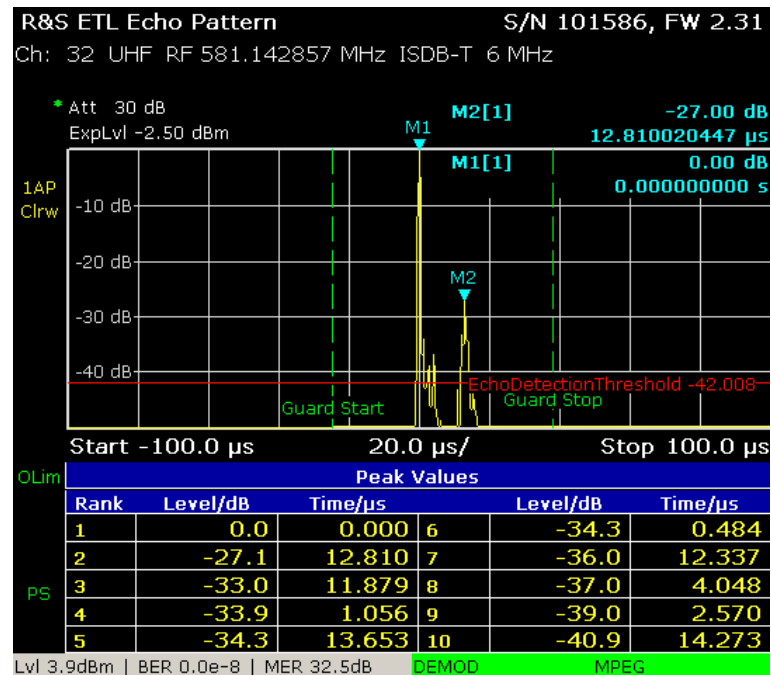


Figura 35 - Análise de multipercurso com Cancelador de Eco ativado

Fonte: Autoria própria

2.10.4. Vantagens e Desvantagens

As Redes Distribuídas e de Repetição apresentam vantagens e desvantagens. A primeira tem como vantagens a independência entre os transmissores, se o equipamento da Geradora falhar as retransmissoras continuam a funcionar; não há limitação de potência, já que não há realimentação do sinal de RF; não há degradação da relação sinal-ruído; e como não há o cancelador de eco não existe atraso devido esse processo. A desvantagem é a necessidade de enlaces para levar o BTS da Geradora até às retransmissoras, demandando custos de implantação e manutenção. O segundo tipo de rede tem a vantagem de utilizar o sinal de RF na entrada do *Gap Filler*, não havendo a necessidade de enlaces dedicados para transportar sinal da Geradora às retransmissoras. As desvantagens são a dependência do sinal de RF da Geradora, se este falhar toda a rede para de transmitir; há limitação de potência do *Gap Filler* devido a realimentação do sinal retransmitido; degradação da relação sinal-ruído; o *delay* imposto pelo *Gap Filler* é intrínseco do equipamento, não havendo como configurar este parâmetro.

3. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Este capítulo apresenta os resultados obtidos na ativação da rede SFN Distribuída na região da RPC TV Paranaíba e a utilização de *Gap Filler* para aumentar a cobertura da RPC TV Curitiba.

3.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A emissora de Paranaíba possui um transmissor de 2,3 kW e a retransmissora de Cianorte um de 250W. O sinal digital de Paranaíba chega a algumas regiões de Cianorte, o que foi comprovado com a medição em campo, gerando uma região de interesse com a interferência dos dois sinais. Inicialmente os transmissores foram ligados sem sincronização, apenas estavam trabalhando no mesmo canal 42. A diferença no tempo de início de transmissão do sinal OFDM dos dois transmissores está no fato de Cianorte esperar o sinal BTS sair de Paranaíba e chegar até ela através de enlace dedicado a transportar esse tipo de sinal. O atraso imposto pela rota está na ordem de milissegundos, o que implica que os sinais de RF dos dois transmissores na região de interesse chegarão fora do intervalo de guarda.

Medidas em campo apontaram problemas referentes à cobertura do segmento *one-seg* destinado aos dispositivos móveis em algumas áreas de Cianorte. Como esses receptores portáteis utilizam antenas internas omni, ambos os sinais são recebidos com níveis de intensidade consideráveis e um deles está fora do intervalo de guarda. Para a banda *full-seg* o problema podia ser contornado com o apontamento da antena externa UHF para a antena de transmissão da retransmissora de Cianorte. Com isso, o sinal de Cianorte era recebido com no mínimo 20 dB a mais que o sinal de Paranaíba, o que era suficiente para o receptor demodular o sinal.

A fim de corrigir esse problema foi proposta a sincronização dos transmissores, e com isso a região de interesse receberia os dois sinais dentro do intervalo de guarda.

Com auxílio do setor de Projetos de Telecomunicações da RPC TV definiu-se os parâmetros de configuração da rede SFN. Com o simples fato dos transmissores iniciarem a transmissão do mesmo frame OFDM ao mesmo tempo pode-se concluir que os sinais serão recebidos no mesmo instante de tempo no

ponto central entre as duas cidades. Mas, como a região de interesse fica próxima de Cianorte, há a necessidade de atrasar em alguns microsegundos o transmissor da retransmissora. Com isso, a região de interesse passa a receber sinais dentro do intervalo de guarda.

Com os valores teóricos calculados, passou-se a etapa prática. Inicialmente configurou-se o MUX na emissora de Paranavaí a fim de trabalhar com os parâmetros corretos de SFN. A seguir habilitou-se a função SFN nos transmissores de Paranavaí e Cianorte. Após a sincronização dos transmissores, partiu-se para as medidas a serem realizadas em campo.

O segundo caso a ser descrito é a utilização de *Gap Filler* na cidade de Araucária para melhorar a cobertura da RPC TV Curitiba. A cidade em questão pertence à região metropolitana de Curitiba. O posto de retransmissão está situado no terraço do Edifício Intercontinental, no centro de Araucária. O transmissor de Curitiba, localizado no bairro Mercês, trabalha com 8 kW de potência e IG 1/8. Um levantamento feito pela RPC TV apontou que algumas áreas da cidade em questão apresentavam áreas de sombras, e nestes pontos o nível de sinal estava no limiar de recepção ou não era possível demodular o sinal da RPC TV. Escolheu-se a utilização do *Gap Filler* para cobrir essa cidade. As medidas foram realizadas com o *Gap Filler* operando com 40 W de potência.

Uma das medidas utilizadas para a análise é a MER. Através de medidas realizadas em laboratório chegou-se a conclusão que, para alguns receptores, valores menores que 20 dB o receptor começa a ter uma taxa de erro de bit elevada, dificultando a demodulação correta do sinal. Esse valor pode ser considerado o valor mínimo de MER para o sinal de TV digital.

3.2. PROCEDIMENTOS UTILIZADOS – SFN DISTRIBUÍDA

A aquisição dos dados foi realizada na cidade de Cianorte com o carro de pesquisa de sinal da RPC TV. Esse veículo é equipado com alimentação de energia, mastro telescópico pneumático, antena UHF, analisador de espectro e monitor de TV com receptor digital ISDB-Tb.

Os equipamentos utilizados para aquisição das medidas após sincronização dos transmissores foram:

- Analisador de Espectro (Modelo: ETL TV Analyzer, Fabricante: Rohde&Schwarz).
- Antena UHF (Modelo: PQUT-1000, Fabricante: Proeletronic).
- Cabo Coaxial RGC-6.

A antena foi instalada no mastro do carro, ficando a uma altura de 6 metros em relação ao chão. Essa altura foi utilizada para simular uma instalação de uma antena externa UHF no telhado de uma casa/residência. Foram feitos dois apontamentos, um para a antena de transmissão de Paranavaí e outro para a de Cianorte. As medidas dos dois apontamentos foram coletadas.

Foram escolhidos quatro pontos de interesse a serem medidos, dois deles na cidade de Cianorte, um em Terra Boa e outro em Indianópolis. Esses pontos foram estrategicamente selecionados porque há o interesse de analisar como os sinais se interferem nessas regiões após a sincronização dos transmissores. A lista de localização dos pontos é mostrada na tabela 7. Em seguida, a figura 36 mostra os pontos e as cidades no Google Earth.

Tabela 7 - Pontos para análise da rede SFN na região de Cianorte

Ponto	Cidade	Coordenadas	
		Latitude	Longitude
Ponto Terra Boa	Terra Boa	23° 46' 11,70"S	52° 27' 05,90"W
Ponto Indianopolis	Indianopolis	23° 28' 33,90"S	52° 41' 37,90"W
Ponto Cianorte 1	Cianorte	23° 38' 49,00"S	52° 38' 04,00"W
Ponto Cianorte 2	Cianorte	23° 39' 26,60"S	52° 34' 54,70"W

Fonte: Aatoria própria

O foco inicial foi os dois pontos em Cianorte. Logo em seguida analisou-se o ponto Terra Boa e por último o ponto Indianópolis. No princípio estava sendo trabalhado com IG 1/16. Os três primeiros pontos foram feitos com essa configuração. Em Indianópolis observou-se que dependendo do apontamento os sinais estavam fora do intervalo de guarda, e o receptor não conseguia demodular o sinal nesse caso.

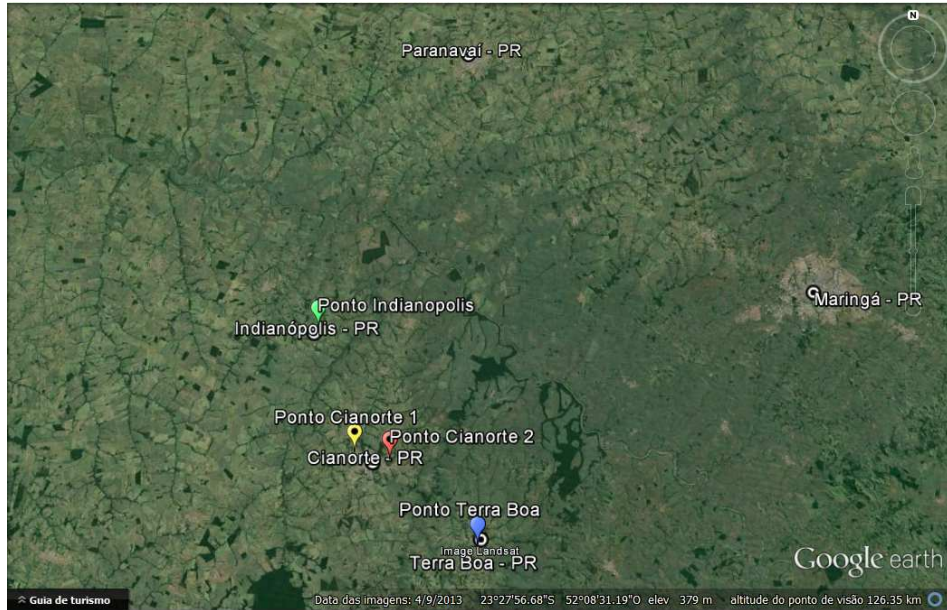


Figura 36 - Pontos para análise da rede SFN na região de Cianorte
 Fonte: Google Earth (2013)

Conforme previsto no projeto, mudado o intervalo de guarda para 1/8 e analisado o resultado no ponto Indianópolis. Após a alteração do IG os sinais passaram a ficar dentro dele. A figura 37 mostra o cálculo teórico das regiões onde os dois sinais estão fora do IG. A mancha em vermelho escuro indica a região fora do intervalo com o MUX configurado em 1/16. Já a mancha vermelha clara a região fora do IG com o MUX configurado em 1/8.

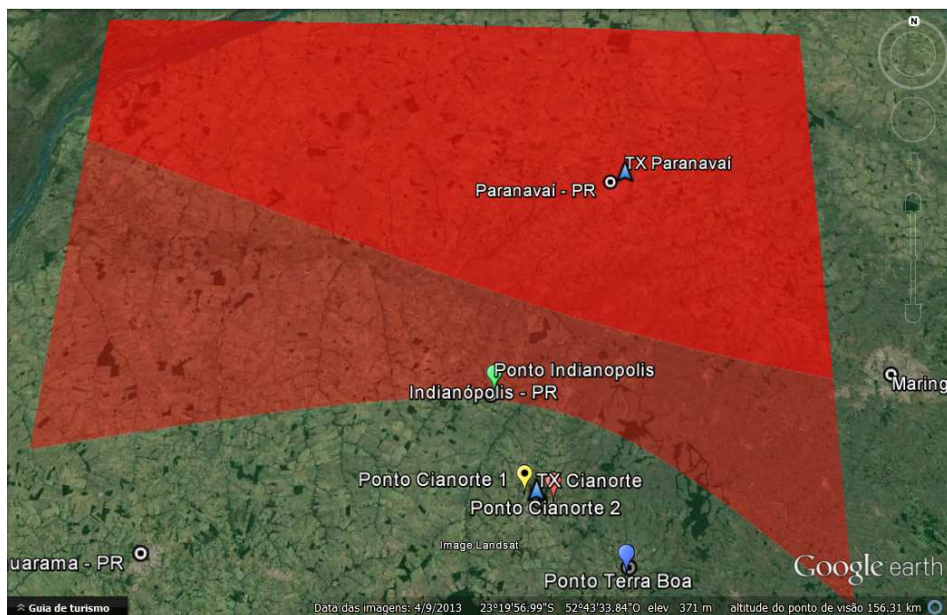


Figura 37 - Região onde os sinais estão fora do IG (casos 1/16 e 1/8)
 Fonte: Google Earth (2013)

As tabelas 8 e 9 mostram os atrasos teóricos na recepção dos dois sinais calculados para IG 1/16 e 1/8, respectivamente. Os valores que serão utilizados são os atrasos com *offset* para comparação com os resultados práticos. Caso o atraso seja negativo significa que o sinal de Paranavaí chega antes do de Cianorte. Caso seja positivo é o de Cianorte que chega antes do de Paranavaí.

Tabela 8 - Atrasos teóricos entre sinais calculados para IG 1/16

Ponto	Atraso Sincronizado sem Offset [μs]	Atraso com Offset [μs]
Ponto Terra Boa	190,6	24,34
Ponto Indianopolis	95,79	-70,47
Ponto Cianorte 1	211,06	44,8
Ponto Cianorte 2	209,84	43,58

Fonte: Autoria própria

Tabela 9 - Atrasos teóricos entre sinais calculados para IG 1/8

Ponto	Atraso Sincronizado sem Offset [μs]	Atraso com Offset [μs]
Ponto Terra Boa	190,6	87,76
Ponto Indianopolis	95,79	-7,05
Ponto Cianorte 1	211,06	108,22
Ponto Cianorte 2	209,84	107

Fonte: Autoria própria

3.3. RESULTADOS EM CAMPO – SFN DISTRIBUÍDA

A apresentação dos resultados será feita de forma comparativa entre o apontamento para a antena da emissora em Paranavaí e a antena da retransmissora em Cianorte, nesta ordem.

O primeiro ponto medido foi o “Cianorte 1”. A figura 38 mostra a comparação das duas medidas de análise de multipercurso. No apontamento para a emissora percebe-se que o sinal mais forte é o que a antena está recebendo do transmissor de Paranavaí, já que ele está atrasado em relação ao de Cianorte. No apontamento para Cianorte a intensidade dos sinais muda, mas o atraso entre eles se mantém. O valor prático do atraso (45,50 μs) está bem próximo do valor teórico (44,8 μs). O nível de intensidade de sinal está mais forte no apontamento para Cianorte. Outra

medida importante é a MER, que também se apresentou melhor no apontamento para a retransmissora.

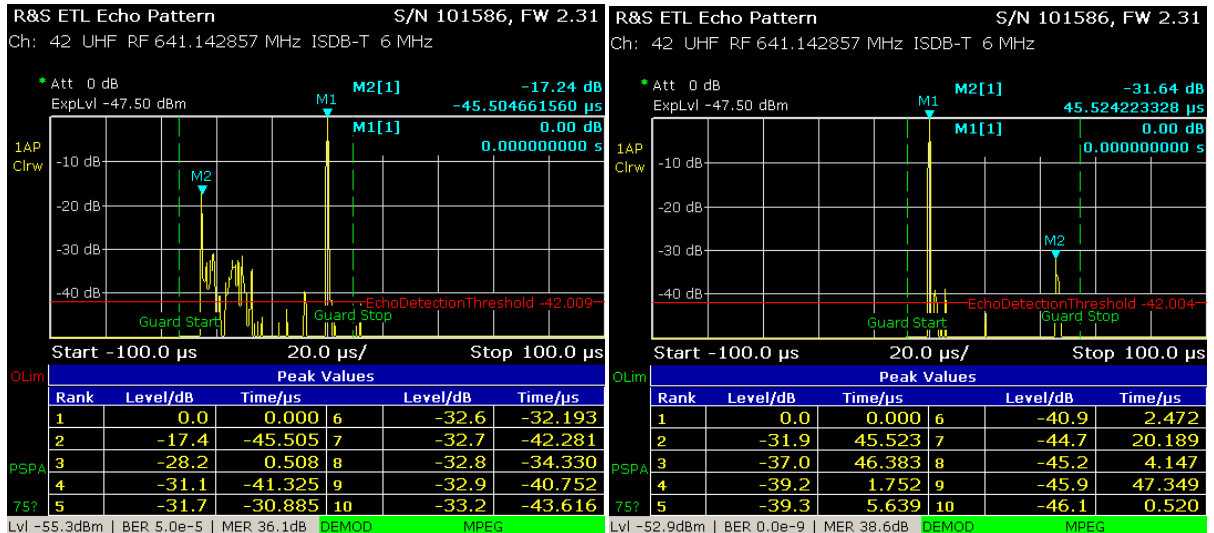


Figura 38 - Análise de multipercuro no Ponto Cianorte 1 IG 1/16

Fonte: Autoria própria

O segundo ponto medido foi o “Cianorte 2”. A figura 39 mostra a comparação das duas medidas de análise de multipercuro. No apontamento para a emissora percebe-se que o sinal mais forte é o que a antena está recebendo do transmissor de Paranavaí, já que ele está atrasado em relação ao de Cianorte. No apontamento para Cianorte a intensidade dos sinais muda, mas o atraso entre eles se mantém. O valor prático do atraso (43,58 µs) está exatamente igual ao valor teórico (43,58 µs). Neste caso o nível de sinal do segundo apontamento em relação ao primeiro é aproximadamente 12 dB maior e a MER é 35,4 dB contra 22,6, facilitando a demodulação por parte do receptor.

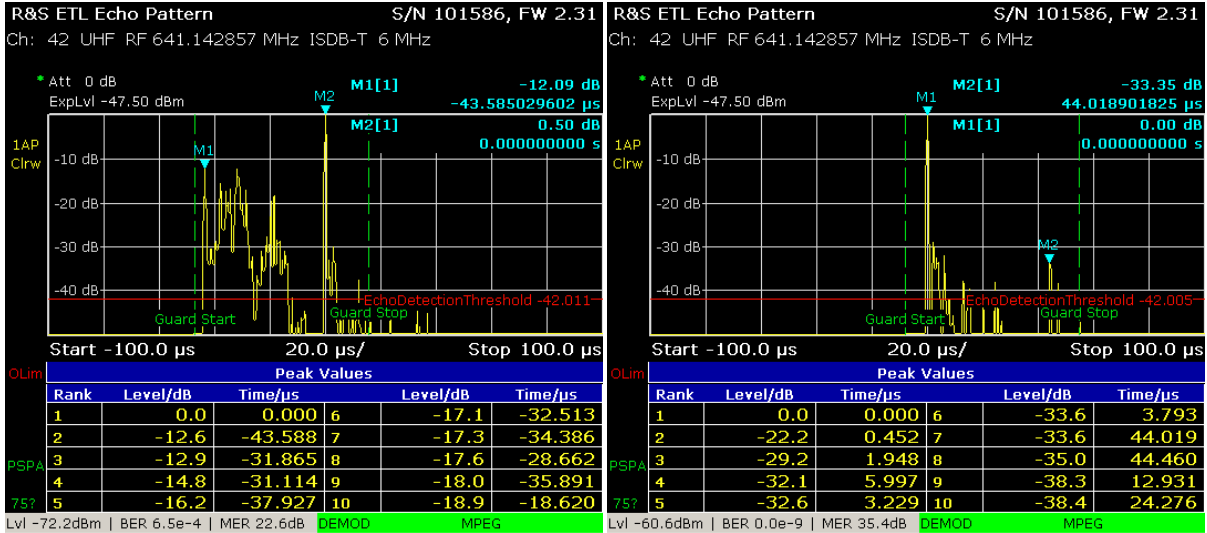


Figura 39 - Análise de multipercorso no Ponto Cianorte 2 IG 1/16
 Fonte: Autoria própria

O terceiro ponto medido foi o “Terra Boa”. A figura 40 mostra a comparação das duas medidas de análise de multipercorso. O padrão de qual sinal está mais forte *versus* apontamento se mantém o mesmo dos pontos anteriores. O valor prático do atraso (24,77 µs) está bem próximo ao valor teórico (24,34 µs). Neste caso ambos os apontamentos apresentam níveis de sinal próximos, mas no primeiro apontamento a MER é maior e a taxa de erro de bit menor.

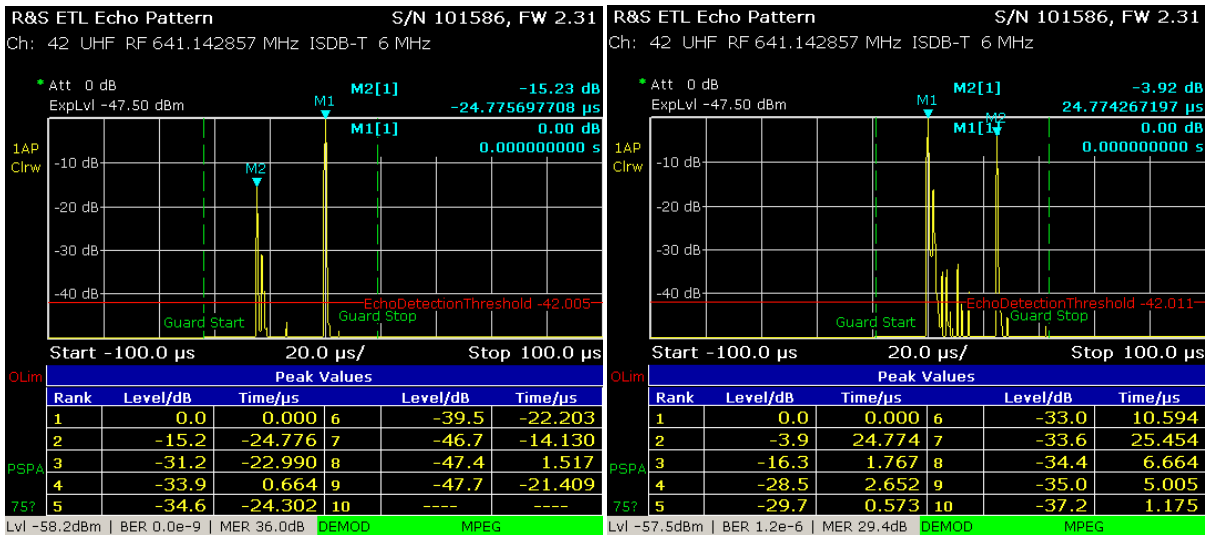


Figura 40 - Análise de multipercorso no Ponto Terra Boa IG 1/16
 Fonte: Autoria própria

O quarto ponto medido foi o “Indianapolis”. Nele há uma situação interessante. A figura 41 mostra a comparação das duas medidas de análise de multipercorso. Com o IG 1/16 há sinal fora do intervalo de guarda (linha pontilhada

vertical verde) no apontamento para Paranavaí, que gera dificuldades para o receptor ISDB-Tb demodular, pois passa a ocorrer interferência entre os símbolos. Conforme calculado, o sinal de Paranavaí chega antes do sinal de Cianorte. No caso do apontamento para Cianorte o equipamento não conseguiu receber o sinal de Paranavaí com nível suficiente para ser mostrado na imagem. Neste caso no segundo apontamento apresentou um sinal com maior nível, melhor MER e menor taxa de erro de bit.

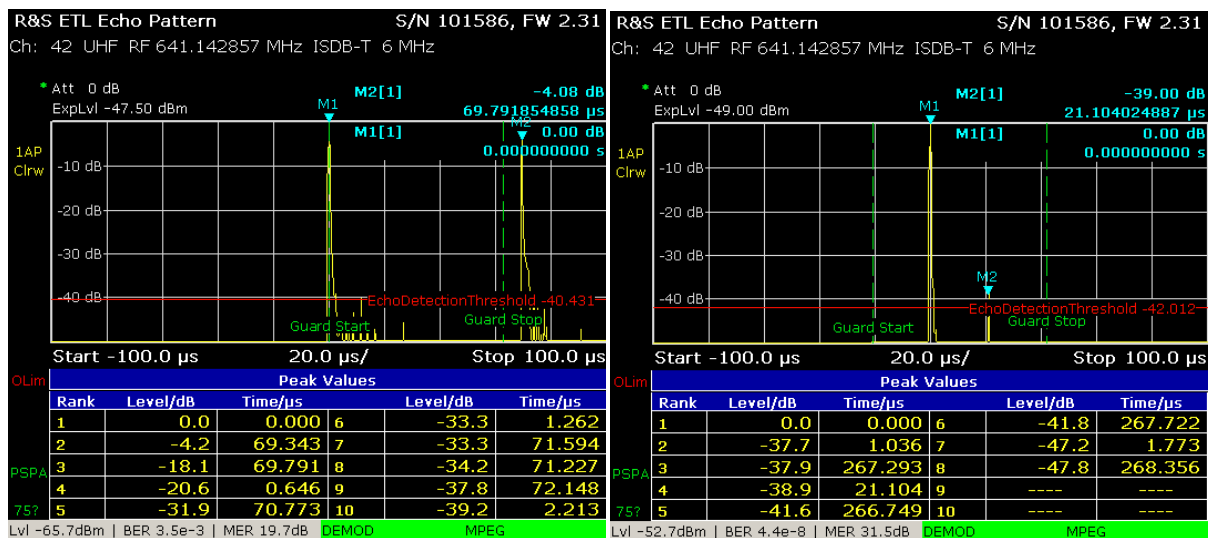


Figura 41 - Análise de multipercurso no Ponto Indianopolis IG 1/16
Fonte: Autoria própria

A cidade de Indianopolis, assim como outras entre Paranavaí e Cianorte, para terem a recepção dos dois sinais dentro do intervalo de guarda seria necessário alterá-lo de 1/16 para 1/8. Ou seja, a duração do intervalo, operando em modo 3, passou de 63 µs para 126 µs. As conversões desses tempos para distâncias (comprimento da região de interferência dentro do IG) resultam em 18,9 km e 37,8 km, respectivamente.

A figura 42 mostra a comparação das duas medidas de análise de multipercurso, agora com IG 1/8. Neste caso, o sinal de Paranavaí ainda chega antes do de Cianorte, conforme previsto. O valor prático do atraso (5,54 µs) está próximo ao valor teórico (7,05 µs). O apontamento para Cianorte continua a apresentar nível de sinal e MER maior e taxa de erro de bit menor.

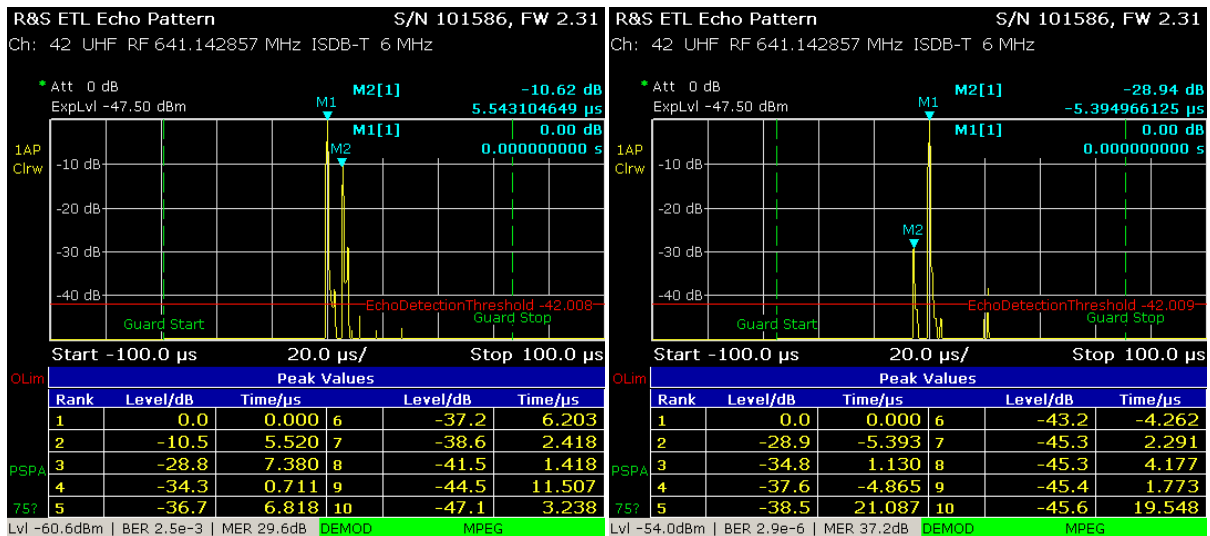


Figura 42 - Análise de multipercursos no Ponto Indianopolis IG 1/8
Fonte: Autoria própria

3.4. PROCEDIMENTOS REALIZADOS – GAP FILLER

A aquisição dos dados foi realizada na cidade de Araucária com o mesmo carro de pesquisa de sinal da RPC TV.

Os equipamentos utilizados para aquisição das medidas:

- Analisador de Espectro (Modelo: ETL TV Analyzer, Fabricante: Rohde&Schwarz).
- Antena UHF (Modelo: PQUT-1000, Fabricante: Proeletronic).
- Cabo Coaxial RGC-6.

A antena foi instalada no mastro do carro, ficando a uma altura de 6 metros em relação ao chão. Foram feitos dois apontamentos, um para a antena de transmissão de Curitiba e outro para a de Araucária. Medidas dos dois apontamentos foram coletadas.

Foram escolhidos três pontos de interesse a serem medidos, todos na cidade de Araucária. Esses pontos foram estrategicamente selecionados para se saber como o sinal irá se comportar num ponto entre os dois transmissores, mas perto da fronteira entre as cidades; um ponto entre os dois transmissores, mas próximo do Gap Filler; e por último um ponto depois do Gap Filler. A lista de localização dos pontos é mostrada na tabela 10. Em seguida, a figura 43 mostra os pontos e as duas cidades no Google Earth.

Tabela 10 - Pontos para análise do Gap Filler na região de Araucária

Ponto	Cidade	Coordenadas	
		Latitude	Longitude
Ponto 1	Araucária	25° 31' 58,30"S	49° 21' 36,40"W
Ponto 2	Araucária	25° 34' 07,10"S	49° 23' 22,00"W
Ponto 3	Araucária	25° 36' 41,40"S	49° 23' 15,80"W

Fonte: Autoria própria

A tabela 11 mostra os atrasos teóricos calculados para IG 1/8. O cálculo do atraso está ligado a três variáveis. São elas a distância entre o ponto e transmissores, a distância entre os transmissores e atraso de processamento do *Gap Filler*. O reforçador de sinal utilizado teve seu atraso medido e o valor é de aproximadamente 7,775 μ s. A distância entre os dois transmissores é de 23,06 km. O atraso teórico será sempre o sinal de Curitiba em relação ao de Araucária, já que o primeiro sempre estará adiantado em relação ao segundo.

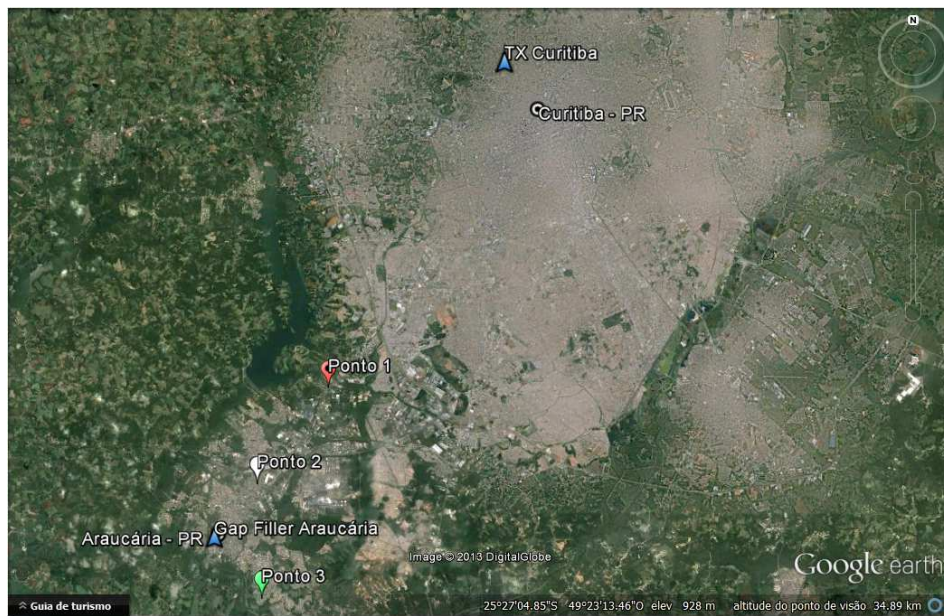


Figura 43 - Pontos para análise do Gap Filler na região de Araucária

Fonte: Google Earth (2013)

Tabela 11 - Atrasos teóricos entre sinais calculados para IG 1/8

Ponto	Distância TX Curitiba e Ponto [km]	Distância GF Araucária e Ponto [km]	Atraso teórico [μ s]
Ponto 1	14,76	08,32	63,19
Ponto 2	19,67	03,39	30,39
Ponto 3	23,78	02,73	14,49

Fonte: Autoria própria

3.5. RESULTADOS EM CAMPO – GAP FILLER

A apresentação dos resultados será feita de forma comparativa entre o apontamento para a antena da emissora em Curitiba e a antena da retransmissora em Araucária, nesta ordem.

O primeiro ponto medido foi o “Ponto 1”. A figura 44 mostra a comparação das duas medidas de análise de multipercurso. Em ambos os apontamentos percebem-se que o sinal de Curitiba é mais forte que o de Araucária. Aqui temos o caso onde o *Gap Filler* não tem tanta influência sobre a região desse ponto, sendo recomendado apontar a antena para Curitiba em vez de Araucária. O primeiro apontamento apresenta um sinal com maior nível de intensidade, maior valor de MER e menor taxa de erro de bit em relação ao segundo. O atraso medido na prática, 64,09 μ s, está próximo do valor teórico calculado, 63,19 μ s.

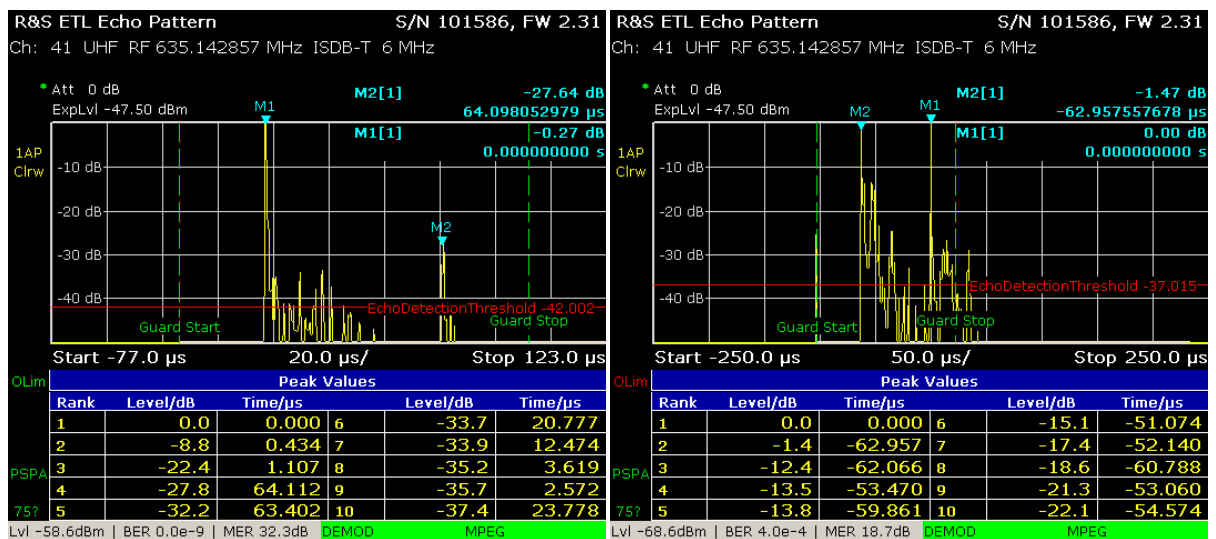


Figura 44 - Análise de multipercurso GF Araucária - Ponto 1
Fonte: Autoria própria

O segundo ponto, “Ponto 2”, apresenta o caso onde o *Gap Filler* apresenta um papel importante para a região desse ponto. A figura 45 mostra a comparação das duas medidas de análise de multipercurso. O apontamento para Curitiba apresenta um sinal fraco, quase próximo do limiar de não demodulação do sinal. Já o apontamento para Araucária mostra um sinal forte, melhor medida de MER e menor taxa de erro de bit em relação ao apontamento para a emissora. O atraso medido na prática, 30,53 μ s, está próximo do valor teórico calculado, 30,39 μ s.

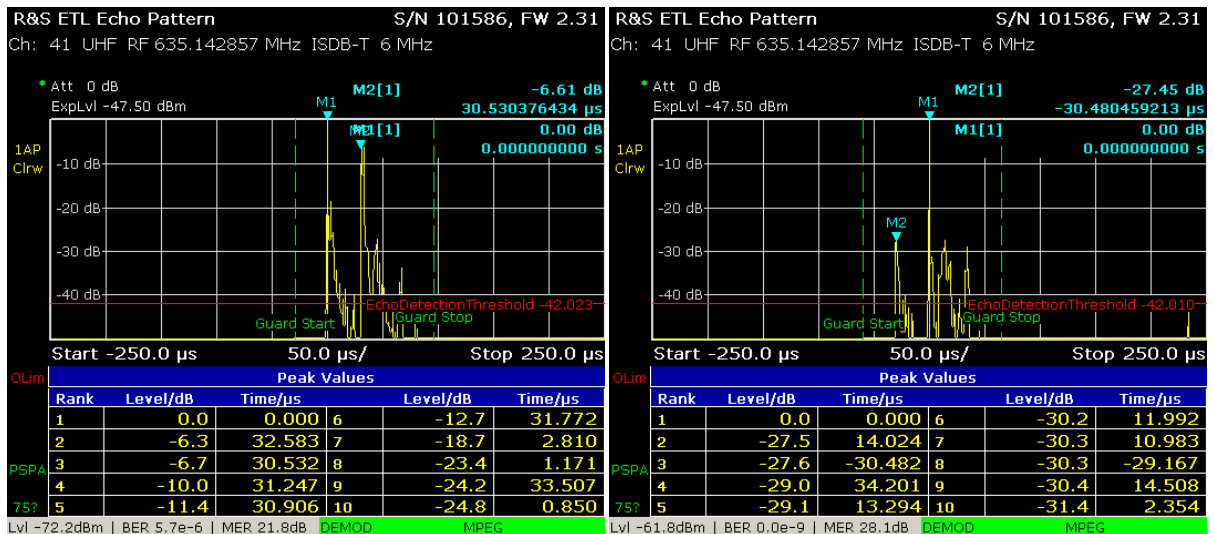


Figura 45 - Análise de multipercurso GF Araucária - Ponto 2
 Fonte: Aatoria própria

O terceiro e último ponto denominado “Ponto 3” está localizado numa área onde havia uma região de sombra. Se não existisse o Gap Filler somente o sinal de Curitiba não era suficiente para que essa região recebesse o sinal da RPC TV. A figura 46 mostra a comparação das duas medidas de análise de multipercurso. O apontamento para Curitiba apresenta uma recepção de sinal fraco, onde um receptor caseiro não iria abrir o sinal, apresentando uma mensagem de ‘sinal fraco’ na tela. O correto apontamento para Araucária soluciona este problema, deixando o sinal com melhor nível, maior medida de MER e menor taxa de erro de bit. O atraso medido na prática, 14,56 μs, está próximo do valor teórico calculado, 14,49 μs.

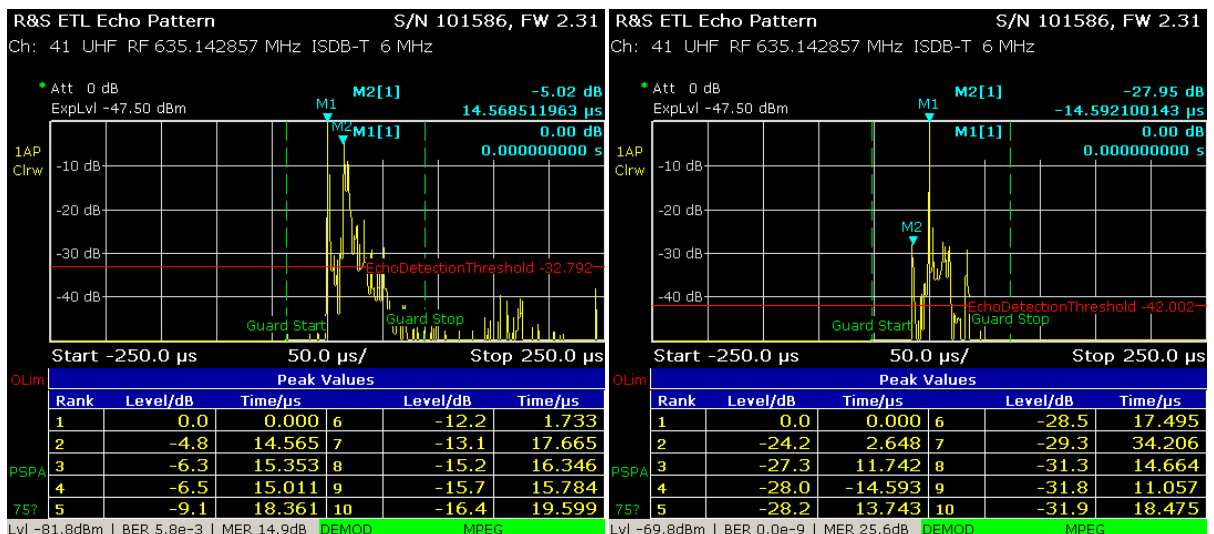


Figura 46 - Análise de multipercurso GF Araucária - Ponto 3
 Fonte: Aatoria própria

4. CONCLUSÕES

Neste último capítulo são apresentadas as considerações sobre a utilização das redes SFN e *Gap Fillers* para aumentar a cobertura das emissoras de televisão.

A implantação das redes SFN descritas no capítulo 3 demonstraram que essa solução não é trivial, sendo necessário conhecimento aprofundado sobre o sistema em questão. A dificuldade se inicia já no projeto com a verificação das regiões de interferência e cálculos de atrasos, tendo muito cuidado com a limitação do intervalo de guarda. Em seguida, observou-se dificuldade na implantação prática. A correta configuração dos parâmetros no MUX no caso de SFN Distribuída e instalação correta das antenas no caso de *Gap Filler* foram observados como complicadores numa primeira tentativa. A aquisição das medidas se fez necessária para dois apontamentos, mas esse fato não gerou dificuldades. A análise dos dados coletados foi de extrema importância para verificar se as informações calculadas na teoria estavam corretas e se o sistema estava configurado corretamente.

Conclui-se que com transmissores trabalhando dentro da rede SFN não há a necessidade de trabalhar com equipamentos de altíssimas potências, fato este comum em redes MFN. A frequência única permite a utilização de vários transmissores trabalhando com potências individuais menores, sem haver desperdício de potência em regiões próximas ao transmissor. Além dessa economia, pode-se citar o melhor aproveitamento do espectro, deixando-o o livre para outros canais de TV ou outras finalidades.

Por fim, pode-se afirmar que as redes SFN e *Gap Fillers* podem sim ser a solução para a expansão da cobertura das emissoras de TV Digital. Vale ressaltar novamente que essa solução impõe a necessidade de se ter conhecimentos teóricos sobre o assunto para a correta implantação desse sistema.

Como proposta futura aponta-se a análise de funcionamento da rede com o aumento das retransmissoras trabalhando com SFN na região de Curitiba e litoral do Paraná pela empresa RPC TV Curitiba. Com isso, será possível analisar a interferência de sinais advindos de vários, não apenas dois, transmissores ao mesmo tempo.

REFERÊNCIAS

ALENCAR, MARCELO SAMPAIO DE. **Televisão Digital**. 1ª Edição. São Paulo: Érica, 2007. 351 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15601: Televisão digital terrestre – Sistema de transmissão. Rio de Janeiro, 2007.

BEDICKS JUNIOR, Gunnar. **Sintonizador-Demodulador para o Sistema Brasileiro de TV Digital**. 2008. 169 f. Tese (Doutor em Engenharia Elétrica) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

CARVALHO, Silvio Renato Messias De. **Utilização da Rede SFN para Expansão Regional da TV Digital Aberta Terrestre**. 2006. 146 f. Dissertação (Mestre em Engenharia Elétrica) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2006.

COELHO JUNIOR, Helio. **Sistema de Transmissão no Padrão Brasileiro de TV Digital**. Disponível em: < <http://www.midiacom.uff.br/~debora/fsmm/trab-2008-2/transmissao.pdf>> Acesso em: 13 de Março, 2013.

EGBERTO, Fernando. **Sistemas de Televisão**. Disponível em: < <http://www.egberto.eletrica.ufu.br/STV/29out0886.pdf>> Acesso em 23 de Junho, 2013.

FALLER, Raul I. **Planejamento de Cobertura – As Opções Para a TV Digital Terrestre**. Disponível em: <http://www.kathrein.com.br/novidades_planj_cbert.php> Acesso em: 13 de Março, 2013.

LIMA, Vanessa; MACHADO, Luiz Eduardo; BARCIA, Felipe Amaral. Redes de Frequência Única. **Revista da SET**, Rio de Janeiro, ano XXII, n° 132, p. 92-96, abril 2013.

OLIVEIRA, Jean Felipe Fonseca De. **Avaliação Experimental do Desempenho do Canal Móvel do Sistema Brasileiro de Televisão Digital**. 2008. 101 f. Dissertação (Mestre em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2008.

RÉGIS, M. V. de O.; FECHINE, J. M. **Introdução ao Sistema de TV Digital**. Disponível em: <<http://www.dsc.ufcg.edu.br/~pet/Artigos/>> Acesso em: 14 de Agosto, 2007.

TAKAHASHI, Yasuo. **Implementation of Broadcaster**. Disponível em: <http://www.dibeg.org/news/previous_doc/0706_2Brazil_ISDB-T_seminar/Brazil-ISDB-Tseminar7-Impementation.pdf> Acesso em 11 de Julho, 2013.

TELECO INFORMAÇÃO E SERVIÇOS DE TELECOMUNICAÇÕES LTDA. **TV Digital I: Modulação OFDM**. Disponível em: <http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialtvdentr1/pagina_3.asp> Acesso em 19 de Julho, 2013.

YAMADA, F.; SUKYS, F.; BEDICKS JUNIOR, G.; AKAMINE, C.; RAUNHEITTE, L. T. M.; DANTAS, C. E. **Revista Mackenzie de Engenharia e Computação**, São Paulo, ano 5, p. 155-173, 2004.